



**REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DO PROCESSO SIDERÚRGICO DO  
FERRO GUSA (ESCÓRIA DE ALTO FORNO) NA ELABORAÇÃO DE  
ARGAMASSAS NÃO ESTRUTURAIS**

**Janne Caroline Silva dos Anjos**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos – Mestrado Profissional, PPGEP/ITEC, da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Processos.

Orientador: José Antônio da Silva Souza

Belém

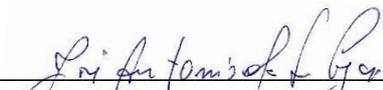
Junho de 2021

**REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DO PROCESSO SIDERÚRGICO DO  
FERRO GUSA (ESCÓRIA DE ALTO FORNO) NA ELABORAÇÃO DE  
ARGAMASSAS NÃO ESTRUTURAIS**

Janne Caroline Silva dos Anjos

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA PROCESSOS – MESTRADO PROFISSIONAL (PPGEP/ITEC) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA DE PROCESSOS.

Examinada por:



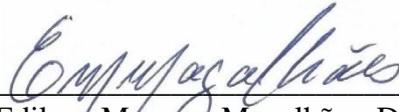
---

Prof. José Antônio da Silva Souza, Dr.  
(PPGEP/ITEC/UFPA-Orientador)



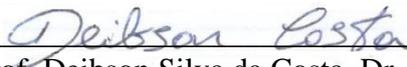
---

Prof. Dilson Nazareno Pereira Cardoso, Eng.  
(PPGEP/ITEC/UFPA-Coorientador)



---

Prof. Edilson Marques Magalhães, Dr.  
(PPGEP/ITEC/UFPA-Membro)



---

Prof. Deibson Silva da Costa, Dr.  
(EST/UEA-Membro)

BELÉM, PA - BRASIL

JUNHO DE 2021

**Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)**  
**Sistema de Bibliotecas da UFPA**

---

Anjos, Janne Caroline Silva dos, 1988-  
Reaproveitamento de resíduos do processo siderúrgico do ferro gusa (escória de alto forno) na elaboração de argamassas não estruturais / Janne Caroline Silva dos Anjos. - 2021.

Orientador: José Antônio da Silva Souza

Dissertação (Mestrado Profissional) - Universidade Federal do Pará. Instituto de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, 2021.

1. Argamassa- Aditivos 2. Resíduos industriais- Reaproveitamento 3. Escória (Metalurgia) - Reaproveitamento  
I. Título

CDD 23. ed. 691.5

---

*Dedico esse trabalho à minha família,  
em especial a minha irmã, Joyce dos  
Anjos que é meu exemplo de humildade e  
sempre me apoiou e incentivou a superar  
todos os obstáculos.*

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, pela dádiva da vida e por me permitir realizar tantos sonhos nesta existência. Obrigada por me permitir errar, aprender e crescer, pela Sua voz “invisível” que não me permitiu desistir e principalmente por ter me dado uma família tão especial.

Aos meus pais, Sebastião e Edina, pelo apoio e incentivo em todos os momentos da minha vida. Por acreditarem em mim, e não medirem esforços para a concretização dos meus sonhos.

A minha querida irmã Joyce dos Anjos, que sempre me encorajou, aconselhou e apoiou em todas as horas, sempre com uma palavra amiga e de incentivo.

Por fim, a elaboração deste trabalho não teria sido possível sem a colaboração, estímulo e empenho de diversas pessoas. Gostaria, de expressar toda a minha gratidão e apreço a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para que esta tarefa se tornasse uma realidade. A todos quero manifestar os meus sinceros agradecimentos.

Resumo da Dissertação apresentada ao PPGEP/UFPA como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Processos (M. Eng.)

**REAPROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DO PROCESSO SIDERÚRGICO DO  
FERRO GUSA (ESCÓRIA DE ALTO FORNO) NA ELABORAÇÃO DE  
ARGAMASSAS NÃO ESTRUTURAS**

**Janne Caroline Silva dos Anjos**

Junho/2021

Orientador: José Antônio da Silva Souza

Área de Concentração: Engenharia de Processos

Na atividade de mineração, os resíduos gerados são resultantes dos processos metalúrgicos a que são submetidas as substâncias minerais. Tais resíduos industriais podem ser utilizados como matéria-prima para a fabricação de materiais de construção civil. Desta forma, na tentativa de dar viabilidade às escórias ácidas produzidas por altos-fornos, cada vez mais a investigação científica, visa minimizar o impacto ambiental provocado pelo acúmulo destes resíduos, através do desenvolvimento de aplicações apropriadas a estas. Assim sendo, adotou-se como objeto deste estudo, o resíduo proveniente da indústria produtora de ferro gusa, a escória de alto-forno. Estabelecendo uma forma de outra opção de agregados que possibilite a produção de argamassas com características compatíveis aos convencionais, sem a necessidade de altos consumos dos agregados naturais. A caracterização química do resíduo Escoria de alto forno utilizado, foi fornecida por uma empresa mineradora pertencente ao grupo SINOBRAS, localizada no distrito industrial, Marabá - PA. Foi realizada a caracterização do resíduo através da técnica de difratometria de raio X (DRX), Fluorescência de raio X (FRX), análise granulométrica a laser, dentre outros índices que a caracterizam como agregado miúdo para argamassa. Para a produção das argamassas, foram feitos traços de diferentes porcentagens de materiais e resíduo de EAF nas proporções 400g de (cimento portland, areia e escoria). Após o processo de cura, foi possível analisar os corpos-de-prova por meio de ensaios físicos: absorção por imersão,

porosidade e ensaio de resistência à compressão. Os resultados mostraram que de uma forma geral as argamassas apresentaram um elevado aumento da resistência à compressão em todos os corpos de prova, principalmente para os traços 02 e 04, esse aumento foi mais acentuado, quando se compara com corpos de prova de referência, desta forma, sendo analisados e discutidos por meio de microscopia eletrônica de varredura.

Abstract of Dissertation presented to PPGE/UFPA as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Process Engineering (M. Eng.)

**REUSE OF WASTE FROM THE PIG IRON STEEL PROCESS (BLAST FURNACE SLA) IN THE ELABORATION OF NON-STRUCTURAL MORTARS**

**Janne Caroline Silva dos Anjos**

June/2021

Advisor: José Antônio da Silva Souza

Research Area: Process Engineering

In the mining activity, the waste generated is the result of metallurgical processes to which mineral substances are subjected. Such industrial residues can be used as raw material for the manufacture of civil construction materials. Thus, in an attempt to make acidic slag produced by blast furnaces viable, scientific research increasingly seeks to minimize the environmental impact caused by the accumulation of these residues, through the development of appropriate applications for them. Therefore, it was adopted as the object of this study, the residue from the pig iron producing industry, the blast furnace slag. Establishing a form of another option of aggregates that enables the production of mortars with characteristics compatible with conventional ones, without the need for high consumption of natural aggregates. The chemical characterization of the used blast furnace slag residue was provided by a mining company belonging to the SINOBRAS group, located in the industrial district, Marabá - PA. The characterization of the residue was carried out using the technique of X-ray diffraction (XRD), X-ray fluorescence (FRX), laser particle size analysis, among other indices that characterize it as a fine aggregate for mortar. For the production of mortars, traces of different percentages of materials and EAF residue in the proportions of 400g of (portland cement, sand and slag) were made. After the curing process, it was possible to analyze the specimens through physical tests: absorption by immersion, porosity and compressive strength test. The results showed that, in general, the mortars showed a

high increase in compressive strength in all specimens, especially for mixes 02 and 04, this increase was more accentuated, when compared to reference specimens, of this form, being analyzed and discussed by means of scanning electron microscopy.

## SUMÁRIO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....</b>   | <b>1</b>  |
| 1.1 - MOTIVAÇÃO.....  | 1         |
| <b>1.1.1 - Ambiental.....</b>   | <b>3</b>  |
| <b>1.1.2 - Econômica.....</b>   | <b>4</b>  |
| <b>1.1.3 - Tecnológica.....</b>   | <b>5</b>  |
| 1.2 - OBJETIVOS.....  | 5         |
| <b>1.2.1 - Objetivo geral.....</b>  | <b>5</b>  |
| <b>1.2.2 - Objetivos específicos.....</b>   | <b>5</b>  |
| <b>CAPÍTULO 2 - REVISÃO DA LITERATURA.....</b>  | <b>7</b>  |
| 2.1 - A RECICLAGEM DE RESÍDUOS SÓLIDOS.....   | 7         |
| 2.2 - RECICLAGEM DE RESÍDUOS E SUA IMPORTÂNCIA.....   | 8         |
| 2.3 - RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DE MINERAÇÃO.....   | 9         |
| <b>2.3.1 - Impactos ambientais causados pela indústria da mineração.....</b>                                      | <b>10</b> |
| 2.4 - CLASSIFICAÇÃO DOS AGREGADOS MIÚDOS RECICLADOS DE ACORDO COM A RESOLUÇÃO DO NBR 10004 /2004 E CONAMA N° 307. | 12        |
| <b>2.4.1 - Utilização agregado miúdo de resíduos industriais.....</b>   | <b>14</b> |
| 2.5 - ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO.....   | 15        |
| <b>2.5.1 - Conceitos e definições.....</b>  | <b>15</b> |
| <b>2.5.2 - Propriedades das argamassas.....</b>   | <b>17</b> |
| <b>2.5.3 - Propriedades aglomerantes.....</b>   | <b>20</b> |
| 2.6 - AGREGADOS MIÚDO PARA ARGAMASSAS.....  | 21        |
| 2.7 - CIMENTO PORTLAND.....   | 22        |
| <b>2.7.1 - Histórico.....</b>   | <b>22</b> |
| <b>2.7.2 - Composição do cimento portland (matérias-primas).....</b>  | <b>23</b> |
| <b>2.7.3 - Cimento portland com escória.....</b>  | <b>25</b> |
| 2.8 - ESCÓRIADE ALTO FORNO.....   | 27        |
| <b>2.8.1 - Definições.....</b>  | <b>27</b> |
| <b>2.8.2 - Composição química.....</b>  | <b>29</b> |
| <b>2.8.3 - Minério de ferro.....</b>  | <b>31</b> |
| <b>2.8.4 - Reciclagem de escória de alto forno no Brasil.....</b>   | <b>34</b> |
| 2.9 - UTILIZAÇÃO DE ESCORIA DE ALTO FORNO EM CONCRETOS E  | 38        |

|  |           |
|--|-----------|
| ARGAMASSAS.....  |           |
| <b>CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>   | <b>44</b> |
| 3.1 - PLANO EXPERIMENTAL.....  | 44        |
| 3.2 - SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....  | 45        |
| 3.2.1 - Cimento.....   | 45        |
| 3.2.2 - Areia.....   | 47        |
| 3.2.3 - Água.....  | 48        |
| 3.2.4 - Escoria de alto forno.....   | 48        |
| 3.3 - MOAGEM.....  | 49        |
| 3.4 - ELABORAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS E<br>DEFINIÇÃO DOS TRAÇOS DE ARGAMASSA..... | 50        |
| 3.5 - CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-MECÂNICA NO ESTADO<br>ENDURECIDO.....                            | 53        |
| 3.5.1 - Resistência à compressão.....  | 53        |
| 3.5.2 - Absorção aparente.....   | 54        |
| 3.5.3 - Porosidade aparente.....   | 55        |
| 3.5.4 - Massa Específica Aparente (MEA).....   | 56        |
| 3.6 - ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DOS MATERIAIS.....  | 56        |
| 3.7 - CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA.....   | 56        |
| 3.7.1 - Difração de raios X (DRX).....   | 56        |
| 3.7.2 - Espectrometria de Fluorescência de raios X (FRX).....                                | 57        |
| 3.7.3 - Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV.....                                       | 58        |
| <b>CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>  | <b>59</b> |
| 4.1 - CARACTERIZAÇÃO DAS MATERIAS PRIMAS.....  | 59        |
| 4.1.1 - Análise granulométrica do resíduo de EAF.....  | 59        |
| 4.1.2 - Difração de raios X (DRX) da escoria de alto forno.....                              | 60        |
| 4.1.3 - Características físicas do cimento portland (CP 2 E-32).....                         | 62        |
| 4.1.4 - Características físicas e granulométricas da areia de obra civil.....                | 63        |
| 4.2 - RESULTADOS DE RESISTÊNCIA MECÂNICA PARA OS CORPOS<br>DE PROVA ELABORADOS COM EAF.....  | 64        |
| 4.2.1 - Resistência à compressão axial.....  | 64        |
| 4.2.2 - Porosidade aparente.....   | 66        |
| 4.2.3 - Correlação entre porosidade aparente e resistência à compressão.....                 | 66        |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>4.2.4 - Absorção aparente e massa específica aparente.....</b>                  | <b>67</b> |
| <b>4.2.5 - Correlação entre absorção aparente e massa específica aparente.....</b> | <b>69</b> |
| <b>4.2.6 - Fluorescência de raio – X.....</b>                                      | <b>70</b> |
| <b>4.2.7 - Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....</b>                      | <b>71</b> |
| <b>CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....</b>                                    | <b>72</b> |
| <b>5.1 - CONCLUSÕES.....</b>   | <b>72</b> |
| <b>5.2 - SUGESTÕES.....</b>  | <b>73</b> |
| <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>   | <b>74</b> |
| <b>APÊNDICE A - MATRIZES E TABELAS DE PROPORÇÃO.....</b>                           | <b>84</b> |
| <b>APÊNDICE B - RESULTADOS.....</b>  | <b>85</b> |
| <b>ANEXO I - CLASSIFICAÇÃO DAS ARGAMASSAS.....</b>                                 | <b>88</b> |

## LISTA DE FIGURAS

|             |  |    |
|-------------|--|----|
| Figura 2.1  | Cimento portland.....  | 23 |
| Figura 2.2  | Influência do teor de SiO <sub>2</sub> na resistência mecânica de cimentos de escória ativados com silicatos de sódio com relação água/cimento = 0,48..... | 27 |
| Figura 2.3  | Fluxograma do minério de ferro.....  | 32 |
| Figura 2.4  | Seção transversal de um alto-forno.....  | 33 |
| Figura 2.5  | Produção brasileira de aço bruto.....  | 35 |
| Figura 2.6  | Difratograma das pastas com escória A(5352) e B(4410), aos 28 dias. CSH – Silicato de cálcio hidratado, HT –Hidrotalcita...                                | 39 |
| Figura 2.7  | Calorimetria exploratória diferencial.....   | 40 |
| Figura 2.8  | Análise da estrutura cristalina da escória de alto forno por difração de raios-X (DRX).....  | 41 |
| Figura 2.9  | Microscopia eletrônica de varredura.....   | 43 |
| Figura 3.1  | Fluxograma geral dos métodos adotados.....   | 44 |
| Figura 3.2  | Principais etapas experimentais da pesquisa.....   | 45 |
| Figura 3.3  | Cimento portland.....  | 46 |
| Figura 3.4  | Areia.....   | 48 |
| Figura 3.5  | Escória de alto forno.....   | 49 |
| Figura 3.6  | Moinho de disco marca MARCONI (modelo MA 700 série 100690037).....   | 50 |
| Figura 3.7  | Corpos de prova no molde cilíndrico.....   | 51 |
| Figura 3.8  | Misturador mecânico SOLDTEST.....  | 52 |
| Figura 3.9  | Prensa hidráulica modelo (EMIC SSH30- célula TRD30) (a) e corpo de prova rompido (b).....  | 54 |
| Figura 3.10 | (a) Corpos de prova em imersão por 24Hs e (b). dispositivo para medição da massa imersa dos CP's.....  | 55 |
| Figura 3.11 | Equipamentos de MEV.....   | 58 |
| Figura 4.1  | Distribuição do tamanho de partícula do resíduo de escória de alto-forno.....  | 59 |
| Figura 4.2  | Análise da estrutura cristalina da escória de alto forno por difração de raios-X (DRX).....  | 61 |

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| Figura 4.3  | Distribuição granulométrica da areia quartzosa.....           | 64 |
| Figura 4.4  | Gráfico de resistência à compressão.....                      | 65 |
| Figura 4.5  | Gráfico de porosidade aparente.....                           | 66 |
| Figura 4.6  | Relação entre resistência a compressão e porosidade.....      | 67 |
| Figura 4.7  | Gráfico do ensaio de absorção.....                            | 68 |
| Figura 4.8  | Gráfico de massa específica aparente.....                     | 69 |
| Figura 4.9  | Gráfico de absorção aparente e massa específica aparente..... | 69 |
| Figura 4.10 | Morfologia dos traços TR-02 e TR-03 e TR-04.....              | 71 |

## LISTA DE TABELAS

|            |  |    |
|------------|--|----|
| Tabela 2.1 | Propriedades das argamassas no estado fresco e endurecido.....   | 17 |
| Tabela 2.2 | Resistência à compressão em Mpa.....   | 19 |
| Tabela 2.3 | Massa Especifica no estado endurecido.....   | 19 |
| Tabela 2.4 | Massa Especifica no estado fresco em kg/m <sup>3</sup> .....   | 19 |
| Tabela 2.5 | Composição dos cimentos portland.....  | 25 |
| Tabela 2.6 | Composição química da escória de alto-forno granulada moída  | 29 |
| Tabela 2.7 | Composição das escórias de alto-forno no Brasil,<br>comparativamente ao cimento portland comum.....                        | 36 |
| Tabela 3.1 | Cimento portland CP II – E 32.....   | 46 |
| Tabela 3.2 | Tabela de determinações para o resíduo de escoria de alto<br>forno.....  | 49 |
| Tabela 3.3 | Condição específica de moagem para a etapa de cominuição....   | 50 |
| Tabela 3.4 | Tabela de proporções para as argamassas elaboradas.....  | 52 |
| Tabela 4.1 | Características Físicas do resíduo da EAF.....   | 60 |
| Tabela 4.2 | Resultados da caracterização química, física e mecânica do<br>cimento Portland CP II - E 32.....                           | 62 |
| Tabela 4.3 | Caracterização física da areia quartzosa.....  | 63 |
| Tabela 4.4 | Resultados da FRX do resíduo de escoria de alto forno (EAF)..  | 70 |
| Tabela A.1 | Massa total da mistura para elaboração de 1 corpo de prova.....  | 84 |
| Tabela B.1 | Ensaio de absorção nos traços de argamassa.....  | 85 |
| Tabela B.2 | Ensaio de porosidade aparente nos traços de argamassa.....   | 86 |
| Tabela B.3 | Ensaio de resistência à compressão nos traços de argamassa<br>elaborados com escoria.....                                  | 86 |
| Tabela I.1 | Classificação das argamassas, quanto a resistência a<br>compressão ABNT, NBR 13279-Resistência a compressão em<br>Mpa..... | 88 |

## NOMENCLATURA

|          |   |
|----------|---|
| ABNT     | ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS        |
| ASTM     | AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS      |
| CP'S     | CORPOS DE PROVA                                 |
| COSIPAR  | COMPANHIA SIDERÚRGICA DO PARÁ                   |
| EAF      | ESCORIA DE ALTO FORNO                           |
| DRX      | DIFRAÇÃO DE RAIOS X                             |
| FTIR     | FOURIER TRANSFORM INFRARED SPECTROSCOPY         |
| IBGE     | INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA |
| GAF      | GASES DE ALTO FORNO                             |
| MEA      | MASSA ESPECIFICA APARENTE                       |
| MEV      | MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA             |
| SINOBRAS | SIDERÚRGICA NORTE BRASIL S/A                    |
| UFPA     | UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ                    |

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1 - MOTIVAÇÃO

No século XXI todas as atividades humanas foram marcadas pela busca de um equilíbrio entre o retirar e o repor, quando se trata de recursos naturais, porém o conceito que o termo sustentabilidade apresenta é contraditório quando relacionado aos bens naturais não renováveis. Em relação aos minerais, coloca-se em prática, maneiras mais racionais do uso dos recursos naturais, para que se possa mitigar cada vez mais desequilíbrios climáticos, tais como: poluição do ar, das águas e dos solos para que não se apresente uma conseqüente baixa da qualidade de vida de um número cada vez maior de pessoas. Neste contexto, está o extrativismo mineral, que como bem não renovável, precisa ser mais bem explorado e utilizado, demandando novas leis de tributação e uma política de extração destes bens, que possam trazer mais retorno para as populações mais afetadas e diretamente ligadas aos polos de extração mineral. (MARTINS, 2004).

A disposição inadequada de resíduos é uma das principais causas da degradação do meio ambiente, com potencial de afetar a qualidade de vida da população, o equilíbrio dos ecossistemas e a disponibilidade de recursos naturais. Os resíduos oriundos de indústrias de beneficiamento de minério não são exceção, e podem se tornar parte deste problema caso não lhes seja dado o correto gerenciamento. Além do que, sua gestão inadequada representa um grande desperdício econômico, visto que estes não só constituem a maior fração em massa dos resíduos gerados nas cidades, como em muitos casos são compostos em grande parte por material passível de reciclagem ou reaproveitamento (COVAS, 2012).

As usinas siderúrgicas em geral, utilizam basicamente ar, água, combustível, energia e minério de ferro como materiais para a produção de aço. Durante a produção de aço, cerca de 2 a 4 toneladas de resíduos vem sendo geradas para cada tonelada de aço produzido (DAS et al., 2007). O setor siderúrgico no Brasil gerou cerca de 594 Kg de resíduos por tonelada de aço produzido no ano de 2013 (IBS, 2014), sendo que a produção do aço para o mesmo ano foi de 15 milhões de toneladas no primeiro semestre de 2020 (IAB, 2020), desses resíduos 37% são de escória de alto forno (EAF), representando a maior parcela de geração de coprodutos e resíduos desse setor.

O estado do Pará possui uma economia basicamente mineradora, seu polo guseiro fica localizado no distrito industrial da cidade de Marabá, distante 485 km da capital Belém, sendo formado por nove siderúrgicas, das quais apenas quatro estão em funcionamento: Companhia Siderúrgica do Pará (COSIPAR), Ferro Gusa Carajás, Siderúrgica Norte Brasil S/A (SINOBRAS) e Siderúrgica do Pará S.A. fazendo que fiquem na posição de segundo maior produtor nacional de ferro-gusa, sendo responsável por 25% da produção nacional, ficando atrás somente do estado de Minas Gerais. O Sindicato das Indústrias de Ferro Gusa do Estado do Pará (SINDIFERPA) anunciou que o sistema produtivo de ferro gusa no Pará apresentou uma capacidade instalada de produção do minério de ferro de 2,9 milhões de ton/ano, tendo como principais mercados consumidores a Ásia, América Latina e América do Norte. (SIDEPAR).

O setor siderúrgico é um dos principais geradores de divisas para o estado. Assim, a produção de ferro-gusa proveniente dos altos-fornos, é uma atividade geradora de resíduos sólidos, os quais se não dispostos adequadamente podem se constituir em fontes poluidoras dos ecossistemas ambientais. Com isto, torna evidente a grande necessidade das pesquisas atenderem não só aos aspectos econômicos e sociais como também aos ambientais e tecnológicos na busca de um novo conceito de materiais que leva em consideração não somente desempenho mecânico, custo e disponibilidade, mas também aspectos relacionados, tais como, biodegradabilidade, renovabilidade e uso consciente de energia, acompanhado pela promoção de desenvolvimento econômico e social de uma parcela populacional de baixa renda (AMICO, 2010)

A tentativa de dar um melhor destino às escórias ácidas produzidas por altos-fornos, cada vez mais a investigação científica, como forma de diminuir o impacto ambiental provocado pelo acúmulo e a disposição inadequada destes resíduos, do desenvolvimento de aplicações apropriadas a estas. Assim sendo, adotou-se como objeto deste estudo, o resíduo proveniente da indústria produtora de ferro gusa, a escória de alto-forno.

Através da fabricação de agregados que possibilite a produção de argamassas com características compatíveis aos convencionais, sem a necessidade de altos consumos dos agregados naturais. Mas também, um estudo de caso que possam viabilizar o uso de um resíduo industrial, cujo acúmulo tem se mostrado como um grande problema dos processos industriais. Desta maneira, esta pesquisa torna-se relevante, tanto no sentido de apresentar os benefícios técnicos da incorporação da

escória de alto-forno, quanto no sentido de ser uma estratégia de sustentabilidade socioambiental para a cadeia produtiva da produção de argamassa.

Assim, na linha de pesquisa do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de processos, as questões relacionadas a reciclagem estão latentes, buscando a inovação, solução, e sustentabilidade o programa estimula a união com da Engenharia química, Engenharia civil e a Engenharia dos materiais, além de outras Engenharias para o surgimento de produtos relacionados a tais necessidades atendendo aspectos técnicos e ambientais. O presente trabalho propõe uma aplicação, para obtenção de argamassas a partir de rejeitos oriundos da mineração a escórias de alto forno em termos de suas características físico-químicas, devido a sua maior concentração de SiO<sub>2</sub>, o que colabora para a formação do esqueleto granular tanto das argamassas quanto do concreto no estado endurecido.

Acredita-se que os resultados obtidos nesta pesquisa possam fornecer informações para a viabilização do seu uso a uma argamassa produzida com resíduos industriais da construção civil e minero metalúrgica deste modo, o que torna o trabalho importante sob vários aspectos.

### **1.1.1 - Ambiental**

Muitas empresas vêm investindo cada vez mais em equipamentos e formação de quadros técnicos para eliminar a cultura do desperdício e consolidar a cultura da redução de perdas, reciclagem e reutilização de resíduos. Segundo MOURA (2004), os resíduos não só provocam o impacto ambiental, como também a sua redução e o seu aproveitamento podem minimizar o consumo de recursos naturais e energéticos, o que implica, muitas vezes, num menor dispêndio econômico. A construção civil é um dos setores que provoca maior impacto ambiental, devido ao elevado consumo de matéria-prima. No Brasil, a geração de resíduos e coprodutos diretos, sendo estes as escórias, as lamas, os pós, as carepas, etc., representou 20,88 milhões de toneladas de janeiro a junho em 2020. A produção de agregados siderúrgicos foi da ordem de 607 kg/t de aço bruto nacional. Dentro de tais valores, foram produzidos 42% de escória de alto-forno, 27% do volume total referiram-se à escória de aciaria e o restante representado por finos, pós, lamas, dentre outros coprodutos.

Também, no referido ano e segundo o Instituto Aço Brasil (2020), 92% do agregado siderúrgico de alto forno foram vendidos ao mercado Acumulado até o

segundo Trimestre de 2020/, principalmente para a produção de cimento, enquanto apenas 36% da escória de aciaria foi vendida e 22% do volume produzido deste coproduto foi utilizado internamente, tendo como principal aplicação a execução de base para pavimentação de estradas e vias.

Portanto, diante dessa problemática estabelecida e a grande necessidade de buscar por soluções para os rejeitos gerados pelas indústrias da Metalurgia extrativa, e a na busca de soluções aplicando tecnologias para atender tais necessidades, faz-se necessário reciclar os resíduos provenientes dessa atividade. Para isso, necessita-se de mecanismo de gerenciamento e estudo que vão desde sua geração até sua destinação final. Assim a principal motivação que levou ao desenvolvimento do trabalho foi desenvolver uma argamassa a proveniente desse resíduo, com a finalidade de obter-se contribuições científicas, e ambientais para uma melhor de valorização e destinação e reaproveitamento de resíduos sólidos.

### **1.1.2 - Econômica**

No Brasil, são frequentes os processos construtivos de edifícios que empregam paredes de alvenaria revestidas com argamassas, tanto no sistema de vedação interna, como externa. Isto ocorre, principalmente, em habitações de média e baixa renda, onde os conglomerados à base de cimento e agregados minerais perfazem 20% do custo médio das obras (SANTIN, 1996).

A gestão corporativa de aterros destinados à deposição de resíduos industriais e minerais ainda é uma prática comum no Brasil. Entretanto, não é a única solução para o seu correto gerenciamento, tendo em vista que as alternativas de reciclagem de resíduos estão ganhando crescente importância na produção industrial. Além da reduzida demanda de áreas para a disposição final dos resíduos e as restrições ambientais cada vez maiores, a reciclagem pode também ajudar na redução do custo do tratamento do resíduo antes da sua disposição e, conseqüentemente, na preservação dos recursos naturais e de energia (SCANDOLARA, 2010).

Desta forma, construção civil vem buscando fazer uso de materiais que sejam duráveis, tendo como principais características as propriedades mecânicas e o custo inicial.

### **1.1.3 - Tecnológica**

O avanço do conhecimento científico sobre o território requer uma tecnologia que possibilite o acesso aos minerais de forma eficiente e que gere o menor impacto possível. O processo Bayer, por exemplo, criado a mais de um século é totalmente incompatível com o “mundo cheio” de hoje, pela quantidade de resíduos tóxicos que gera. A sociedade não mais suporta tecnologias poluentes e ineficientes.

Além disso, as tecnologias minerais, em sua grande maioria, criadas pelos países centrais que apresentam condições de solo, clima, cultura completamente distintos, foram transplantadas sem que se tivesse a devida atenção em num contexto regional, surge então, a permanência de lacunas no conhecimento científico e conseqüentemente no avanço tecnológico. Existe um processo de tomada de consciência de que o padrão tecnológico vigente está em fase de esgotamento, já que foi gestado para um “mundo vazio”, nos dizeres de Herman Daly. (ENRÍQUEZ, 2015).

## **1.2 - OBJETIVOS**

### **1.2.1 - Objetivo geral**

O objetivo geral da pesquisa é propor materiais cimentícios (argamassas), sendo esses aproveitáveis dentro da indústria da construção civil, abordando uma lógica de valorização e reaproveitamento de resíduos sólidos gerados a partir da indústria metalúrgica do estado do Pará utilizando o resíduo da escória de alto forno (EAF), obtida no final do processo metalúrgico do ferro gusa.

### **1.2.2 - Objetivos específicos**

- Reintroduzir no processo de elaboração de argamassas, resíduo da indústria de metalurgia extrativa, a chamada escoria de Alto forno como agregado miúdo e pozolânico nas matrizes de elaboração desses materiais;
- Realizar a caracterização do resíduo da escoria de alto forno utilizando técnicas como (Granulometria a laser, DRX, MEV e realizar as caracterizações de suas propriedades físicas e mecânicas, tais como: resistência a compressão, porosidade aparente, absorção de água e massa específica aparente);

- Efetuar uma avaliação da correlação microestrutura/propriedades, comparando os melhores traços elaborados;
- Elaborar corpos de provas cilíndricos a partir das matrizes confeccionadas;
- Realizar a caracterizar os corpos de prova, utilizando técnicas como (Granulometria a laser, DRX ,FRX), e MEV dos melhores traços que obtiveram maiores resistências a compressão.

## **CAPÍTULO 2**

### **REVISÃO DA LITERATURA**

#### **2.1 - A RECICLAGEM DE RESÍDUOS SÓLIDOS**

Qualquer tipo de atividades humanas conhecidas por econômicas alteram o meio ambiente, tendo a mineração e a agricultura como as atividades básicas da economia mundial. O intercâmbio de mineração brasileiro envolve mais de 200 países (DNPM, 2010). No Brasil, a atividade mineradora está diretamente relacionada com o processo de colonização do país pela exploração de riquezas minerais, baseada na escravidão e visando o mercado externo. Atualmente, a mineração é uma das bases do PIB nacional, visto que no ano de 2019 a produção mineral foi estimada no valor de US\$ 38 bilhões (IBRAM, 2019).

Segundo o DNPM, a mineração inclui a exploração das minas subterrâneas e de superfície, as pedreiras e os poços, incluindo-se todas as atividades complementares para preparar e beneficiar minérios em geral, na condição de torná-los comercializáveis, sem provocar alteração, em caráter irreversível, na sua condição primária. Atualmente no país, os recursos minerais são expressivos e abrangem uma produção de 72 substâncias minerais, das quais 23 são metálicas, 45 não metálicas e 4 energéticas. São 1.820 lavras garimpeiras; 830 complexos de água mineral; e 13.250 licenciamentos (IBRAM, 2015). A matéria-prima da mineração são os bens não renováveis que tendem a acabar à medida que sua exploração aumenta. No Brasil, os principais tipos de extração são de: carvão, ouro, chumbo, zinco, prata, agregados para construção civil e garimpos, ferro, calcário, cassiterita, gipsita (FARIAS, 2016,).

Nas últimas décadas tem se observado que o Brasil sofreu profundas transformações, as quais tem sido fundamental para o seu crescimento. O processo de crescimento urbano se completou, e com ele, muitos mecanismos e instrumentos disciplinadores das intensas atividades urbanas e mineral têm surgido como mecanismo de freio frente ao alto índice de degradação ambiental que os mesmos produzem. Estes mecanismos estão repercutindo de forma direta na indústria da construção civil, e de exploração do setor Mineral.

## 2.2 - RECICLAGEM DE RESÍDUOS E SUA IMPORTÂNCIA

Devido às questões ambientais e econômicas, que ocorreram nas últimas décadas reclinadas à reciclagem levando em consideração a indústria da construção civil e os resíduos gerados por essa indústria, tomaram pauta e ganharam mais importância e, por esse motivo, estão sendo desenvolvidas pesquisas e proposições de normatização em muitos países, entre os quais se encontram: Holanda, Dinamarca, Estados Unidos, França, Itália, Rússia e Brasil (NENO, 2010).

O aproveitamento de resíduos como materiais alternativos na construção Civil vem se tornando cada vez mais frequente, visto que os rejeitos, sejam industriais ou urbanos, acabam por poluir o meio ambiente, causando problemas de armazenagem ou descarte de certos produtos. Os padrões de identificação e de descarte de resíduos industriais variam sensivelmente entre os países. Praticamente todas as nações industrializadas têm revisto e tornado mais restritivas suas legislações ambientais, em especial no que concerne à produção, ao transporte, ao tratamento e à deposição final dos resíduos industriais. (GEYER, 2001)

Reciclagem de escória de alto forno a produção anual de escórias de alto forno no Brasil em 1996 foi de 6,4 milhões de toneladas, sendo que 0,7 milhões são resfriadas lentamente e o restante gera material granulado, sendo, portanto, adequada à reciclagem como aglomerantes. Uma grande parte da escória granulada é consumida pela indústria cimenteira. No entanto, uma parte considerável, mesmo a de composição alcalina, permanece acumulada em aterros. O mercado brasileiro ainda não dispõe de escória moída para mistura em betoneira e nem de agregados leves de escória. A produção de agregados leves é feita através da peletização da escória (PERA, 1996), em um processo onde fluxo de escória líquida é interceptado por uma roda dentada rotatória, resfriada com pequena quantidade de água, e projetada em na forma de grãos de tamanho variável. Os grãos menores são predominantemente vítreos e podem ser utilizados na produção de cimento e os grãos maiores constituem- se em agregados leves.

A indústria siderúrgica considera o foco ambiental como parte de sua estratégia competitiva, valorizando economicamente seus resíduos, diversificando o seu mercado consumidor. Este interesse levou a construção da primeira fábrica brasileira de cimento que não dispõe de forno próprio para a produção de clínquer, a cimento Mizu. Esta fábrica opera produzindo cimento CPIII que é adquirido pelo oriente e também pelo mercado nacional. Localizada dentro da área da CST, está capacitada a produzir cerca

de 700 mil toneladas de cimento ao ano. Atualmente a CST também está exportando escória granulada para os EUA.

Os efeitos ambientais deste tipo de cimento são substancialmente menores do que os gerados pelo cimento portland comum, significativamente perceptíveis quando se avalia o ciclo de vida deste novo cimento. Notadamente as emissões ao meio ambiente e o consumo de matérias-primas são reduzidos. Além disso, o aumento da durabilidade das estruturas de concreto confeccionadas com a adição de escória de alto forno, diminuem os custos de manutenção dessas obras (BIJEN, 1996).

### 2.3 - RESÍDUOS DA INDÚSTRIA DE MINERAÇÃO

O produto da indústria mineral brasileira situa entre as dez maiores do mundo, e, nos últimos anos, o saldo da balança de comércio exterior de bens minerais tem sido positivo, dados que sugerem que o Brasil deveria registrar bons resultados de desempenho ambiental no setor de mineração. Porém, uma única empresa respondia, em 2004, por cerca de 50% do valor da produção mineral (BRASIL MINERAL, 2005).

A seu lado, centenas de empresas familiares e de cooperativas de garimpeiros compõem outra face do universo da mineração brasileira. Ao lado de empresas capitalizadas, com acesso ao mercado global e capazes de aplicar as melhores tecnologias disponíveis, trabalham milhares de pessoas empregando tecnologias rudimentares e se expondo a condições inseguras ou insalubres. São evidentemente muito diferentes os impactos ambientais de megaempreendimentos operados por corporações transnacionais daqueles causados, cumulativamente no tempo e no espaço, por uma grande quantidade de minas disseminadas no território ou concentradas em determinadas zona.

Tendo em vista proporcionar o melhor entendimento desse trabalho transcrevem-se, com adaptações, as definições de termos e ou conceitos de COSTA e SILVA (2020) conforme segue: (i) minério é o modo pelo qual um metal é encontrado na natureza incluindo suas impurezas; (ii) jazida refere-se a massa de substâncias minerais ou fósseis encontradas na superfície ou interior da Terra; (iii) mina é uma jazida na extensão concedida pelo governo; (iv) mineração é um termo que designa as atividades de extração, lavra e a purificação ou separação do minério; (v) metais ferrosos são substâncias que apresentam metal ferro como principal componente; (vi) metais não ferrosos, ao contrário dos ferrosos, não apresentam ferro na sua composição,

mas alumínio, zinco, chumbo etc. e das ligas latão (cobre com zinco), bronze (cobre com estanho). O rejeito de mineração é um termo definido por citado por FERNANDES e SANTOS (2008):

Como “todo o material resultante de processos químicos, e físicos, envolvidos na extração dos metais”. No que se refere ao conceito de lavra trata-se de um conjunto de operações para o aproveitamento econômico de uma jazida constituído da fase de extração do minério de seus locais de origem, geralmente por meio de operações de escala grande, média, ou pequena, realizadas na superfície, e ou no subsolo.

Quanto ao impacto ambiental o artigo 1º da Resolução CONAMA nº 1/1986 assim o descreve: [...] considera-se impacto ambiental qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que, direta ou indiretamente, afetam: I - a saúde, a segurança e o bem-estar da população; II - as atividades sociais e econômicas; III - a biota; IV - as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente; V - a qualidade dos recursos ambientais. (CONAMA, 2011) Já o termo recuperação de área degradada, pela mineração, é aqui utilizado de modo resumido para determinar “o conjunto de ações necessárias para que a área volte a estar apta, para algum uso produtivo, em condições de equilíbrio ambiental” (BRUM, 2000).

A mineração é considerada uma atividade de significativo impacto ambiental, portanto, normas legais que obrigam os mineradores a utilizar tecnologias mais limpas de produção e a recuperar as áreas degradadas, como a Constituição de 1988 e diversas resoluções do Conselho Nacional de Meio Ambiente (por exemplo, as resoluções CONAMA nº 001/1986 e nº 009/1990).

### **2.3.1 - Impactos ambientais causados pela indústria da mineração**

Na mineração, os impactos ambientais negativos podem ser diagnosticados desde seu planejamento, apesar de aumentarem sua potência à medida que as etapas mudam, porém é essencial que esses impactos sejam reconhecidos no início da implementação para que seja possível a mitigação da extensão desse impacto futuramente. Os impactos vêm desde a degradação da paisagem até efeitos danosos ao

equilíbrio do ecossistema como redução ou destruição de habitat, morte de espécimes de fauna e flora, chegando até a extinção (MECHI e SANCHES, 2010).

O CONAMA tem como conceito de impacto ambiental imposto em seu Artigo 1º da Resolução CONAMA-001:

Artigo 1º - Para efeito desta Resolução, considera-se impacto ambiental qualquer alteração das propriedades físicas, químicas e biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que, direta ou indiretamente, afetam:

- I - A saúde, a segurança e o bem-estar da população;
- II - As atividades sociais e econômicas;
- III - A biota;
- IV - As condições estéticas e sanitárias do meio ambiente;
- V - A qualidade dos recursos ambientais.

Alterações no equilíbrio ecológico devido a esse tipo de atividade começou a se tornar preocupação de alguns pesquisadores durante os anos 60, ganhou dimensão política a partir da década de 70. Atualmente não é possível implantar um projeto sem pensar no efeito dele sobre o meio ambiente (SILVA, 2007).

FERNANDES *et al.* (2014) deixa claro os impactos negativos que essa atividade gera:

A mineração altera de forma substancial o meio físico, provocando desmatamentos, erosão, contaminação dos corpos hídricos, aumento da dispersão de metais pesados, alterações da paisagem, do solo, além de comprometer a fauna e a flora. Afeta, também, o modo de viver e a qualidade de vida das populações estabelecidas na área minerada e em seu entorno.

MECHI e SANCHES (2010) fazem uma definição do que a atividade provoca de modo geral:

Praticamente toda atividade de mineração implica supressão de vegetação ou impedimento de sua regeneração. Em muitas situações, o solo superficial de maior fertilidade é também removido, e os solos remanescentes ficam expostos aos processos erosivos que podem acarretar em assoreamento dos corpos d'água do entorno. A qualidade das águas dos rios e reservatórios da mesma bacia, a jusante do empreendimento, pode ser prejudicada em razão da turbidez provocada pelos sedimentos finos em suspensão, assim como pela poluição causada por substâncias lixiviadas e carreadas

ou contidas nos efluentes das áreas de mineração, tais como óleos, graxa, metais pesados.

A indústria do aço no Brasil é uma das mais competitivas do mundo, sendo responsável por aproximadamente 18% do saldo comercial total do País, indicando o desenvolvimento econômico, social e ambiental do país, visto que o aço é matéria prima essencial em diferentes seguimentos (IAB). Paralelamente, a crescente produção do aço reflete no aumento de geração de resíduos e coprodutos, inevitáveis ao processo industrial. A crescente geração de escórias apresentam sérios problemas, de tal modo que quantidades significativas delas estão dispostas no meio ambiente ou estocadas; portanto, sua reciclagem pode ser uma alternativa para a fabricação de cimento, nivelamento de terrenos, base de estradas, concreto, argamassa, materiais agrônômicos e de pavimentação (ABM2008).

A escória de alto forno (EAF), por exemplo, comporta-se de forma semelhante aos calcários, podendo ser utilizada como corretivo para a acidez do solo e ainda elevar as quantidades de Ca e Mg, justificando sua utilização como fertilizante e como fonte de silício para as plantas. A EAF também apresenta efeitos positivos no aumento da produtividade de arroz e sua utilização permite a diminuição no consumo de inseticidas e fungicidas, pois, plantas bem nutridas têm sua resistência às pragas e doenças aumentada. (PUPATTO *et al.*, 2003)

#### 2.4 - CLASSIFICAÇÃO DOS AGREGADOS MIÚDOS RECICLADOS DE ACORDO COM A RESOLUÇÃO DO NBR 10004 /2004 E CONAMA N° 307

O processo de reciclagem de resíduos gerados pelas indústrias para uso como material alternativo não é novidade, e tem sido feito com efetivo sucesso em outros países. A indústria de construção civil é o ramo da atividade tecnológica que, pelo grande volume de recursos naturais consumidos, parece ser bastante indicado para absorver tais resíduos sólidos (COIMBRA *et al.*, 2004). Os bens minerais têm uma importância significativa para a sociedade, na qual nenhuma civilização pode prescindir do seu uso, principalmente, quando se pensa em qualidade de vida, uma vez que as necessidades básicas do ser humano são atendidas essencialmente por estes recursos (KUMMER *et al.*, 2007). As adições minerais incorporada ao cimento não é um processo recente, originalmente incorporando pozolanas naturais a mistura e algum tempo depois, cinzas industriais, com propriedades semelhantes as primeiras. As

pesquisas pioneiras com cinzas residuais datam de 1930 nos Estados Unidos (GARCIA *et al.*, 2006).

As políticas de controle de resíduos sólidos, a legislação brasileira prevê dois tipos de sistemas de controle que classificam os resíduos sólidos gerados pelas: a NBR 10004 -2004, que é definida pela associação brasileira de normas técnicas (ABNT) e a resolução do CONAMA 307, que é definida pelo conselho nacional de meio ambiente.

Os agregados, quanto a sua origem, podem ser classificados como:

- Agregados naturais – aqueles que se encontram depositados em jazidas nas condições de emprego imediato, como, por exemplo, as areias e os seixos obtidos dos leitos dos rios;
- Agregados artificiais – aqueles em que ocorrem alterações da maneira como se encontram depositados, sem que, no entanto, se verifique qualquer alteração da composição mineralógica das matérias-primas. São exemplos de agregados artificiais, a pedra britada e a argila expandida;
- Agregados industrializados – aqueles que passam a condição de agregado após intervenções que provocam a alteração da composição mineralógica das matérias-primas, como, por exemplo, a escória de alto forno.

A NBR 10004/2004, prevê que os resíduos sólidos gerados pela indústria da construção civil sejam divididos em dois grupos sendo que essa divisão se dá em relação ao potencial do resíduo sólido causar risco a saúde humana e ao meio ambiente:

- Resíduo perigoso (resíduo classe I) – apresentam características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade química, toxicidade ou patogenicidade;
- Resíduos não perigosos (resíduos classe II) – estes tipos de resíduos que não apresentam perigo ainda podem ser subdivididos em:
  - Resíduo não inerte (resíduo classe II – A) – São resíduos que tem alguns de seus constituintes solubilizados em água destilada ou deionizada a temperatura ambiente quando em contato dinâmico ou estático, essas concentrações são superiores aos padrões aceitos pelos padrões de potabilidade da água.
  - Resíduos inertes (classe II-B) – São considerados como qualquer resíduo que não tem seus constituintes solubilizados em água destilada ou deionizada a temperatura ambiente, quando os mesmos entram em contato dinâmico ou estático, não alterando o padrão de potabilidade dessa água.

A resolução estabelecida pelo CONAMA 307 tem como principal objetivo a gestão de resíduos oriundos da indústria da construção civil, e divide os resíduos sólidos em função de seu reuso e valorização de seu reaproveitamento direto, ou seja, através de um processo de reciclagem. Nesse contexto o resíduo sólido é dividido em 04 diferentes classes:

- Resíduo classe A: são resíduos passíveis de serem reutilizados ou reciclados na forma de agregados para fins estruturais, neste contexto engloba-se os entulhos de construção e materiais de terraplanagem;
- Resíduos da classe B: são resíduos passíveis de reciclagem que se destinam a outro tipo de destinação, dentre esses se destacam: plástico, vidro, gesso, papel restos de madeira e metais;
- Resíduos da classe C: são resíduos que atualmente não existem tecnologias desenvolvidas para o seu reuso, ou algum tipo de aplicação economicamente viável que viabilizem sua reciclagem;
- Resíduos classe D: Estes tipos de resíduos são considerados perigosos pois são oriundos de construção, que se destacam: solventes orgânicos de tintas, vernizes, tintas, óleos ou materiais contaminados com os mesmos (pinceis, rolos e EPI's), ou produtos que contenham amianto ou outros tipos de substâncias prejudiciais a saúde.
- Concretos e argamassas no estado endurecido, são considerados não perigosos e inertes pela NBR 10004 /2004 e pelo CONAMA 307 como resíduo de classe A.

#### **2.4.1 - Utilização agregado miúdo de resíduos industriais**

Os bens minerais têm uma importância significativa para a sociedade, na qual nenhuma civilização pode prescindir do seu uso, principalmente, quando se pensa em qualidade de vida, uma vez que as necessidades básicas do ser humano são atendidas essencialmente por estes recursos (KUMMER *et al.*, 2007). O processo de reciclagem de resíduos gerados pelas indústrias para uso como material alternativo não é novidade, e tem sido feito com efetivo sucesso em outros países. A indústria de construção civil é o ramo da atividade tecnológica que, pelo grande volume de recursos naturais consumidos, parece ser bastante indicado para absorver tais resíduos sólidos (COIMBRA *et al.*, 2004). As adições minerais incorporada ao cimento não é um

processo recente, originalmente incorporando pozolanas naturais a mistura e algum tempo depois, cinzas industriais, com propriedades semelhantes as primeiras. As pesquisas pioneiras com cinzas residuais datam de 1930 nos Estados Unidos (GARCIA *et al.*, 2006).

## 2.5 - ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO

### 2.5.1 - Conceitos e definições

A história da argamassa começa com a invenção do cimento por John Aspdin, em 1824 na Inglaterra. O método de fabricação consiste em cozinhar a argila e o calcário em forno giratório a aproximadamente 1450 °C; para a formação de silicatos de cálcio anidros. O produto deve ser então moído, junto com um terceiro componente, a gipsita, que tem a função principal de impedir que o cimento endureça instantaneamente com a água.

O revestimento de argamassa é definido, segundo a NBR 13529 (1995), como sendo “o cobrimento de uma superfície com uma ou mais camadas superpostas de argamassa, apto a receber acabamento decorativo ou constituir-se em acabamento final”, formando junto com a decoração, um sistema de revestimento, que deve ser compatível com a natureza da base, condições de exposição, acabamento final e desempenho, previstos em projetos.

A indústria da construção civil está entre uma das maiores consumidoras de matérias-primas naturais e geradoras de resíduos. Esse segmento é responsável pela produção de mais de 70 milhões de toneladas de Resíduos por ano (CONTRERAS *et al.*, 2016; PAZ e LAFAYETTE, 2016). Portanto, a indústria da construção civil pode ser considerada uma grande causadora de impacto ambiental. O sistema de revestimento de argamassa pode ser dividido em 2 grupos, quanto ao número de camadas:

- Emboço: É a camada de argamassa que tem como finalidade regularizar a superfície da base, permitindo assim a execução de outra camada, de reboco ou de acabamento decorativo, ou mesmo se constituindo como acabamento final, onde se caracteriza o revestimento de camada única ou reboco “paulista” como é conhecido popularmente nas obras.

- Reboco: É a camada de argamassa executada posteriormente ao emboço, apta a receber o acabamento decorativo ou constituir o acabamento final, no caso de acabamento em pintura.

Na norma NBR 13279 (ABNT, 1995) são definidos outros termos usuais envolvendo o revestimento executado à base de cimento e cal. Neste contexto encontram-se definições como:

- Adições: materiais inorgânicos naturais ou industriais finamente divididos, adicionados às argamassas para modificar as suas propriedades e cuja quantidade é levada em consideração na proporção.
- Argamassa de cal: argamassa preparada com cal como único aglomerante.
- Argamassa de cimento: argamassa preparada com cimento como único aglomerante.
- Revestimento: é o recobrimento de uma superfície lisa ou áspera comum a uma ou mais camadas sobrepostas de argamassa, em espessura normalmente uniforme, apta a receber um acabamento final.

Segundo SIQUEIRA (2011), uma das grandes preocupações do profissional de engenharia civil está relacionada com a vida útil das estruturas, algo que se liga diretamente à sua durabilidade. A facilidade ou dificuldade que os agentes agressivos aos materiais têm para entrar na argamassa ou em outros elementos do sistema construtivo é o que determina a durabilidade da estrutura.

Para JANTSCH (2015), por a argamassa ser um elemento que precisa dos processos de mistura de materiais e cura para que se torne um elemento rígido, ela varia de estado, de fresco para endurecido, adquirindo assim, novas exigências de desempenho. O fato da forma de produção e fornecimento ser diferente, não muda as propriedades e exigências requeridas para cada função que a argamassa pode assumir. Na Tabela 2.1 são apresentadas as características que de fato são exigidas na NBR 13281.

Tabela 2.1 - Propriedades das argamassas no estado fresco e endurecido.

| Estado Fresco                             | Estado Endurecido                  |
|---|------------------------------------|
| Massa Específica e teor de ar Incorporado | Aderência                          |
| Trabalhabilidade                          | Capacidade de absorver deformações |
| Retenção de água                          | Resistencia mecânica               |
| Aderência inicial                         | Resistência ao desgaste            |
| Retração na secagem                       | Durabilidade                       |

Fonte: COSTA, 2016.

MOURA (2007) afirma que a qualidade de um sistema de revestimento está diretamente ligada às características de salubridade, conforto, plasticidade, aderência no estado fresco e endurecido, ausência de fissuras, resistência à abrasão e durabilidade. Quando se refere à durabilidade deve ser analisada a conservação e a integridade do revestimento, além do custo com a manutenção.

### 2.5.2 - Propriedades das argamassas

A argamassa precisa de propriedades específicas para cumprir adequadamente suas funções tanto no estado fresco como no estado endurecido (LEGGERINI, 2001).

Entre as argamassas que poderiam fazer o uso de agregados reciclados há as argamassas estabilizadas. Essas argamassas apresentam período de utilização superior ao das argamassas convencionais ou industrializadas devido à utilização do aditivo estabilizador de hidratação. Além disso, são produzidas em centrais de concreto e fornecidas no estado fresco, prontas para uso (BAUER *et al.*, 2015; OLIVEIRA, 2017).

A utilização das argamassas estabilizadas pode trazer vantagens no processo de execução de revestimentos de argamassa devido à retirada das etapas de dosagem e de mistura no canteiro de obra, o que leva ao aumento da produtividade. Além disso, a produção da argamassa em centrais dosadoras de concreto possibilita maior controle do material e, conseqüentemente, melhor qualidade (BAUER *et al.*, 2015).

Comparando-se as propriedades das argamassas estabilizadas com as argamassas industrializadas e as produzidas em obras, TREVISOL JUNIOR (2015) verificou que a argamassa estabilizada manteve o nível de trabalhabilidade por um período maior, além

de menor absorção de água e menor retração e expansão se comparada às demais argamassas.

No Brasil considerando-se a normalização de classificação do tipo de revestimento e do tipo de argamassa tem-se a NBR 13530 (1995) “Especificação das condições exigíveis de recebimento dos revestimentos executados”, a NBR 13749 (1996) “Requisitos para as argamassas”, e a NBR 13281(1995): “Argamassa para assentamento e revestimentos de paredes e tetos - Requisitos”. Apesar de no Brasil a partir 1995, ano em que foi implantada a NBR 13281, ter havido um grande avanço no que tange a evolução normativa para argamassas industrializadas, ainda há muitas limitações. Houve na década de 90 muitas mudanças no mercado de argamassas industrializadas, em virtude do enfoque comercial sempre direcionado a aplicação do material e não ao desempenho. As argamassas foram consideradas de uso generalizado, sem levar em condição as diferentes condições de aplicação e uso (revestimento interno, externo, assentamento, de vedação e estrutural).

Apesar da maior manutenção da trabalhabilidade e demais benefícios das argamassas estabilizadas, BAUER *et al.* (2015) ressaltam a falta de referência normativa no Brasil para a especificação, o uso e o emprego dessas argamassas, o que resulta na falta de controle técnico e na limitação de uso. Assim, verifica-se que uma das alternativas para a destinação dos resíduos de construção civil e sua utilização como agregado reciclado em matrizes cimentícias. Entre as matrizes destacam-se as argamassas devido à possibilidade de substituição de agregado natural por agregados reciclados, como demonstrado por CARASEKET *et al.* (2018). Ao mesmo tempo, há crescentes estudos acerca das argamassas estabilizadas, visando à melhor compreensão desses materiais e de suas características.

As normas da ABNT trazem grande novidade na classificação das argamassas para assentamento e revestimento de paredes e tetos baseada nas suas características e propriedades. Estas são determinadas pelos métodos de ensaio de resistência à compressão, massa específica aparente no estado endurecido, massa específica no estado fresco cujos limites de valores e classificação se encontram nas Tabelas 2.2, 2.3 e 2.4.

Tabela 2.2 - Resistência à compressão em Mpa.

| Resistência à Compressão (MPa) - ABNT NBR 13279 |                                |
|---|--------------------------------|
| Classe  | Resistência à Compressão (Mpa) |
| P1  | <2,0                           |
| P2  | 1,5 a 3,0                      |
| P3  | 2,5 a 4,5                      |
| P4  | 4,0 a 6,5                      |
| P5  | 5,5 a 9,0                      |
| P6  | >8,0                           |

Tabela 2.3 - Massa Especifica no estado endurecido.

| Massa Especifica no estado endurecido (kg/m <sup>3</sup> ) - ABNT NBR 13280 |  |
|---|--|
| Classe  | Dens. de massa no estado endurecido (kg/m <sup>3</sup> ) |
| M1  | <1200  |
| M2  | 1000 a 1400  |
| M3  | 1200 a 1600  |
| M4  | 1400 a 1800  |
| M5  | 1600 a 2000  |
| M6  | >1800  |

Tabela 2.4 - Massa Especifica no estado fresco em kg/m<sup>3</sup>.

| Massa Especifica no estado fresco (kg/m <sup>3</sup> ) - ABNT NBR 13278 |  |
|---|--|
| Classe  | Dens. de massa no estado fresco (kg/m <sup>3</sup> ) |
| D1  | <1400  |
| D2  | 1200 a 1600  |
| D3  | 1400 a 1800  |
| D4  | 1600 a 2000  |
| D5  | 1800 a 2200  |
| D6  | >2000  |

### 2.5.3 - Propriedades aglomerantes

As propriedades aglomerantes da argamassa estão relacionadas com o desenvolvimento das propriedades ligantes dos aglomerantes utilizados nas argamassas. Autores como o METHA e MONTEIRO (1994) e NEVILLE (1997) descrevem como se dá o processo de hidratação dos compostos cimentícios e os produtos gerados a partir destes. Numa matriz cimentícia os principais produtos de hidratação são os silicatos de cálcio hidratados (C-S-H), hidróxidos de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) e aluminatos. Estes produtos possuem características de pega e endurecimento da pasta cimentícia, que vão gerar as propriedades físico-mecânicas das argamassas. As propriedades mecânicas das argamassas podem ser influenciadas negativamente pela presença de vazios na pasta, que está relacionado com a quantidade de água presente na mistura e às condições de temperatura e umidade na qual a argamassa está exposta. Além disso, existe zona de transição entre o agregado e a pasta. Esta região é bastante porosa devido à elevada relação água/cimento na região que é gerada pela presença de uma película de água ao redor do agregado. Pode-se citar como propriedades aglomerantes das argamassas a resistência à compressão, resistência de aderência à tração, resistência de aderência superficial e módulo de elasticidade.

A principal fonte de resistência dos produtos de hidratação é proveniente das forças de atração de Van der Waals. Essa força de natureza física é responsável pela adesão entre duas superfícies sólidas. Cada composto hidratado possui uma força de atração diferente e o conjunto destas promove todo o mecanismo de adesão da argamassa. As propriedades mecânicas das argamassas podem ser influenciadas negativamente pela presença de vazios na pasta, que está relacionado com a quantidade de água presente na mistura e às condições de temperatura e umidade na qual a argamassa está exposta. Além disso, existe zona de transição entre o agregado e a pasta.

Esta região é bastante porosa devido à elevada relação água/cimento na região que é gerada pela presença de uma película de água ao redor do agregado. Pode-se citar como propriedades aglomerantes das argamassas a resistência à compressão, a resistência de aderência à tração, resistência de aderência superficial e módulo de elasticidade.

## 2.6 - AGREGADOS MIÚDO PARA ARGAMASSAS

Na elaboração das argamassas a escolha dos agregados é de fundamental importância, pois no estado fresco eles desempenham um papel fundamental na determinação da trabalhabilidade das misturas das argamassas e concreto e do custo, quando no estado endurecido eles podem influenciar na durabilidade do material, na estabilidade dimensional e na resistência mecânica. Nesse sentido é de extrema importância se conhecer macroscopicamente sua forma e sua textura superficial, buscando melhorar e aumentar a junção entre a pasta de cimento, melhorando também a resistência mecânica de acordo com o seu uso (CASTRO, 2007). Segundo METHTA e MONTEIRO (2008), fatores como a composição mineralógica dos agregados afeta a resistência, a compressão, dureza, módulo de elasticidade e durabilidade que por sua vez, interferem nas propriedades dos concretos e argamassas quando no estado endurecido.

No processo de formulação das massas cimentícias (concretos e argamassas), deve-se empregar uma granulometria adequada e constante. Pelo contrário pode resultar na variação da trabalhabilidade que ao serem corrigidas, podem variar a quantidade inicial de água na mistura, podendo ocasionar diferentes pontos de resistência nos corpos de prova (NEVILLE, 1995). De acordo com SILVA (2001), o fator de forma das partículas dos agregados influencia de forma direta nas pastas de cimento, mais especificadamente no estado fresco do que no estado endurecido. Esse fato é explicado devido ao entrelaçamento mecânico, a ligação da matriz pasta de cimento e agregado.

No caso do agregado miúdo utilizado nas argamassas, sua forma e textura têm efeito significativo sobre a demanda de água de uma mistura; enquanto no concreto a lamelaridade e a forma do agregado graúdo geralmente tem um efeito que é observado na trabalhabilidade do concreto (NEVILLE, 1995). Para CASTRO (2014) a quantidade e o tipo de agregado desempenham um papel importante na trabalhabilidade do concreto no estado fresco, em particular para a produção de concreto de alto desempenho, com baixa relação água/aglomerante. Os agregados possuem um efeito principal na reologia do concreto, aumentando consideravelmente tanto a viscosidade plástica quanto a tensão de escoamento.

Historicamente a utilização de agregados dispersos na massa de cimento aconteceu por razões econômicas, já que estes empregavam um menor custo que o cimento. No entanto, a sua adição acrescentou outras vantagens, nomeadamente

técnicas, pois em geral o agregado é mais resistente que a matriz de cimento e confere ao conjunto maior estabilidade e durabilidade (NEVILLE, 1995). Numa monomassa, a areia tem como principal função reduzir a retração e melhorar a resistência mecânica (MASCARENHAS, 2003).

## 2.7 - CIMENTO PORTLAND

### 2.7.1 - Histórico

O Cimento portland é um dos materiais mais utilizados no mundo. Uma das características do cimento é que ele endurece após entrar em contato com a água e depois de endurecido, mesmo que entre em contato com água novamente não se dissolve mais. Quando misturado com materiais como pedra britada, areia, água, obtêm-se concretos para utilização em construções de barragens, edifícios etc. Cada concreto possui um traço, que vai depender da quantidade e da qualidade dos materiais empregados. Do ponto de vista químico, o material mais ativo é o cimento, sendo o principal elemento responsável pela composição do concreto e da utilização dos materiais empregados. É necessário conhecer bem as propriedades do cimento para poder utilizá-lo de maneira adequada. Desta forma, será possível extrair maior potencial do cimento utilizando a quantidade correta. O cimento portland Figura 2.1 foi patenteado por seu criador Joseph Aspdin, em 1824. Recebeu este nome pois tinha aspecto, cor e dureza iguais aos das pedras da ilha portland ao sul da Inglaterra. No Brasil, havia um único tipo de cimento denominado cimento comum, mas com o avanço dos conhecimentos sobre o tema, outros tipos de cimento surgiram dando origem aos cimentos compostos. Os diversos tipos de cimento portland podem ser aplicados de maneira geral, sendo que alguns possuem propriedades e características para aplicações específicas permitindo maior durabilidade e resistência (ABCP, 2002).



Figura 2.1 - Cimento portland.

### **2.7.2 - Composição do cimento portland (matérias-primas)**

O principal componente do cimento portland é o clínquer. Além do clínquer, os cimentos possuem adições que variam de um tipo de cimento para outro, caracterizando os diferentes tipos de cimento. O clínquer é composto basicamente por calcário e argila. A pedra calcária é britada, moída e, em seguida, adiciona-se argila moída na proporção adequada. A mistura é levada ao forno rotativo e chega a atingir 1450°C. Alta temperatura faz a mistura reagir, dando origem ao clínquer, que é resfriado e moído para ser transformado em um pó fino.

Quando se adiciona água ao clínquer, o material reage quimicamente e se transforma numa pasta, depois endurece adquirindo resistência e também durabilidade. Esta é a principal característica do clínquer. Adições para obter diferentes tipos de cimento, são acrescentadas adições ao clínquer no momento da moagem, estas adições são escórias de alto forno, materiais pozolânicos, materiais carbonáticos e gesso.

Durante a produção de ferro gusa as indústrias siderúrgicas liberam escórias de alto-forno, que são utilizadas como adição ao cimento. No passado, estas escórias eram desprezadas e consideradas sem utilidade, porém após

estudos químicos, descobriu-se que este material tem propriedades semelhantes a do clínquer reagindo quimicamente como material hidráulico ligante. A adição de escória de alto forno no processo de moagem do clínquer juntamente com o gesso, permite melhoria nas características de resistência e durabilidade do concreto.

Outra forma de adição aos tipos de cimento são os materiais pozolânicos, que são obtidos através da queima de carvão mineral em usinas termelétricas, queima de argilas em temperaturas elevadas (550°C a 900°C), rochas vulcânicas e materiais fósseis encontrados na natureza. Assim como a escória de alto forno, os materiais pozolânicos possuem a característica de ligante hidráulico, porém, de forma diferente: estes necessitam da adição de outros materiais além da água, como o clínquer, que libera hidróxido de cálcio (cal) reagindo com a pozolana, guardadas as devidas proporções de cada material. Os cimentos obtidos com adição de pozolanas possuem maior impermeabilidade.

Os tipos de cimento portland mais utilizados são:

- Cimento portland comum;
- Cimento portland composto;
- Cimento portland de alto-forno;
- Cimento portland pozolânico.

Os tipos de cimento abaixo são utilizados em menor escala, destinados a aplicações específicas:

- Cimento portland de alta resistência inicial;
- Cimento portland resistente aos sulfatos;
- Cimento portland branco;
- Cimento portland de baixo calor de hidratação;
- Cimento para poços petrolíferos.

Os diferentes tipos de cimento portland possuem uma composição diferente para cada aplicação, conforme demonstra Tabela 2.5:

Tabela 2.5 - Composição dos cimentos portland.

| Cimento<br>portland<br>(ABNT) | Tipo                           | Clinker+<br>Gesso (%) | Escoria<br>Siderúrgica (%) | Material<br>Pozolânico (%) | Calcário (%) |
|-------------------------------|--------------------------------|-----------------------|----------------------------|----------------------------|--------------|
| CPI                           | Comum                          | 100                   | -                          | -                          | -            |
| CP II- S                      | Comum                          | 95-99                 | 1-5                        | 1-5                        | 1-5          |
| CP II- E                      | Composto                       | 56-94                 | 6-34                       | -                          | 0-10         |
| CP II- Z                      | Composto                       | 76-94                 | -                          | 6-14                       | 0-10         |
| CP II- F                      | Composto                       | 90-94                 | -                          | -                          | 6-10         |
| CP III                        | Alto-forno                     | 25-65                 | 35-70                      | -                          | 0-5          |
| CP IV                         | Pozolânico                     | 45-85                 | -                          | 15-50                      | 0-5          |
| CPV - ARI                     | Alta<br>Resistencia<br>inicial | 95-100                | -                          | -                          | 0-5          |

### 2.7.3 - Cimento portland com escória

Eugene Landgen, na França, em meados de 1862, foi o primeiro indivíduo a realizar os primeiros ensaios da granulação das escórias (vitrificadas), onde conseguiu demonstrar que a partir destas escórias básicas, era possível obter um material que, mesmo sem a mesma qualidade do cimento portland, quando misturadas e moídas junto à cal hidráulica, ultrapassava os sistemas que até então usavam como ligante apenas cal (IPT, 1992). Na maioria dos casos é comum classificar a escória como uma adição ao cimento, embora algumas vezes as proporções da mistura possa dizer que o cimento é quem é a adição à escória. A escória provém da junção de calcário, sendo este usado como fundente, das cinzas do carvão vegetal ou do coque e dos minerais da canga de minério de ferro.

Existe também outros materiais que podem ser utilizados em segundo plano como sulfetos de cálcio e manganês. As propriedades físicas das escórias e também sua composição química, independente do seu uso, seja para produzir agregados artificiais utilizados na construção civil, ou para a comunidade cimenteira, dependem de vários fatores como:

- A eficácia da operação dos altos fornos;
- Os sistemas de resfriamento;
- Os aditivos minerais, em especial o calcário;
- A composição dos minerais metálicos que são utilizados; e
- O seu modelo de estocagem/produção “in natura” e produção/estocagem “após beneficiamento”.

O alto forno tem em sua principal utilização a remoção do oxigênio do minério de ferro, fazendo este se transformar em ferro metálico e assim separá-lo das partes não metálicas (a escória). O ferro é separado a partir da reação do óxido de ferro com o monóxido de carbono proveniente da combustão do carvão vegetal ou do carvão mineral (coque). Aproximadamente 1500°C a parte metálica é então separada da não metálica pela fusão, onde então é formada a escória, que agrupa todas as impurezas indesejáveis. Depois de ser recolhida do forno, a escória pode apresentar quatro ou mais tipos de materiais, que definirão suas aplicações. A composição da escória de alto-forno contém os óxidos iguais aos que formam o cimento, contudo, suas proporções não são iguais (COSTA, 2001). Na primeira semana de hidratação já produz boa resistência.

A vantagem da utilização da escória de alto-forno na produção do concreto consiste principalmente na melhor trabalhabilidade, consequência da melhoria da dispersão das partículas cimentícias dando maior mobilidade e coesão à mistura. Por possuir uma microestrutura mais densa, a durabilidade dos concretos com escória tem uma redução na permeabilidade e na porosidade e uma resistência ascendente com o passar da idade (NEVILLE, 1997).

A mistura da escória granulada moída com o clínquer portland é uma das formas mais antigas de reciclagem da escória. Atualmente a reciclagem na produção de cimento consome boa parte das escórias geradas no Brasil, mas ainda existem sobras significativas e enormes pilhas de estoque. A reciclagem da escória de alto forno na produção de cimento é uma aplicação que teve início no Brasil no início da década de 50 (JOHN, 1995). Ela apresenta várias vantagens mostrando que a ativação de escória com silicato de sódio permite a produção de cimentos de diferentes características, como resistência final Figura 2.2, velocidade de crescimento da resistência, tempo de pega e trabalhabilidade, pela simples manipulação da proporção  $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ , sem a alteração do fator água/cimento.

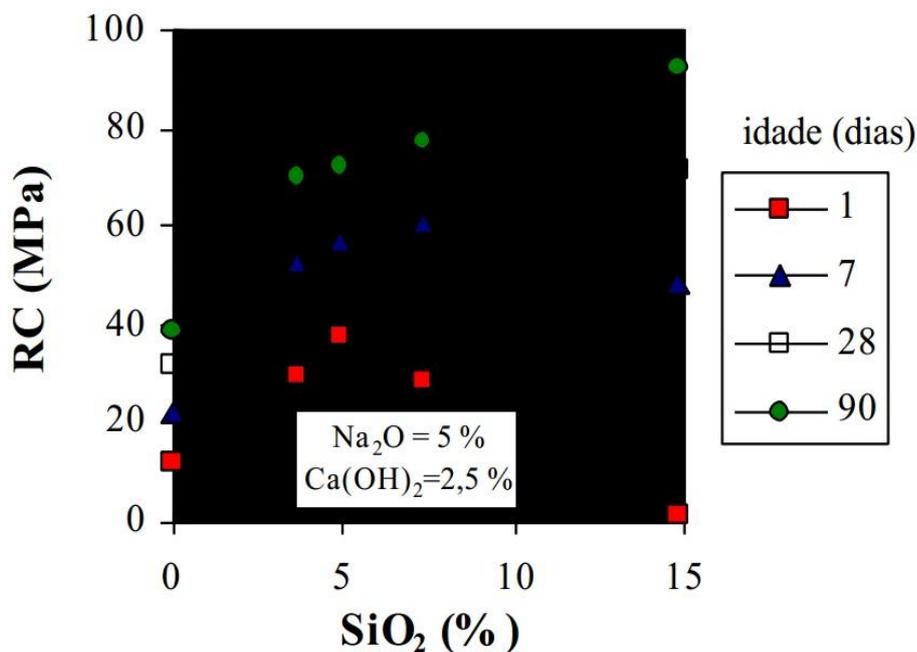


Figura 2.2 - Influência do teor de SiO<sub>2</sub> na resistência mecânica de cimentos de escória ativados com silicatos de sódio com relação água/cimento = 0,48.

Como a escória de alto forno é menos rica em CaO que o clínquer Portland é possível a produção de cimentos sem clínquer com baixa alcalinidade. Esta alternativa tem sido desenvolvida no Brasil pela equipe da Escola Politécnica. Já foi desenvolvido um cimento compatível com as fibras vegetais (AGOPYAN e JOHN, 1992; CINCOTTO e JOHN, 1989) e está em desenvolvimento um cimento especial para ser reforçado com fibras de vidro tipo E, sensíveis aos álcalis do cimento tradicional (OLIVEIRA, 2000).

A produção do cimento portland contendo escória apresenta também significativos benefícios de engenharia: (a) redução do calor de hidratação, importante em grandes peças de concreto, como barragens; (b) controle da reação de álcali-agregado, que leva a destruição de estruturas expostas à umidade; (c) melhoria da resistência contra a penetração de cloretos. Um fator limitante.

## 2.8 - ESCÓRIADE ALTO FORNO

### 2.8.1 - Definições

A escória de alto forno é um produto gerado na fabricação do ferro gusa, sua formação ocorre pela combinação química das impurezas do minério de ferro com

calcário e dolomita e as cinzas de carvão mineral (GRUEN, 1921), durante a produção do ferro gusa a EAF flutua no topo do ferro fundido, localizado na parte inferior do forno, dessa forma, protegendo o mesmo de se reoxidar por meio do jato de ar quente que funde através do forno (FLEISSNER, 1912). Durante o despejo da escória é feito o resfriamento da mesma. É nesse processo de resfriamento que é gerado os diferentes tipos de escória (ZEGHICHI, 2006).

Antigamente, as escórias de alto-forno eram consideradas como um material sem maior utilidade, até ser descoberto que elas também tinham a propriedade de ligante hidráulico muito resistente, ou seja, que reagem em presença de água, desenvolvendo características aglomerantes de forma muito semelhante à do clínquer. Essa descoberta tornou possível adicionar a escória de alto-forno à moagem do clínquer com gesso, guardadas certas proporções, e obter como resultado um tipo de cimento que, além de atender plenamente aos usos mais comuns, apresenta melhoria de algumas propriedades, como maior durabilidade e maior resistência final (ABCP, 2002).

A denominação de “Resíduo” que se dá à escória e a outras adições deve ser considerada circunstancial, pois este termo refere-se a um material sem destino, sendo que a partir do momento em que esse apresente uma aplicação deve ser qualificado como um “subproduto”. (BARBOSA, 2004). A EAF é formada pela mistura entre a ganga do minério de ferro com as cinzas do coque ou carvão vegetal e do calcário, utilizado como fundente no processo de fabricação do ferro-gusa. (VELTENET 2006).

A formação da escória de alto-forno a carvão vegetal é gerada quando da eliminação de impurezas, ou “gangas”, inerentes aos metais em seu estado natural, provenientes da adição de coque ou carvão vegetal, como combustível e um fundente que, em geral é o calcário, originando um material constituído fundamentalmente por sílico aluminatos de cálcio e, secundariamente, por sulfetos de cálcio e manganês, além de óxidos de ferro e manganês (BATTAGIN *et al.*, 2002). Com o uso de fundentes (CaO, MgO, CaF<sub>2</sub>) e em alguns casos, um fundente ácido SiO<sub>2</sub>) é possível reduzir o ponto de fusão da ganga e, assim, obter, por meio de reações químicas, a uma temperatura entre 1350<sup>0</sup> C e 1500<sup>0</sup>C, a escória líquida, facilmente separada do metal em função da sua fusibilidade, atividade química, poder de dissolução e baixa densidade (DAL MOLIN *et.al.*, SILVA, 2005). A escória de alto-forno é gerada a partir da fusão das impurezas contidas no minério de ferro (como silício, enxofre e fósforo), juntamente com a adição de fundentes (calcário e dolomita) e as cinzas do coque ou carvão vegetal. São gerados por volta de 200 a 400kg de escória por tonelada de gusa para Alto fornos à

coque e de 150 a 300kg por tonelada de gusa para Alto fornos movidos a carvão vegetal (JACOMINO *et al.*, 2002).

### 2.8.2 - Composição química

A escória de alto-forno é um resíduo siderúrgico industrial constituído, basicamente, de aluminossilicatos cálcicos, como resultado da combinação da ganga do minério de ferro com as cinzas do coque e do calcário utilizado como fundente no processo siderúrgico da fabricação do ferro fundido (“ferro-gusa”).

Sua composição química é majoritariamente Ca, Si, Al e Mg, bem como uma pequena quantidade de Fe, Ti e Mn.3-5.O tamanho de suas partículas e estrutura variam em função da velocidade de resfriamento da EAF na água ou no ar. Ao ser resfriada bruscamente, a EAF adquire estrutura vítrea e forma granular, apresentando propriedades hidráulicas latentes; mas se o processo empregado for o resfriamento lento, a escória cristaliza, formando um produto sem atividade hidráulica, constituído por silicatos e aluminossilicatos cálcicos. Nas escórias básicas ( $\text{CaO/SiO}_2 > 1$ ) há predominância de melilitas (akermanita e gehlenita) e merwinita, enquanto que nas ácidas ( $\text{CaO/SiO}_2 < 1$ ) ocorre principalmente wollastonita e anortita. (MENDES, 1999).

As características referentes a composição química e o processo de resfriamento da escória de alto-forno são fatores determinantes na sua capacidade aglomerante. Os quais contém Tabela 2.6 elevados teores de sílica ( $\text{SiO}_2$ ), óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ), óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), óxido de manganês ( $\text{MgO}$ ) e óxido de ferro ( $\text{FeO}$ ).

Tabela 2.6 - Composição química da escória de alto-forno granulada moída.

| Característica Química  | Resultados (%) |
|-------------------------|----------------|
| $\text{SiO}_2$          | 34,3           |
| $\text{Al}_2\text{O}_3$ | 11,9           |
| $\text{CaO}$            | 42,0           |
| $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | 0,4            |
| $\text{FeO}$            | 0,2            |
| $\text{MgO}$            | 3,2            |
| $\text{K}_2\text{O}$    | 0,7            |
| $\text{Na}_2\text{O}$   | 0,1            |

|                                |      |
|--------------------------------|------|
| Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,9  |
| SO <sub>3</sub>                | 0,03 |
| S                              | 0,06 |

Fonte: VELTEN *et al.*, 2006.

A concentração de cada um destes óxidos varia em decorrência da constituição química da matéria prima utilizada na redução, além do tipo de refratário usado na parede do forno. De uma maneira geral, as escórias oriundas de altos-fornos a coque são conhecidas como básicas, enquanto as escórias de altos-fornos a carvão vegetal como ácidas. Ao sair do alto-forno, a escória se encontra no estado líquido, passando em sequência por um processo de solidificação.

Existem várias formas de resfriamento, e cada uma confere à escória características diferentes, acarretando, portanto, empregabilidades distintas. Os processos mais comuns são o resfriamento ao ar, obtendo-se uma escória cristalina, e o processo de granulação, na qual a escória é resfriada rapidamente tornando-se amorfa. A escória granulada possui maior possibilidade de reaproveitamento quando comparada aos demais tipos de escória, devido à sua hidraulicidade, ou seja, a característica de endurecer ao se acrescentar água. A escória de alto-forno já é considerada hoje um subproduto da siderurgia, devido às suas várias aplicações, principalmente para a indústria da construção civil. Mas apesar das possibilidades de reaproveitamento, uma quantidade considerável deste material ainda é estocada, daí a necessidade de se buscar aplicações alternativas. A seguir são citadas as principais formas de reaproveitamento deste resíduo.

A escória, quando submetida a condições de resfriamento brusco na saída do alto-forno (processo chamado de granulação da escória), apresenta propriedades hidráulicas latentes (escória vítrea); mas, se o processo empregado for o contrário (resfriamento lento), a escória se cristaliza, formando-se um produto sem atividade hidráulica.

Assim, pode-se associar a reatividade da escória de alto-forno à sua forma de obtenção no estado vítreo todavia, deve-se ressaltar que essa condição apenas não é suficiente para o seu emprego como aglomerante, pois é necessário que a escória seja solúvel, isto é, passível de ataque pela água, para que os elementos formadores dos compostos hidráulicos sejam liberados. Essa solubilidade é favorecida pelo teor de

óxido de cálcio presente na escória. Dessa forma, a reação é lenta, mas, em meio fortemente alcalino ou através da ação de sulfatos ou de ambos, torna-se acelerada, sendo a velocidade de reação favorecida pela finura da escória (CINCOTTO *et al.*, 1992).

VELTEN, *et al.*, 2006. A resistência mecânica de misturas solo-escória de alto forno granulada moída e ativada com cal hidratada, para aplicações como camada de pavimentos de estradas florestais de textura areno-silto argilosa. A escória indicaram ganhos significativos de resistência mecânica das misturas com relação ao solo, observando-se aumentos expressivos na resistência mecânica, com aumentos nos teores de escória, cal e período de cura.

### 2.8.3 - Minério de ferro

O processo de produção do ferro-gusa é caracterizado por um conjunto de etapas que envolvem a recepção, manuseio, estocagem, acondicionamento físico, dosagem e misturas de matérias-primas como: minério de ferro, carvão ou coque, calcário, silicatos etc. O minério de ferro é a principal matéria-prima do alto-forno, pois é dele que se extrai o ferro. Os minerais que contêm ferro em quantidade apreciável são os óxidos, carbonatos, sulfetos e silicatos. Os mais importantes para a indústria siderúrgica são os óxidos:

- a) Magnetita (óxido ferroso-férrico)  $\rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4$  (Contém 72,4% de Fe).
- b) Hematita (óxido férrico)  $\rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3$  (Contém 69,9% de Fe).
- c) Limonita (óxido hidratado de ferro)  $\rightarrow 2\text{FeO} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  (Contém 48,3% Fe).

A obtenção do ferro, Figura 2.3 a partir de seus óxidos ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) é um processo antigo, que consiste essencialmente na redução dos óxidos do minério, mediante o emprego do carbono e um sopro de ar.

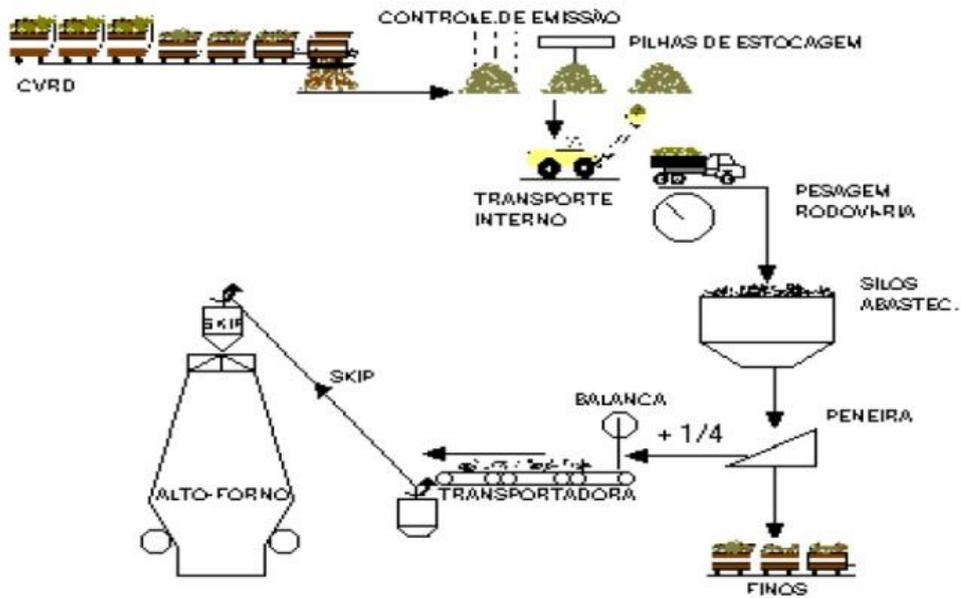


Figura 2.3 - Fluxograma do minério de ferro.  
 Fonte: SOUSA (2010).

Na obtenção do ferro a partir de seus óxidos ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), o alto-forno, Figura 2.4 instalado nas usinas siderúrgicas constitui-se do principal equipamento utilizado para a metalurgia do mesmo, constituem-se do principal equipamento utilizado para a metalurgia do ferro. Trata-se de uma estrutura cilíndrica, de grande altura, sendo constituído pelas seguintes partes:

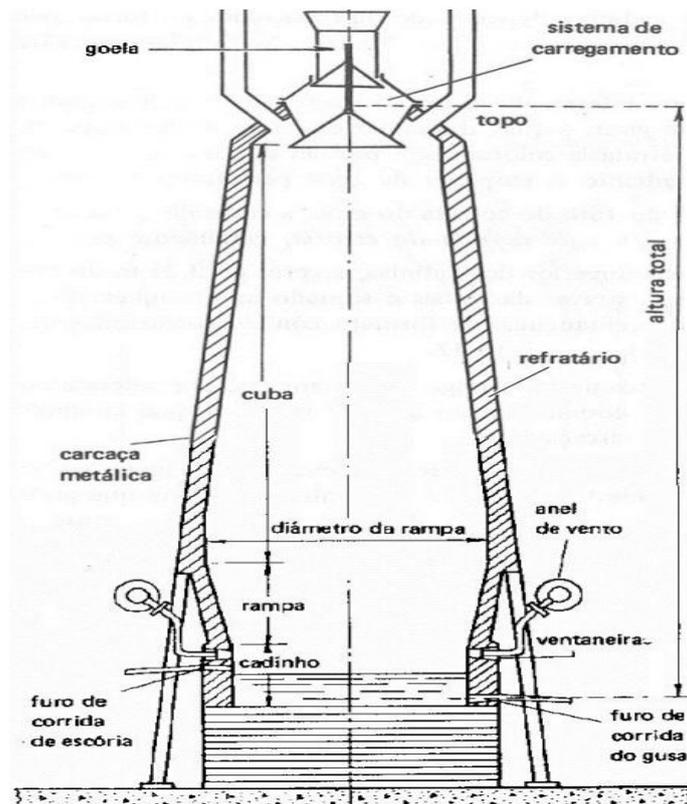


Figura 2.4 - Seção transversal de um alto-forno.  
 Fonte: CHIAVERINI (1986).

- a) Cadinho: região do forno desde a sola até o eixo das ventaneiras, em formato cilíndrico corresponde à parte do alto-forno onde se acumulam o metal fundido e a escória, resultantes das reações que ocorrem em seu interior.
- b) Rampa: parte cônica alargando-se para cima, desde o eixo das ventaneiras até o começo do ventre; corresponde à zona, de certo modo, mais quente: aí a espessura do refratário é menor que a do cadinho, exigindo, em consequência, um resfriamento externo mediante o emprego de placas metálicas por onde circula a água.
- c) Cuba: possui forma tronco-cônica, tem a seção menor voltada para cima, até a parte superior cilíndrica. Sua altura, a partir da rampa, pode superar 25m. É constituída de revestimento de tijolos refratários de grande espessura, devido ao desgaste, sendo está maior no inferior e vai diminuindo até chegar ao topo. Os tamanhos das partes e os ângulos de inclinação da rampa e da cuba têm uma variação muito grande em função de diversos projetos, puramente empíricos.
- d) Goela: parte superior cilíndrica.

- e) Topo: parte superior do forno onde se localizam os dispositivos de carregamento e de saída de gases.
- f) Sistema de carregamento: é constituído de uma tremonha (todo e qualquer reservatório com capacidade de dispensar o seu conteúdo de forma regulada) de recebimento de carga, ligada ao silo ou tremonha superior rotativa.
- g) Ventaneiras: possui formato cônico, feita de cobre eletrolítico e é refrigerada a água recirculada, ajustando-se firmemente no bocal do anel suporte avançando alguns centímetros no interior do forno. Sua quantidade depende do tamanho do forno, através das ventaneiras, o ar pré-aquecido é soprado no interior do forno. O volume total dos altos-fornos a carvão vegetal pode variar entre 33 m<sup>3</sup> até 250 m<sup>3</sup>. Possuem uma chaparia de aço externa e, internamente, um revestimento. Para a maior durabilidade desse revestimento é usado um sistema de refrigeração que consiste em chuveiros externos, no qual um filme contínuo de água é gerado por chuveiros dispostos na parte superior das chapas do cadinho e da rampa.

Antes de ser enforado o minério de ferro passa pelo processo do beneficiamento, que compreende uma série de operações cujo objetivo é tornar o minério mais adequado para a utilização nos altos-fornos. Estas operações são britamento, peneiramento, mistura, moagem, concentração, classificação e aglomeração principal).

Os principais parâmetros de controle são: granulometria, composição química, redutibilidade, índice de degradação sobre redução, morfologia e índice de crepitação. Em algumas usinas este minério utiliza os “fumos” do glendons (tipo de regenerador de calor), que restos da queima dos Gases de Alto-Forno (GAF) para a secagem do minério, diminuindo assim consideravelmente a umidade do mesmo. Assim como o carvão vegetal, o tamanho dos silos de abastecimento do minério varia muito de acordo com a produção do alto-forno e com a estratégia de estocagem da empresa (OLIVEIRA, 2010).

#### **2.8.4 - Reciclagem de escória de alto forno no Brasil**

Em siderúrgicas que operam altos fornos a carvão de coque são geradas aproximadamente 300 toneladas de escória por tonelada de ferro gusa. Altos fornos que utilizam como combustível carvão vegetal a geração de escória é inferior a este valor

(JOHN, 1995). No Brasil, que constitui o nono maior produtor mundial de aço do mundo, com uma produção de 32,5 milhões de toneladas de aço em 2019, Figura 2.5 foram gerados por volta de 19 milhões de toneladas de resíduos. Logo o gerenciamento dos resíduos siderúrgicos escória e lama de alto-forno, gerados durante o processo de redução do minério de ferro, constitui importante contribuição ambiental em função dos volumes gerados. Assim, estes dois resíduos são tratados a seguir, buscando apontar as possíveis tecnologias aplicáveis ao seu gerenciamento ambiental, tanto em nível nacional quanto internacional, na tentativa de contribuir com o aumento da sustentabilidade deste setor industrial.

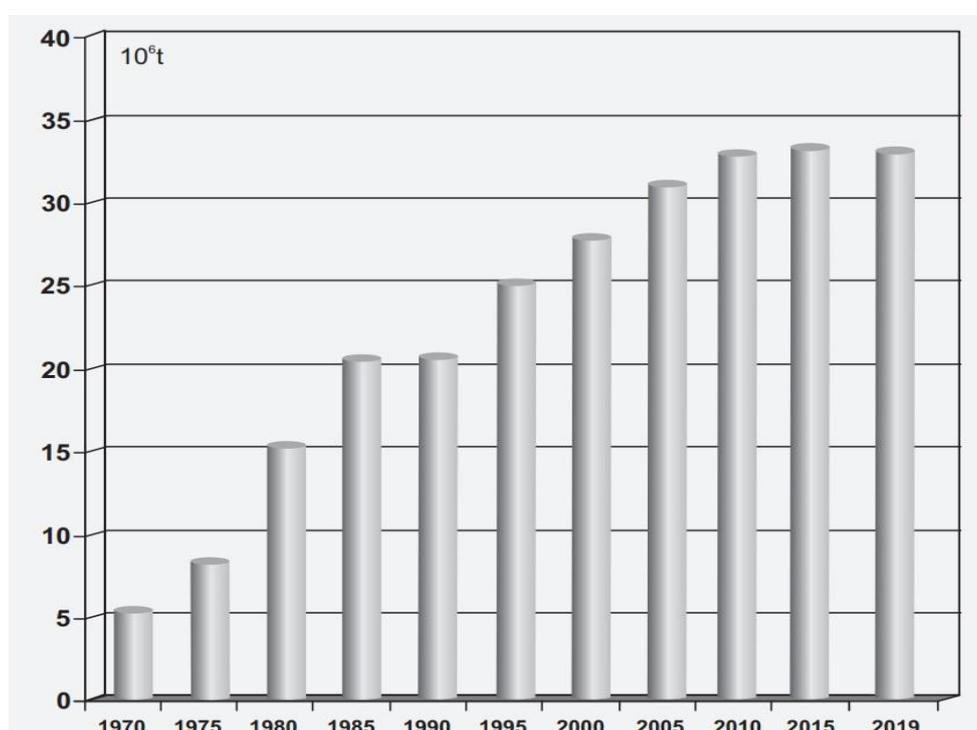


Figura 2.5 - Produção brasileira de aço bruto.

A Tabela 2.7 apresenta as composições químicas típicas das escórias produzidas pelos diferentes processos. Como pode ser visto os principais componentes são os mesmos encontrados no cimento Portland. As escórias de alto forno podem ser classificadas de acordo com a relação  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  em ácidas ( $<1$ ), normalmente produzidas em processos a carvão vegetal, ou básicas ( $>1$ ) de produtos.

Tabela 2.7 - Composição das escórias de alto-forno no Brasil, comparativamente ao cimento portland comum.

|                                | <b>Escória Básica</b> | <b>Escória Ácida</b> | <b>Cimento Portland</b> |
|--------------------------------|-----------------------|----------------------|-------------------------|
| CaO                            | 40-45                 | 24-39                | 66                      |
| SiO <sub>2</sub>               | 30-35                 | 38-55                | 22                      |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 11-18                 | 8-19                 | 5                       |
| MgO                            | 2,5-9                 | 1,5-9                | -                       |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0-2                   | 0,4-2,5              | 3                       |
| FeO                            | 0-2                   | 0,2-1,5              | -                       |
| S                              | 0,5-1,5               | 0,03-0,2             | -                       |
| CaO/SiO <sub>2</sub>           | 1,31                  | 0,68                 | 3                       |
| média                          |                       |                      |                         |

Fonte: (JOHN, 1995).

A escória sai do alto forno na forma de um líquido viscoso com temperatura entre 1350°C e 1500°C contendo 1700 kJ/kg de energia térmica. Se resfriada lentamente, esta energia vai ser perdida para a atmosfera e liberada através da cristalização do líquido, formando cristais diversos, como mervinita, melilita, silicato dicálcico, diopsídio (nas escórias ácidas), entre outros. Na condição cristalina a escória não possui capacidade aglomerante, sendo utilizada como agregado para concreto, pavimentação e lastro de vias férreas. Se resfriada bruscamente, de forma que não haja tempo hábil para que o arranjo cristalino ocorra, produz-se um material predominantemente vítreo. A escória vítrea apresenta nível de energia mais elevado do que a cristalina, porque retém a energia de cristalização de aproximadamente 200 kJ/kg, portanto termodinamicamente menos estável que as cristalinas (JOHN, 1995).

Existem duas tecnologias básicas para produção de escórias vítreas. A primeira, prática normal nas grandes siderúrgicas brasileiras, é conhecida como granulação. A granulação da escória de alto-forno foi originalmente introduzida por volta de 1853 por Lange, na Alemanha, e visava facilitar a sua remoção das siderúrgicas (JOHN, 1995). Neste processo, a escória ainda no estado líquido, em queda livre é interceptada por um jato de água fria com pressão de 0,6 MPa, na quantidade de 3 ton de água por tonelada de escória, sendo depositada em tanque cheio de água. O choque dos dois materiais provoca o resfriamento brusco da escória e a sua redução a um material granular, de

distribuição granulométrica similar à da areia de quartzo natural, porém de forma mais angular. Este processo propicia elevados teores de vidro, sempre acima de 90% e, frequentemente, acima de 97%.

O segundo processo de produção de escória vítrea produzida é conhecido como pelotização. Neste processo, a escória ainda líquida cai sobre um cilindro dentado giratório (300 rpm), refrigerado por jatos de água fria (1 ton/ton), que arremessa a escória em grãos para o ar. Este processo gera distribuição variada de grãos. Os de maior diâmetro possuem estrutura porosa e são parcialmente cristalinos, sendo utilizados normalmente como agregado leve. Os grãos menores são similares à areia, de composição vítrea, utilizados como aglomerante. Este processo garante grande redução de consumo de água, mas ainda não é utilizado no Brasil.

A produção anual de escórias de alto forno no Brasil em 1996 foi de 6,4 milhões de toneladas, sendo que 0,7 milhões resfriadas lentamente e o restante granulada, sendo adequado a reciclagem como aglomerantes. Nem toda a escória granulada, mesmo a de composição básica, é consumida pela indústria cimenteira, permanecendo acumulada em aterros.

A fração de escória resfriada lentamente é utilizada internacionalmente como agregado para concreto, base para pavimentação, mas seu uso não é ainda difundido no Brasil, onde a fração granulada acumula-se nas usinas. Já no mercado norte-americano 85% dos 11,8M ton de escória de alto forno produzidas anualmente é resfriada lentamente e comercializada como agregado. Ao sair do alto-forno, a escória se encontra no estado líquido, passando em sequência por um processo de solidificação. Existem várias formas de resfriamento, e cada uma confere à escória características diferentes, acarretando, portanto, empregabilidades distintas. Os processos mais comuns são o resfriamento ao ar, obtendo-se uma escória cristalina, e o processo de granulação, na qual a escória é resfriada rapidamente tornando-se amorfa. A escória granulada possui maior possibilidade de reaproveitamento quando comparada aos demais tipos de escória, devido à sua hidraulicidade, ou seja, a característica de endurecer ao se acrescentar água. A utilização de escórias de alto forno para a produção de CAT's já vem sendo pesquisada desde os anos de 1940. Esse subproduto apresenta vantagem em sua aplicação devido a sua composição química semelhante à do cimento Portland. Além disso, devida à produção do ferro gusa ser elevada, a escória é gerada em larga escala, o que torna necessário o seu consumo.

Dentre os processos de beneficiamento citados, cabe uma ênfase no de aglomeração, dada a sua importância no sentido de melhorar a permeabilidade da carga do alto-forno, esta melhoria proporciona a redução do consumo de carvão e aceleração do processo de redução. Os processos mais importantes de aglomeração são a sinterização e a pelletização. O processo de sinterização consiste em aglomerar finos de minério de ferro numa mistura com aproximadamente 5% de um carvão finamente dividido ou coque. (ZEGHICHI, 2006). A carga é aquecida por intermédio de queimadores e com o auxílio de fluxo de ar. A temperatura que se desenvolve durante o processo atinge 1.300 a 1.500° C, suficiente para promover a ligação das partículas finas do minério, resultando num produto uniforme e poroso chamado sinter.

A escória de alto-forno já é considerada hoje um subproduto da siderurgia, devido às suas várias aplicações, principalmente para a indústria da construção civil. Mas apesar das possibilidades de reaproveitamento, uma quantidade considerável deste material ainda é estocada, daí a necessidade de se buscar aplicações alternativas. A seguir são citadas as principais formas de reaproveitamento deste resíduo (LOBATO, 2013).

## 2.9 - UTILIZAÇÃO DE ESCORIA DE ALTO FORNO EM CONCRETOS E ARGAMASSAS

Pesquisas sobre aproveitamento dos mais variados tipos de resíduos estão sendo intensificadas no mundo inteiro. Em alguns países como os Estados Unidos, a reciclagem é vista pela iniciativa privada como um mercado altamente rentável. Diversos setores têm investido em pesquisas e tecnologias, visando melhorias na qualidade do produto reciclado, além de propiciar maior eficiência do sistema produtivo. Assim, alguns trabalhos acadêmicos são citados abaixo, são de extrema importância para a melhor destinação dos resíduos de escória.

Nos estudos de BEN HAHN I, 2011, o processo de ativação de escórias contendo diferentes composições químicas. O estudo mostrou que escórias com maiores quantidades de MgO propiciaram aumento no desenvolvimento da resistência à compressão e formação de hidrotalcita, além de diminuição da porosidade na microestrutura. Já a quantidade mais elevada de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> na matéria-prima diminuiu a taxa de calor liberado na hidratação inicial da escória, mas não teve influência significativa na resistência final das argamassas, porém os autores relatam a maior incorporação

deste componente no composto CSH das pastas hidratadas. O efeito da variabilidade física e química da escória de alto forno ainda não foi bem entendido, proporcionando forte impulso para investigação nesta área. O artigo teve por finalidade contribuir no entendimento da influência das características das escórias de alto forno, finura e composição química, ativadas com hidróxido de sódio (NaOH), no desempenho de cimentos álcali ativados

Nesse contexto, LANGARO *et al.*, 2017, avaliaram a influência das características da escória de alto forno, finura e composição química, no comportamento dos Cimentos álcali ativados CAT's, visando contribuir no entendimento dos seus mecanismos de hidratação. Utilizando duas escórias, as quais foram submetidas a diferentes tempos de moagem e, ativadas com 5% de NaOH. Foram confeccionadas argamassas e pastas para testes de resistência à compressão (7 e 28 dias), monitoradas do calor de hidratação e investigação da microestrutura (DRXeDSC). Conforme a Figura 2.6 os autores identificaram que A partir das análises térmicas (DSC), foi possível identificar os compostos hidratados de forma a confirmar os picos observados na análise de DRX.

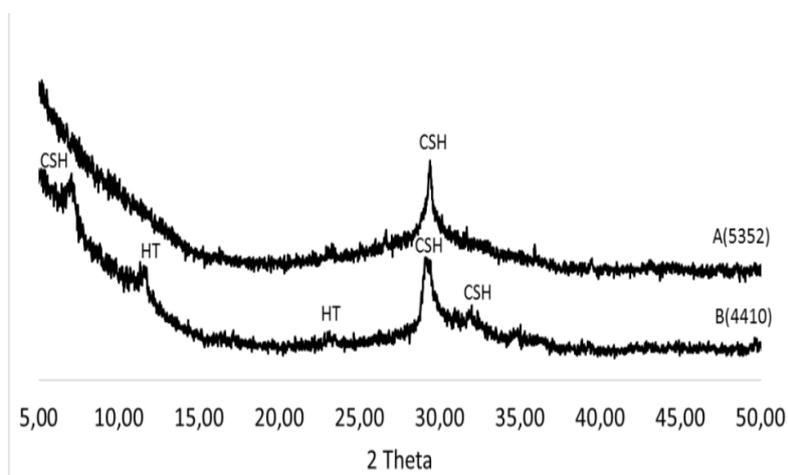


Figura 2.6 - Difratograma das pastas com escória A (5352) e B (4410), aos 28 dias.  
CSH – Silicato de cálcio hidratado, HT –Hidrotalcita.

Fonte: LANGARO *et al.* (2017).

Os resultados mostraram que as argamassas confeccionadas com escória, obtiveram ótimo desempenho mecânico, com valores próximos a 48MPa aos 28 dias, bastante superior à escória B, independente da finura e com maior formação de CSH. Através da Calorimetria exploratória diferencial (DSC), na Figura 2.7 das pastas com

escória A e B, respectivamente, ativadas com 5% de NaOH, 28 dias. CSH – Silicato de cálcio hidratado, HT – Hidrotalcita.

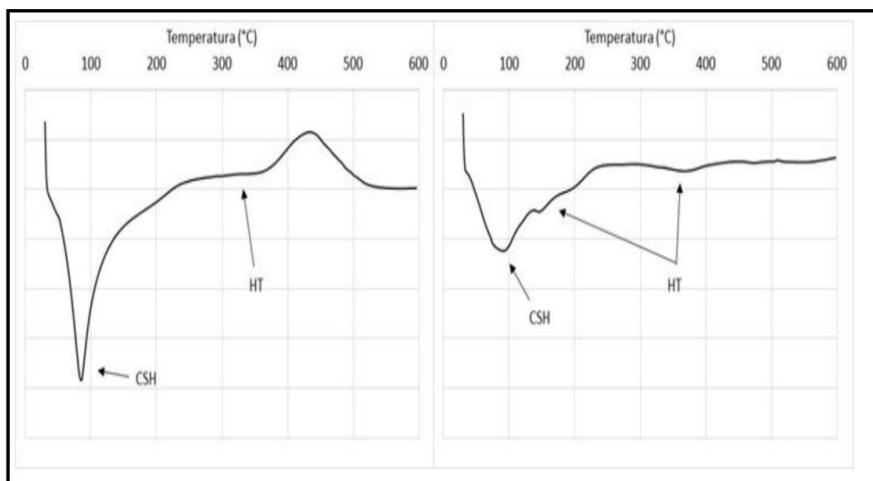


Figura 2.7 - Calorimetria exploratória diferencial.  
Fonte: LANGARO ET AL (2017).

Os mesmos, notaram que a composição química da matéria-prima tem fator relevante no desenvolvimento do cimento álcali ativado, e que a finura exerce pequena influência. Os valores de resistência à compressão apresentados pelas argamassas com a escória A foram superiores àqueles apresentados pela escória B. O teor de MgO são superiores para a escória A, o que pode ter contribuído para desenvolvimento da resistência mecânica e microestrutura.

Já, nos estudos de Massucato 2005, avaliou-se propriedades oriundas da adição de escória de alto-forno à carvão vegetal, do concreto no estado fresco e endurecido, produzido com cimentos que já utilizam em sua composição a escória de alto-forno. Com a determinação da quantidade de escória de alto-forno pelo método de dissolução seletiva e adicionou escória de alto-forno no concreto até os limites estabelecidos na especificação do cimento de alto-forno (CPIII) pela NBR 5735 (ABNT, 1991), a fim de conhecer o efeito na resistência mecânica, módulo de elasticidade, abatimento, incorporação de ar, tempo de pega e exsudação, em traços de concreto sem adição e com adição de escória de alto-forno à carvão vegetal e à coque. O estudo comprovou que, a utilização da escória de alto-forno à carvão vegetal como adição, não provoca alterações nas propriedades do concreto no estado fresco, em comparação com a escória de alto-forno à coque. A resistência compressão com adição da escória de alto-forno à carvão vegetal aumentou em até 5% em idades superiores a 60 dias em comparação com o concreto sem adição de escória. Observou também que, a utilização da escória de alto-

forno à carvão vegetal como adição no concreto, reduz a resistência à compressão e à tração na flexão em todas as idades verificadas, em comparação com traços sem adição e com adição de escória de alto-forno à coque, independente do percentual de adição adotado. Os concretos com adição de escória de alto-forno à coque apresentaram resistência mecânica maior que os concretos sem adição nas idades superiores a 28 dias.

Nesse contexto, Pimentel et al 2019. Caracterizaram química, mineralógica e fisicamente uma escória de alto forno resfriada lentamente. Para isso, foram realizados os ensaios de massa específica e unitária, índice de vazios, bem como, a caracterização química e mineralógica da escória de alto forno (EAF) da Siderúrgica Norte Brasil S.A. Os resultados mostraram que a EAF possui uma massa específica semelhante ao dos cimentos devido em especial a sua composição química e mineralógica. Da mesma forma a EAF apresentou predominância de óxidos de silício ( $\text{SiO}_2$ ), cálcio ( $\text{CaO}$ ) e alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), bem como em sua mineralogia predominância de quartzo, calcita e hematita.

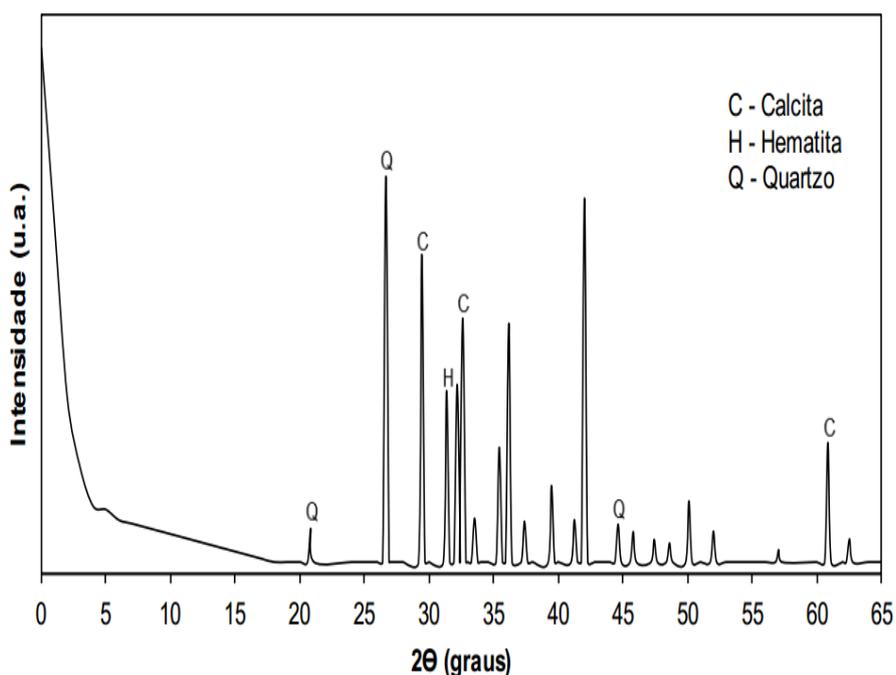


Figura 2.8 - Análise da estrutura cristalina da escória de alto forno por difração de raios-X (DRX).

Fonte: PIMENTEL *et al.* (2019).

Quanto a análise por difração de raios-X, os autores perceberam que a EAF, apresentou uma estrutura predominantemente cristalina, mostrando a presença de inúmeros picos de difração, embora esta ainda apresente um discreto halo de

amorfização. Esses picos de difração corroboram com a ideia de que, em virtude de resíduo industrial serem depositado ao ar livre para o seu resfriamento, gera associações entre os átomos segundo as próprias afinidades, em cristais, fato denominado cristalização.

A EAF, estudada por esses autores possuía uma massa específicas semelhante a do cimento devido em especial a sua composição química e mineralógica. A EAF apresentou predominância de óxidos de silício ( $\text{SiO}_2$ ), cálcio ( $\text{CaO}$ ) e alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), bem como, em sua mineralogia predominância de quartzo, calcita e hematita. A Escória não apresentou atividade pozolânica nos ensaios mecânicos aqui realizados, o que nos sugere que a mesma não possa ser utilizada como material suplementar em substituição ao cimento Portland, mas sim como agregado na confecção de concretos e argamassas após britagem e beneficiamento de separação granulométrica.

Nesse sentido, ROSSA *et al.* (2012), ao investigar, o uso da adição da escória de forno em argamassa colante tipo ACI, em substituição ao cimento de Portland e os aspectos físicos e químicos (difração de raios X, fluorescência de raios X, microscopia eletrônica de varredura e análise por dispersão de elétrons) de três composições de escória de diferentes partes do Brasil foram estudados, usando a escória de menor reatividade. Indicando a potencialidade do seu uso, com resistência de aderência à tração similar às amostras de referência e mais altas do que as recomendações normativas. Na argamassa endurecida foram identificadas, principalmente, as fases químicas quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), calcita ( $\text{CaCO}_3\text{-CC}$ ), larnita ( $\text{Ca}_2\text{SiO}_4\text{-C}_2\text{S}$ ) e brownmillerita ( $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-C}_4\text{AF}$ ), típicas de composições à base de cimento Portland. As investigações por MEV, apresentada pelos autores, (Figura 2.9) revelaram micrografias com quantidade e tamanho regulares de poros, preenchidos, em sua maioria, por uma composição química elementar (% atômica) determinada por análise semiquantitativa por EDS, por O (52,4%), Mg (1,2%), Al (1,5%), Si (3,9%) e Ca (41,0%).

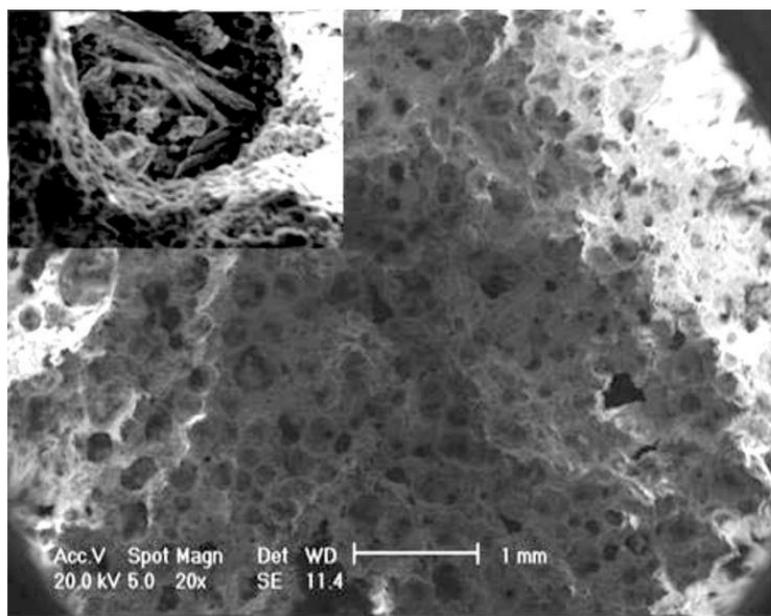


Figura 2.9 - Microscopia eletrônica de varredura.  
Fonte: ROSSA et al. (2012).

Este tipo de textura, como mostra o contexto, facilita o trabalho de aplicação pela maior superfície de contato aos substratos. Os autores concluíram que a adição de escória de alto forno em substituição ao cimento Portland em argamassas colantes do tipo AC I não alterou as características ideais em termos de viscosidade. Foram verificadas, durante as suas aplicações, melhorias em termos de trabalhabilidade pelo aumento da proporção das adições de 5 a 20%. É possível produzir uma argamassa colante industrializada de maneira sustentável, com redução de poluentes ambientais pela diminuição do teor de cimento nos traços com adições e, também, pelo uso de resíduos da área metalúrgica.

## CAPÍTULO 3

### MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo descrevem-se as etapas de trabalho que foram desenvolvidas desde a coleta e caracterização dos resíduos e materiais que seriam utilizados até a sua incorporação na produção das argamassas. Em relação as argamassas que foram produzidas, apresentam-se os parâmetros utilizados para a escolha do melhor agregado na produção da argamassa e caracterização da mesma. Ao final, serão mostrados os procedimentos empregados para a caracterização dos resíduos das argamassas.

#### 3.1 - PLANO EXPERIMENTAL

A elaboração das argamassas para este estudo, foi realizada na Usina de Materiais (USIMAT) do Laboratório de Engenharia Química (LEQ) da Universidade Federal do Pará, a primeira fase destinada à caracterização do resíduo, escória de alto forno, proveniente da Companhia Siderúrgica do Norte Brasil S.A (SINOBRAS), localizada no distrito industrial de Marabá-PA, e o segundo estágio voltado para a aplicação da escória como substituta parcial do agregado miúdo natural na composição de argamassa mista. O fluxograma da Figura 3.1 esquematiza o método desenvolvido.



Figura 3.1 - Fluxograma geral dos métodos adotados.

### 3.2 - SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

A caracterização dos materiais e resíduos utilizados neste trabalho visa principalmente no conhecimento de aspectos físicos, químicos e mecânicos da composição e principalmente de sua estrutura. Dessa forma, a Figura 3.2, apresenta o fluxograma das análises que foram realizadas para obtenção das características dos resíduos (cimento Portland, agregado natural miúdo e Escória de alto forno).

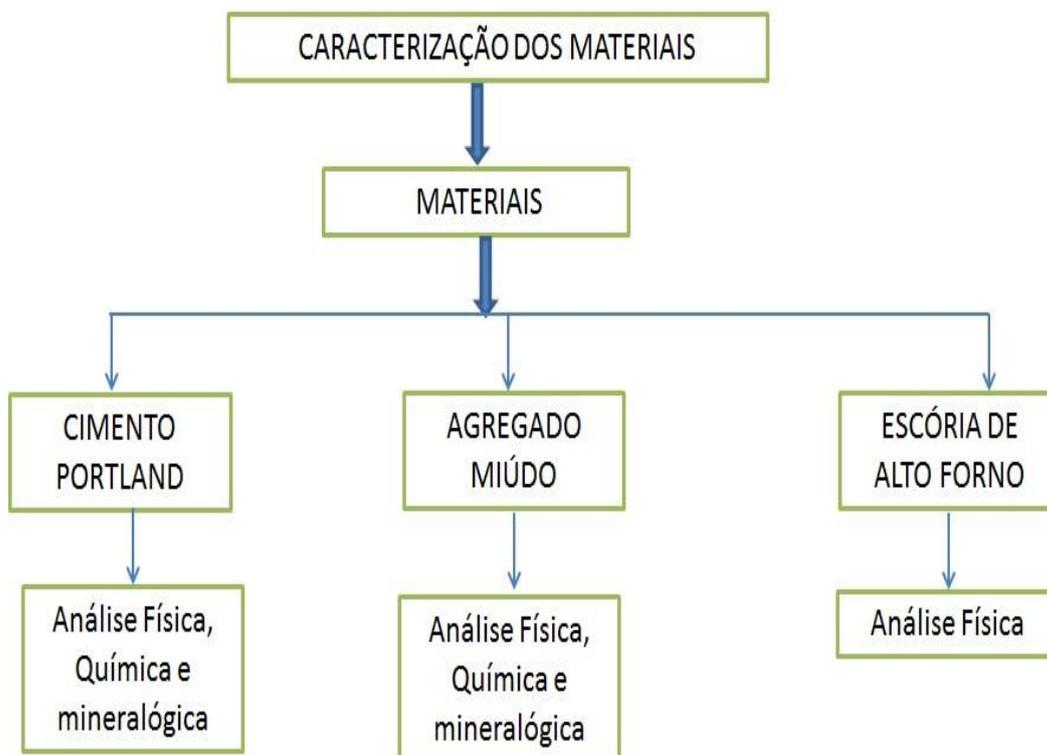


Figura 3.2 - Principais etapas experimentais da pesquisa.

#### 3.2.1 - Cimento

O cimento na Figura 3.3 utilizado, foi o cimento Portland CP II – E 32, conforme a norma NBR11578/1991 disponível comercialmente em Belém. Este classificado como tipo A. Foi tomado como opção por este tipo de cimento é justificada pelo mesmo não apresentar propriedades pozolânicas, possibilitando avaliar todas as consequências do emprego do agregado nas propriedades da argamassa.



Figura 3.3 - Cimento portland.

As características químicas, físicas e mecânicas desse cimento foram fornecidas pelo fabricante e estão apresentadas na Tabela 3.1. O cimento Portland utilizado foi classificado como tipo A principal escolha desse material foi por ser um cimento com poucas adições de pozolanas. A Figura 3.3 demonstra o cimento utilizado na elaboração dos corpos de prova.

Tabela 3.1 - Cimento portland CP II – E 32.

| <b>Características</b> | <b>Determinações</b>                                   | <b>Obtidos</b> | <b>Ensaio</b> |
|------------------------|--|----------------|---------------|
| <b>Químicas</b>        | Perda ao fogo  | 4,52%          | NBR NM18      |
|                        | Resíduo Insolúvel                                      | 1,38%          | NBR NM15      |
|                        | Óxido de silício (SiO <sub>2</sub> )                   | 19,82%         | NBR NM14      |
|                        | Óxido de Alumínio<br>(AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) | 4,54%          | NBR NM14      |
|                        | Óxido de Cálcio total<br>(CaO)                         | 59,80%         | NBR NM14      |
|                        | Óxido de Magnésio<br>(MgO)                             | 3,28%          | NBR NM14      |
|                        | Óxido de Enxofre(MgO)                                  | 2,42%          | NBR NM16      |
|                        | Óxido de Sódio (SO <sub>3</sub> )                      | 0,33%          | NBR NM17      |
|                        | Óxido de potássio<br>(Na <sub>2</sub> O)               | 0,66%          | NBR NM17      |

|                  |                             |                         |           |
|------------------|-----------------------------|-------------------------|-----------|
|                  | Óxido de cálcio livre (CaO) | 1,19%                   | NBR NM12  |
|                  | Composição Potencial        |                         | ASTMC150  |
|                  | C <sub>3</sub> S            | 57,30%                  | -         |
|                  | C <sub>2</sub> S            | 9,64%                   | -         |
|                  | C <sub>4</sub> AF           | 7,56%                   | -         |
| <b>Físicas</b>   | Massa Específica            | 3,16 Kg/dm <sup>3</sup> | NBR NM23  |
|                  | Finura- peneira de n°200    | 4,50%                   | NBR 11579 |
|                  | Área específica             | 316 kg/dm <sup>3</sup>  | NBR NM76  |
|                  | Tempo de pega inicial       | 2h 15 min               | NBR NM65  |
|                  | Tempo de pega final         | 3h 40 min               | NBR NM65  |
| <b>Mecânicas</b> | Resistência à compressão    |                         |           |
|                  | 1 dia                       | 9,6Mpa                  | NBR 7215  |
|                  | 3 dias                      | 19,9Mpa                 | -         |
|                  | 7 dias                      | 25,5 Mpa                | -         |
|                  | 28 dias                     | 32,6Mpa                 | -         |

### 3.2.2 - Areia

A amostra de agregado miúdo reciclado seguiu os requisitos empregados na norma ABNT NBR 7211, onde a matéria prima foi adquirida em estâncias de material de construção entorno da Universidade Federal do Pará.

A amostra coletada passou por um processo de separação de materiais indesejáveis de resíduos inorgânicos (metais e elementos graúdos de seixo), e resíduos orgânicos (resto de madeira, papel e sacos plásticos). Todos os materiais que passaram pelo processo de separação, foram conduzidos à usina de materiais (USIMAT) para ser moído e classificado através de curva de moagem. A Figura 3.4 faz referência a areia cominuída e utilizada na elaboração dos traços de argamassa.



Figura 3.4 - Areia.

### 3.2.3 - Água

A água utilizada foi proveniente do sistema de abastecimento da Universidade Federal do Pará.

### 3.2.4 - Escoria de alto forno

A EAF utilizada neste trabalho foi fornecida por uma empresa mineradora pertencente ao grupo SINOBRAS. O beneficiamento do minério ocorre em um processo de lavra a céu aberto, o que gera bastante resíduo. A separação foi realizada após o processo de fabricação do ferro gusa, onde se realiza em unidades industriais chamadas altos fornos, nas quais se reduzem os óxidos contidos nos minerais de ferro onde se separam as impurezas (EAF) que os acompanham. O resíduo se encontrava em condições seca de acordo com a Figura 3.5 e foi acondicionado em sacos de 150 kg para transporte até o local de destino (laboratório de Engenharia Química/UFPA). O material, passou por um processo de moagem, para obtenção de uma granulometria de  $50,02\mu\text{m}$ micrometros, onde foram realizadas análises físicas e químicas preliminares de granulometria, massa específica aparente, massa unitária e umidade, DRX e MEV, como mostra a Tabela 3.5.

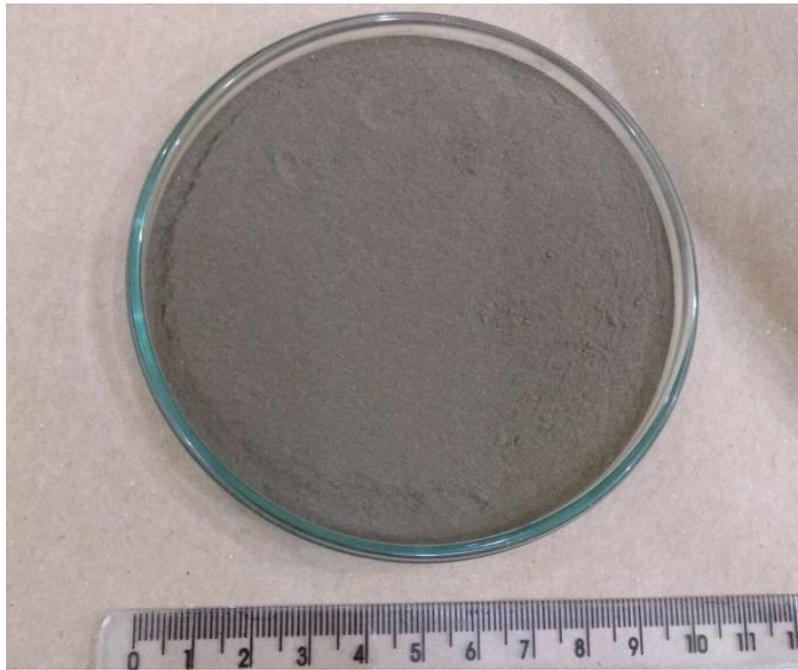


Figura 3.5 - Escória de alto forno.

Tabela 3.2 - Tabela de determinações para o resíduo de escoria de alto forno.

| <b>ITENS</b> | <b>DETERMINAÇÕES</b>   | <b>NORMAS ABNT</b>                                       |
|--------------|------------------------|--|
| <b>1</b>     | Análise granulométrica | NBR 7211/2005  |
| <b>2</b>     | Massa específica       | 093/94 – DNER  |
| <b>4</b>     | DRX e MEV              | Difração de raio X e microscopia eletrônica de varredura |

### 3.3 - MOAGEM

Os materiais (EAF, cimento e areia) foram previamente inseridos no moinho de bolas em que foi carregado com 1 kg de material para aproximadamente 3 kg de bolas, operando a uma velocidade de rotação igual a 87% de sua velocidade crítica. Foi todo resíduo cominuído nos tempos de 0 a 210 minutos sob condições operacionais especificadas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Condição específica de moagem para a etapa de cominuição.

| <b>CARACTERÍSTICAS DA CARGA DE BOLAS</b> |                      |                 |                                |
|--|----------------------|-----------------|--------------------------------|
| <b>UTILIZADAS NO TESTE</b>               |                      |                 |                                |
| <b>Nº de Bolas</b>                       | <b>Diâmetro (cm)</b> | <b>Peso (g)</b> | <b>Volume (cm<sup>3</sup>)</b> |
| 8  | 3.676                | 1825.84         | 208                            |
| 12                                       | 2.879                | 1021.2          | 150                            |
| 9  | 1.563                | 211.5           | 18                             |
| <b>Total</b>                             |                      | <b>3058.54</b>  | <b>376</b>                     |

Para a obtenção de partículas com granulometrias menores utilizou-se um Moinho com configuração em disco *Marca MARCONI Modelo MA700 série (100690037)*, conforme Figura 3.6.

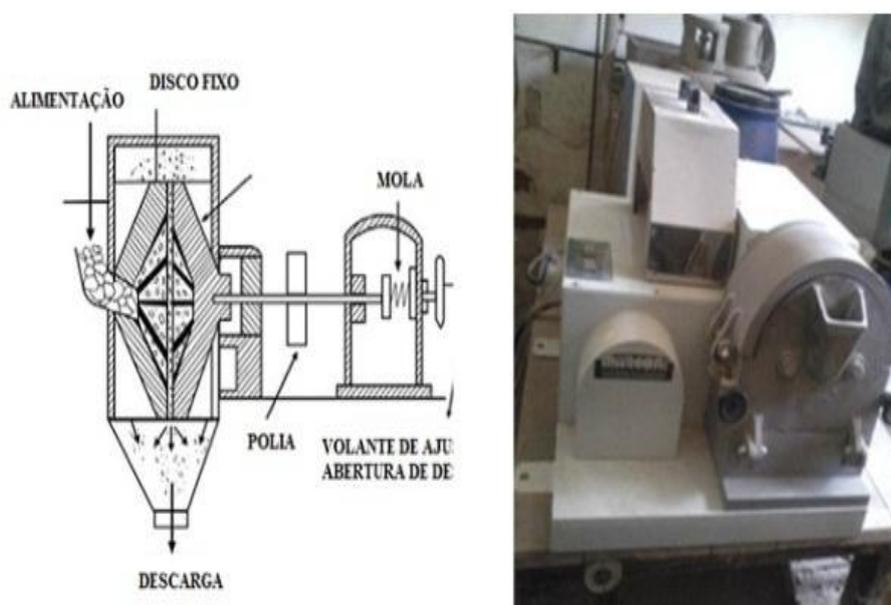


Figura 3.6 - Moinho de disco marca MARCONI (modelo MA 700 série 100690037).  
Fonte: CARDOSO (2020).

#### 3.4 - ELABORAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA CILÍNDRICOS E DEFINIÇÃO DOS TRAÇOS DE ARGAMASSA

Para a confecção dos corpos de prova, a metodologia foi baseada na norma NBR - 7215 (ABNT, 2004). Foram confeccionados corpos de prova cilíndricos (dimensões 5 cm x 10 cm). Utilizou a metodologia proposta por CARDOSO (2020), em que se

utilizou corpos de prova de tamanho reduzido Figura 3.7, devido a fatores como o baixo consumo de material e moldagem e desmoldagem rápidas. Cada traço foi elaborado em triplicata, sendo um total de 15 corpos de prova. Os corpos de prova de argamassa ficaram em processo de cura por um período.



Figura 3.7 - Corpos de prova no molde cilíndrico.

A partir dessa dimensão foi calculado o volume de cada forma, a fim de que com os valores correspondentes aos traços possam ser dimensionadas as quantidades dos materiais que entraram na composição da argamassa de 28 dias, sendo que no 14º dia os mesmos foram dês moldados, conforme a NBR 5738. Após esses dias foram realizados os ensaios físicos-mecânicos de acordo com a ABNT NBR 9778, 13280 e 13279, com o objetivo de avaliar as principais propriedades das argamassas.

Portanto, se 1 corpo de prova utilizou 400g, para 3 corpos de prova (triplicata), foi necessário 1200 g. Dispondo do total de aglomerante, calculou-se a quantidade de cada material que foi necessária para a dosagem Eq. (3.1). Com isso, tem-se:

- Cimento – 30% (1200g x 0,3 = 360g)
- Escoria – 20% (1200g x 0,2 = 240g)
- Areia de convencional – 50% (1200g x 0,5 = 600g)

$$40\% = \frac{H_2O}{M_{Cimento} + M_{resíduo}} \quad (3.1)$$

Para o processo de hidratação das pastas foi estabelecida a metodologia realizada por (CARDOSO, 2020) que utilizou a relação H<sub>2</sub>O/ aglomerante de 40% como mostra a Eq. (3.1) obedecendo a proporção de 1/3 (cimento/resíduos), estabelecendo corpos de prova em triplicata. A metodologia de confecção dos traços foi feita, misturando os sólidos e em seguida adicionando água de mistura de acordo com o estabelecido. A quantidade em massa para de resíduos e aglomerantes utilizados em casa traço, foi representada na Tabela 3.4 abaixo.

Tabela 3.4 - Tabela de proporções para as argamassas elaboradas.

| <b>Quantidade em massa</b> |                    |                  |                    |                             |
|----------------------------|--------------------|------------------|--------------------|-----------------------------|
| <b>TRAÇOS</b>              | <b>Cimento (%)</b> | <b>Areia (%)</b> | <b>Escória (%)</b> | <b>Água/aglomerante (%)</b> |
| 1° traço                   | 30                 | 50               | 20                 | 40                          |
| 2° traço                   | 30                 | 40               | 30                 | 40                          |
| 3° traço                   | 30                 | 30               | 40                 | 40                          |
| 4° traço                   | 30                 | 20               | 50                 | 40                          |
| Ref*                       | 25                 | 0                | 0                  | 40                          |

\* Ref.: traço elaborado como referência para comparação dos resultados.

Para a completa homogeneização das misturas utilizou-se um misturador mecânico da marca SOLDTEST com capacidade de 130 Litros, conforme a Figura 3.8.



Figura 3.8 - Misturador mecânico SOLDTEST.

### 3.5 - CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-MECÂNICA NO ESTADO ENDURECIDO

Após o tempo de cura dos corpos de prova de argamassa, foram executados os ensaios físico-mecânicos de absorção aparente, porosidade aparente, massa específica e resistência à compressão, para avaliar as propriedades mecânicas e verificar como se comportavam com diferentes teores de cinza volante. Estes ensaios foram realizados na Usina de Materiais do Laboratório de Engenharia Química de acordo com a ABNT NBR 9778 e 13280.

#### 3.5.1 - Resistência à compressão

Em um projeto de fabricação de argamassa e concreto, a resistência é uma das principais propriedades avaliadas. Isto porque comparada com a maioria das propriedades a resistência é relativamente fácil de ser ensaiada. Contudo muitas propriedades das argamassas são diretamente relacionadas à resistência. Portanto, podem ser deduzidas a partir dos dados de resistência. A resistência a compressão aos 28 dias, determina através de um ensaio padrão de compressão uniaxial, é aceita universalmente como índice geral de resistência da argamassa e concreto (MEHTA; MONTEIRO, 1994).

Os ensaios para determinação da resistência a compressão axial dos CP's das argamassas, foram realizados nos tempos de 28 dias de cura. Para o ensaio de resistência à compressão utilizou-se máquina universal Emic SSH300, célula Trd 30 de acordo com a norma ABNT NBR 13279, no Laboratório de Resistência dos Materiais do Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará. Os corpos de prova tiveram seus resultados registrados no software TESC 11. A carga aplicada foi crescente em que todo o esforço de compressão foi distribuído de forma transversal em toda seção do corpo de prova. Na Figura 3.9 é mostrado o ensaio de resistência à compressão em que mostra a prensa hidráulica e o corpo de prova sendo rompido.

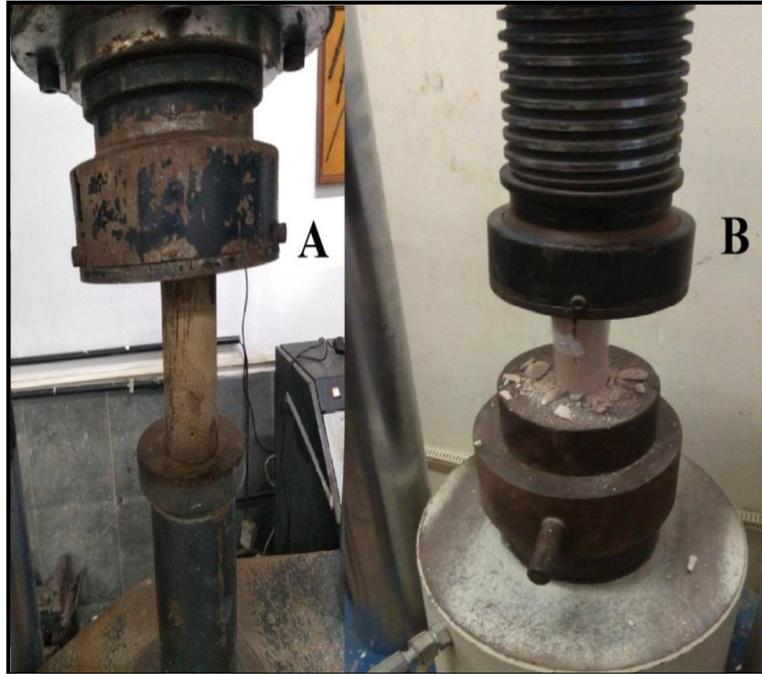


Figura 3.9 - Prensa hidráulica modelo (EMIC SSH30- célula TRD30) (a) e corpo de prova rompido (b).

### 3.5.2 - Absorção aparente

Para os ensaios de absorção aparente, porosidade aparente, massa específica os CP's foram pesados em balança analítica obtendo-se a massa seca. Logo em seguida foram mergulhados em uma caixa plástica contendo água por 24 horas Figura 3.10 (a).

Após esse período os CP's, foram retirados do recipiente e pesados para se obter o valor da massa úmida. Para a obtenção do valor da massa imersa, utilizou-se uma balança analítica em conjunto com um dispositivo de madeira conectada a uma haste de aço, como mostra a Figura 3.10 (b), o material a ser pesado ficou imerso dentro de um recipiente plástico contendo água suficiente para cobrir o material.



Figura 3.10 - (a) Corpos de prova em imersão por 24Hs e (b). dispositivo para medição da massa imersa dos CP's.

É representada pelo quociente da massa absorvida de água pelo corpo de prova saturado de água pela massa seca do corpo de prova. Calcula-se em %, de acordo com a Eq. (3.2):

$$Aa(\%) = \frac{M_u - M_s}{M_s} \cdot 100 \quad (3.2)$$

Onde:

Aa - Absorção aparente;

Mu - Massa úmida (g);

Ms - Massa seca (g).

### 3.5.3 - Porosidade aparente

É representada pelo quociente do volume de poros abertos, de cada corpo de prova, pelo volume aparente do mesmo. Calcula-se em %, de acordo com a Eq. (3.3):

$$Pa(\%) = \frac{M_u - M_s}{M_u - M_i} \cdot 100 \quad (3.3)$$

Onde:

Pa - Porosidade aparente;  
Mu - Massa úmida (g);  
Ms - Massa seca (g);  
Mi - Massa imersa (g).

### 3.5.4 - Massa Específica Aparente (MEA)

É representada pelo quociente da massa, de cada corpo de prova seco, pela diferença da massa úmida com a massa imersa de cada corpo de prova. A massa específica foi calculada através da Eq. (3.4).

$$MEA = \frac{M_u - M_s}{M_u - M_i} \cdot \rho_{H_2O} \quad (3.4)$$

## 3.6 - ANÁLISE GRANULOMÉTRICA DOS MATERIAIS

Parte da caracterização de um material compreende a sua granulometria, em que se determina o tamanho da partícula e a determinada faixa de tamanho em que essa ocorre em uma determinada frequência (LIMA e DA LUZ, 2001).

Para a análise granulométrica das matérias primas foi utilizado o equipamento laser particlesizeranalysette 22 Fritsch com software MaScontrol para a aquisição dos dados experimentais. Apenas para a areia foi realizada a análise clássica de peneiramento de acordo com as respectivas normas da Associação Brasileira de Normas Técnica (ABNT) que são: NBR 6457 e NBR 7181, utilizando a sequência de peneiramento mesh na série #16, #32, #60, 100, #150, #200, #270, #325, #400 e #500.

## 3.7 - CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA

### 3.7.1 - Difração de raios X (DRX)

A técnica de difração de raios X corresponde a uma das principais técnicas de caracterização microestrutural de materiais cristalinos, em que sua aplicabilidade se encontra em diversas áreas do conhecimento principalmente na engenharia química, na geologia, engenharia metalúrgica e ciências dos materiais entre outros (SCOOG *et al.*,

2012). As amostras dos materiais utilizados nesse trabalho foram avaliadas a partir da metodologia convencional de DRX (pó seco). Inicialmente as amostras foram pulverizadas em gral de ágata, em seguida o material, foi transferido cerca de 0,5 g para portas-amostra de aço inox, utilizado como suporte, todo o conjunto foi fixado em uma base metálica. Depois do processo de preparo dos materiais as amostras seguiram para a realização dos ensaios. As análises foram realizadas em um difratômetro de raios-X do modelo *X'Pert Pro MPD (PW 3040/60) PANalytical*, com goniômetro PW3050/60( $\theta$ - $\theta$ ) e com tubo de raios-X cerâmico de anodo de Cu ( $K\alpha_1 = 1,540598 \text{ \AA}$ ) modelo PW3373/00, foco fino longo, filtro  $K\beta$  de Ni, detector X'Celerator RTMS (*Real Time Multiple Scanning*) no modo *scanning* e com *activelength*  $2,122^\circ$ . Foram usadas as seguintes condições instrumentais: Varredura  $4^\circ$  a  $75^\circ$   $2\theta$ , 40 kV, 30 mA, passo  $0,02^\circ$  em  $2\theta$  e tempo/passo de 20 s, fenda fixa  $1/4^\circ$  e anti-espalhamento  $1/2^\circ$ , máscara 10 mm, movimento da amostra spinning, com 1 rps. O equipamento utilizado pertencente ao laboratório de geociências da UFPA.

### 3.7.2 - Espectrometria de fluorescência de raios X (FRX)

A técnica de fluorescência de raios-X é bastante utilizada na análise química de matérias-primas minerais e cerâmicas (SERPA, 2007). No presente estudo a composição química da areia foi realizada utilizando espectrômetro WDS sequencial, modelo *AxiosMinerals* (PANalytical), com tubo de raios-X cerâmico e anodo de ródio.

A análise de espectrometria de fluorescência de raios X foi realizada no espectrômetro WDS sequencial, modelo *AxiosMinerals* da marca *PANalytical*, com tubo de raios-X cerâmico, anodo de ródio (Rh) e máximo nível de potência 2,4 KW. amostra foi analisada em dois modos de preparação:

- a) Disco fundido: 1 g de amostra + 6 g de fundente (Tetraborato de lítio –  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ ), mistura fundida a  $1000^\circ\text{C}$  por 10 min.
- b) Pastilha prensada: 3 g de amostra + 0,9 g de aglomerante (cera de parafina), mistura prensada com uma carga de 20 toneladas. As aquisições e tratamento de dados foram realizados através do software Super Q Manager da *PANalytical*.

### 3.7.3 - Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV

A técnica da microscopia eletrônica de varredura (MEV) possui grande versatilidade para observação e análise microestruturais de materiais sólidos (DEDAVID, 2007). Foram realizadas análises microestruturais dos resíduos que foram utilizados na pesquisa bem como as amostras dos corpos de prova após a fratura, para isso utilizou-se um Microscópio eletrônico de varredura da marca HITACHI, modelo TM 3000, Brasil, Figura 3.11.



Figura 3.11 - Equipamentos de MEV.

## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão descritos os resultados e discussões das caracterizações das matérias primas bem como das argamassas obtidas:

#### 4.1 - CARACTERIZAÇÃO DAS MATERIAS PRIMAS

##### 4.1.1 - Análise granulométrica do resíduo de EAF

O prévio conhecimento do tamanho das partículas das matérias primas é um parâmetro fundamental na elaboração dos materiais cimentícios, pois dependendo do seu diâmetro médio, a reação química pode sofrer variação.

A Figura 4.1 apresenta os resultados obtidos na análise granulométrica do resíduo de escoria de alto-forno, verifica-se que esses valores se encontram na faixa aproximadamente 50,02  $\mu\text{m}$  o que permite enquadrar como de granulometria fina de acordo com a norma ABNT – NBR 6502. Uma boa distribuição de tamanhos de partículas que poderão influenciar no aumento de resistência pelo melhor empacotamento das partículas.

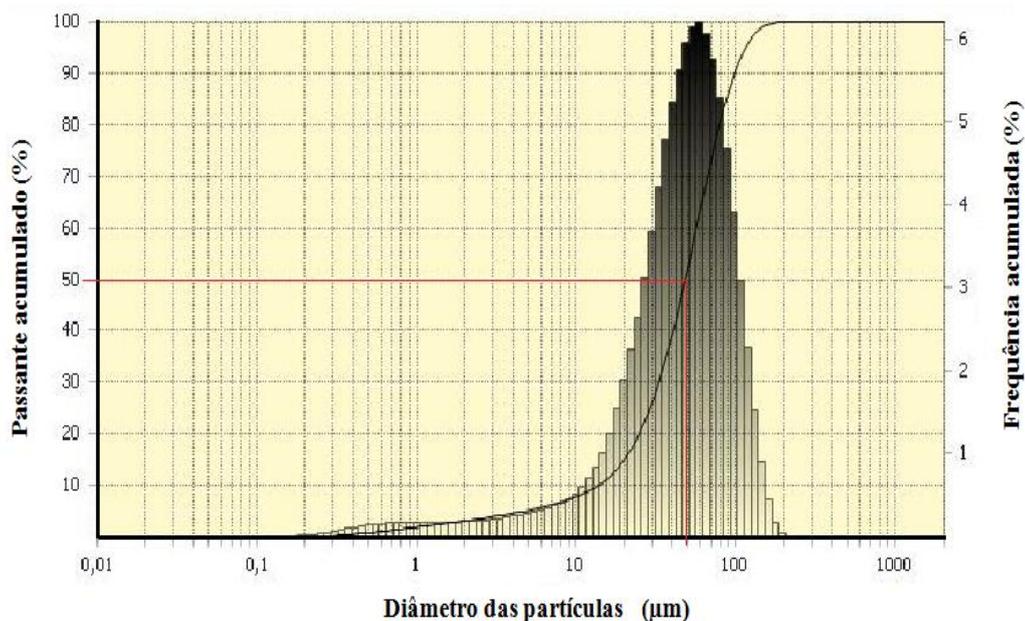


Figura 4.1 - Distribuição do tamanho de partícula do resíduo de escoria de alto-forno.

A Tabela 4.1 apresenta as características físicas obtidas do resíduo de escoria de alto-forno em relação ao diâmetro médio das partículas, limites de Atterberg, massa específica e teor de umidade.

Tabela 4.1 - Características Físicas do resíduo da EAF.

| <b>ENSAIOS</b>                          | <b>RESULTADO</b> | <b>NORMAS TÉCNICAS</b>                    |
|---|------------------|---|
| Diâmetro médio ( $\mu\text{m}$ )        | 50,02            | NBR 6502 (ABNT 1993)                      |
| Limites de Atterberg                    | Não plástico     | NBR6459 (ABNT, 2016); NBR 7180(ABNT 2016) |
| Massa específica<br>( $\text{kg/m}^3$ ) | 3042             | NBR NM 23 (ABNT, 2001)                    |
| Teor de umidade (%)                     | 0,96             | NBR NM 24 (ABNT, 2003)                    |

#### **4.1.2 - Difração de raios X (DRX) da escoria de alto forno**

A composição mineralógica da EAF foi estudada através da difratometria de Raio-X apresentada na Figura 4.2, a análise mostrou as fases cristalinas presentes em que se encontrou uma maior predominância do Quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), apresentando um pico mais ascendente em relação aos picos de Calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) e Hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Os picos encontrados são típicos de calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), em posições e intensidades. O material encontra-se, em grande parte, em estado amorfo, o que indica que a sílica presente na escória é amorfa.

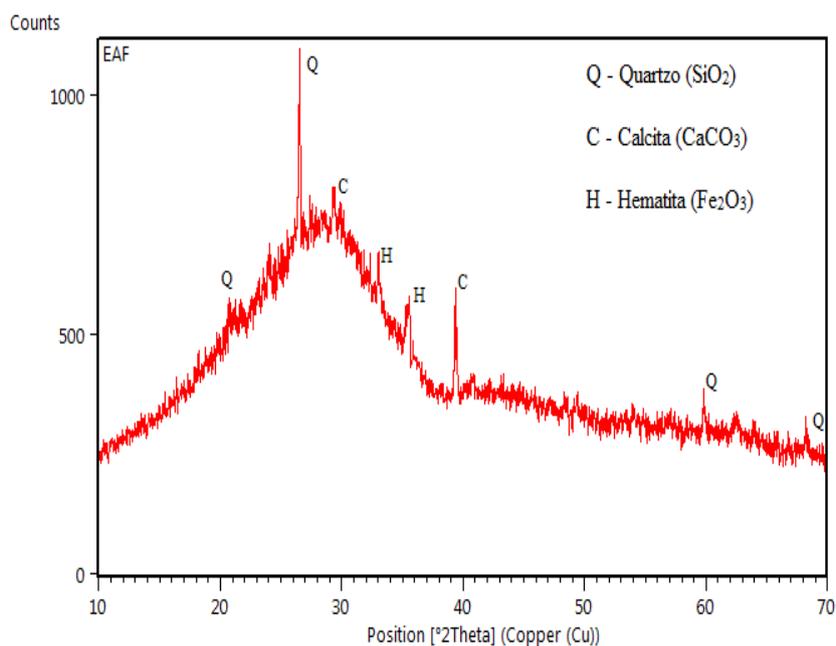


Figura 4.2 - Análise da estrutura cristalina da escória de alto forno por difração de raios-X (DRX).

Os picos de difração apresentados corroboram com a ideia de que, em virtude de resíduo industrial, depositado ao ar livre para o seu resfriamento, gera associações entre os átomos segundo as próprias afinidades, em cristais, fato denominado vitrificação (FUJIYAMA, 2012 e PIMENTEL 2019). Além disso, há a verificação da predominância do mineral quartzo e calcita, bem como a presença de hematita em sua análise de DRX.

A análise de DRX da escória mostra que ela ao passa por um processo de resfriamento lento em condições ambientes, há sua solidificação em um material cristalino de coloração cinza (Vidro). Esse sólido consiste em silicatos cristalizados (Ca-Mg-Al). Apesar da EAF resfriada lentamente apresentar uma estrutura predominantemente cristalina, suas propriedades aglomerantes ainda podem ser exploradas (MOSTAFA *et al.*, 2001), pois as condições de resfriamento da EAF não é o único fator que determina sua atividade pozolânica (DEMOULIAN *et al.*, 1983). Esses experimentos permitem classificar a escória como um material predominantemente inerte, possuindo propriedades semelhante ao de agregados utilizados na construção civil (KALALAGH *et al.*, 2005 e PIMENTEL 2019), que após britagem e separação granulométrica pode ser utilizada como substituto do agregado natural para confecção de concretos (BESHR *et al.*, 2003).

#### 4.1.3 - Características físicas do cimento portland (CP 2 E-32)

A Tabela 4.2 apresenta os resultados das análises encontradas no presente estudo para o cimento do tipo CP II-E32, com suas características químicas, físicas e mecânicas, comparados com os valores fornecidos pelo fabricante. Observou-se que os valores obtidos nos ensaios de caracterização atenderam aos requisitos exigidos pelas normas da NBR 11578 (ABNT, 1991), em suas características químicas, físicas e mecânicas, além de que, os resultados de resistência à compressão mostraram-se superiores aos exigidos pela norma, que, justifica a utilização do cimento CPI.

Tabela 4.2 - Resultados da caracterização química, física e mecânica do cimento Portland CP II - E 32.

| Características | Determinações                                 | Valores<br>Obtidos pelo<br>fabricante | <b>Presente<br/>estudo</b> | Exigências da<br>Norma NBR11578<br>(ABNT,1991) |
|-----------------|---|---------------------------------------|----------------------------|--|
| <b>Química</b>  | Resíduo Insolúvel<br>(%)                      | 2,3                                   | -                          | <2,5%  |
|                 | Perda ao Fogo (%)                             | 4,8                                   | -                          | <6,5%  |
|                 | Óxido de Magnésio-<br>MgO (%)                 | 3,3                                   | -                          | ≤6,5%  |
|                 | Trióxido de Enxofre-<br>SO <sub>3</sub> (%)   | 2,5                                   | -                          | ≤4,0%  |
| <b>Física</b>   | Consistência (mm)                             |                                       | -                          | -  |
|                 | Finura#200 mesh(%)                            | 0,8                                   | <b>7</b>                   | ≤12,0  |
|                 | Finura#325 mesh(%)                            | 6,6                                   | -                          | -  |
|                 | Área Específica<br>(cm <sup>2</sup> /g)       | 3579                                  | -                          | ≥2600  |
|                 | Início da Pega (min)                          | 202                                   | <b>120</b>                 | ≥60  |
|                 | Fim da Pega(min)                              | 273                                   | <b>256</b>                 | ≤600   |
|                 | Massa Específica<br>(g/cm <sup>3</sup> )      | 1,07                                  |                            | -  |
|                 | Massa Específica<br>Real (g/cm <sup>3</sup> ) | 3,01                                  | <b>2,15</b>                | -  |

|                  |                                |   |              |       |
|------------------|--------------------------------|---|--------------|-------|
|                  | Expansibilidade à quente       | 0 | -            | ≤5,0  |
| <b>Mecânicas</b> | Resistencia à compressão (Mpa) |   | -            | -     |
|                  | 3 dias                         |   | <b>15,32</b> | ≥10,0 |
|                  | 7 dias                         |   | <b>32,06</b> | ≥20,0 |
|                  | 28 dias                        |   | <b>44,25</b> | ≥32,0 |

#### 4.1.4 - Características físicas e granulométricas da areia de obra civil

No processo de fabricação das argamassas a granulometria da areia foi totalmente controlada, sendo que, a maior parte da sílica (areia) utilizada neste trabalho ficou abaixo da malha 100# em peneira Tyler, uma vez que, abaixo desta malha, a areia possui morfologia esférica e alta área superficial, estando assim adequada para a conformação dos corpos de prova, bem como para propiciar melhor desempenho para ser usada em conjunto com o resíduo de EAF.

Pelos resultados da Tabela 4.3 e Figura 4.3, observa-se que a areia (sílica) possui um diâmetro médio ( $d_{50}$ ) no valor de 250  $\mu\text{m}$  o que equivale a 0,25 mm. Deste resultado conclui-se que de acordo com o, a que mesma se enquadra como agregado miúdo podendo ser utilizado nas composições das argamassas, cabe ressaltar que parte desse material foi separado na retida de 35# (0,5 mm).

Tabela 4.3 - Caracterização física da areia quartzosa.

| ENSAIOS   | RESULTADO    | NORMAS TÉCNICAS                               |
|---|--------------|---|
| Diâmetro médio ( $\mu\text{m}$ )                            | 250          | NBR 12.653 (ABNT 2014)                        |
| Limites de Atterberg  | Não plástico | NBR 6459 (ABNT, 2016);<br>NBR 7180(ABNT 2016) |
| Massa específica teor de umidade ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) | 1,63         | NBR NM 23 (ABNT, 2001)                        |
| Módulo de finura  | 1,73         | NBR NM 248 (ABNT, 2003)                       |

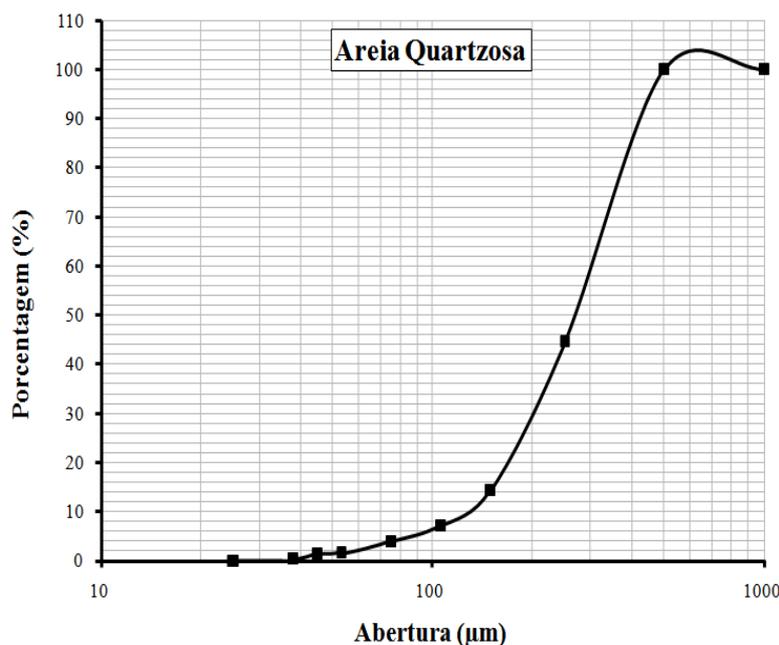


Figura 4.3 - Distribuição granulométrica da areia quartzosa.

## 4.2 - RESULTADOS DE RESISTÊNCIA MECÂNICA PARA OS CORPOS DE PROVA ELABORADOS COM EAF

### 4.2.1 - Resistência à compressão axial

A Figura 4.4 e a Tabela A.1 do apêndice A, apresentam os resultados dos ensaios de resistência à compressão axial. O referido ensaio, foi realizado conforme a NBR 5739 (ABNT, 2018), para obtenção dos resultados da resistência dos corpos de prova nos tempos de 28 dias.

A partir, dos resultados, foi possível observar a ocorrência de um elevado aumento da resistência à compressão em todos os corpos de prova, principalmente para os traços 02 e 04. Esse aumento foi mais acentuado, quando se compara com corpos de prova de referência os quais não tiveram EAF em sua constituição. O elevado aumento de resistência nos corpos de prova analisado, pode ser explicado, devido à escória de alto forno possuir partículas com granulometria bastante finas, resultado de seu processo de vitrificação ocasionando um elevado empacotamento desse material quando em estado fresco.

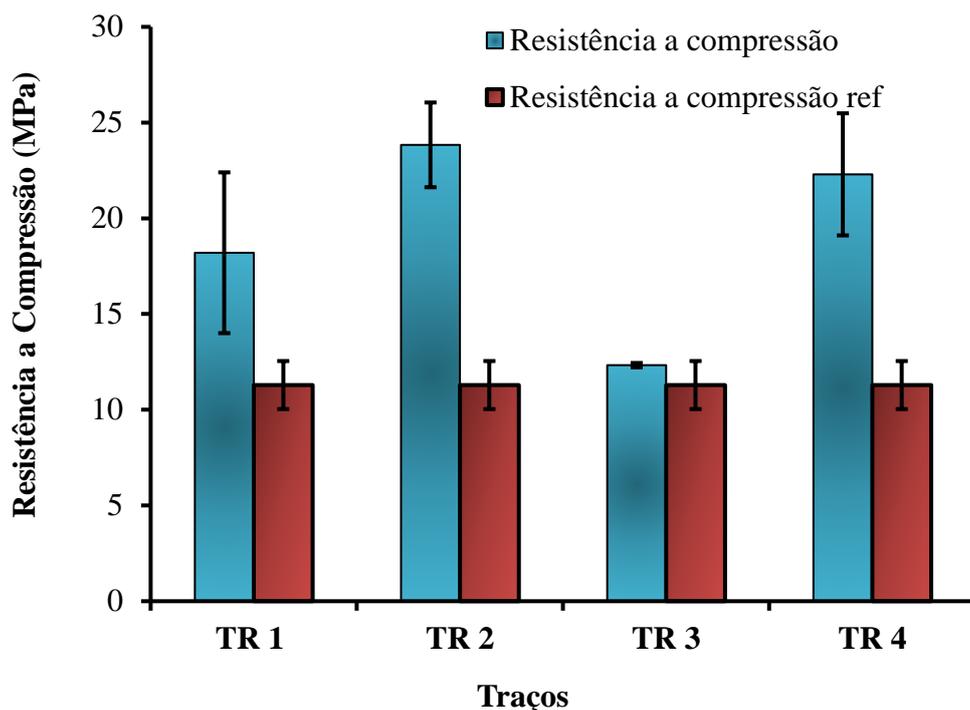


Figura 4.4 - Gráfico de resistência à compressão.

Estudos realizados por Amâncio et al 2020 e Ozturk, et al 2018, também constataram aumento da resistência à compressão com o aumento de escória. Isto pode ser justificado pela forma irregular dos grãos de escória, onde há um melhor intertravamento entre a pasta de cimento e os grãos de escória, melhorando a zona de transição.

Contudo, um efeito diferente do que foi relatado neste estudo, pode ser observado por Lacerda 2016, o qual concluiu que a resistência à compressão da argamassa com agregado de escória foi inferior à argamassa de referência em até em 35% em 7 dias e 12% em 28 dias. Entretanto, no referido trabalho não houve o ajuste granulométrico dos agregados, o que deve ter influenciado nas propriedades mecânicas das argamassas.

De acordo com a norma ABNT NBR 13279, as argamassas do presente estudo, em relação a sua classificação quanto a resistência a compressão, se enquadram na classe P6, conforme a norma de classificação apresentada no Anexo A.1, isto é, possuem resistências a compressão maior que 8 MPa, com destaque os valores Tr 02 e Tr 04, que apresentaram as resistências 23,83 e 22,95 MPa respectivamente.

#### 4.2.2 - Porosidade aparente

No gráfico da Figura 4.5, verifica-se que os corpos de provas aditivados com EAF, tiveram a diminuição em relação aos corpos de prova de referência.

Neste caso, verifica-se que a utilização desse resíduo diminuiu esse efeito, o que pode ser justificado pela diminuição na quantidade de vazios entre as partículas formadas durante o processo de cura, resultando em uma menor porosidade aparente. Esses efeitos podem ser explicados devido esses materiais influenciarem no fator de empacotamento das partículas, moldagem dos corpos de prova e nas reações de hidratação do cimento durante a cura, diminuindo, portanto, a sua porosidade.

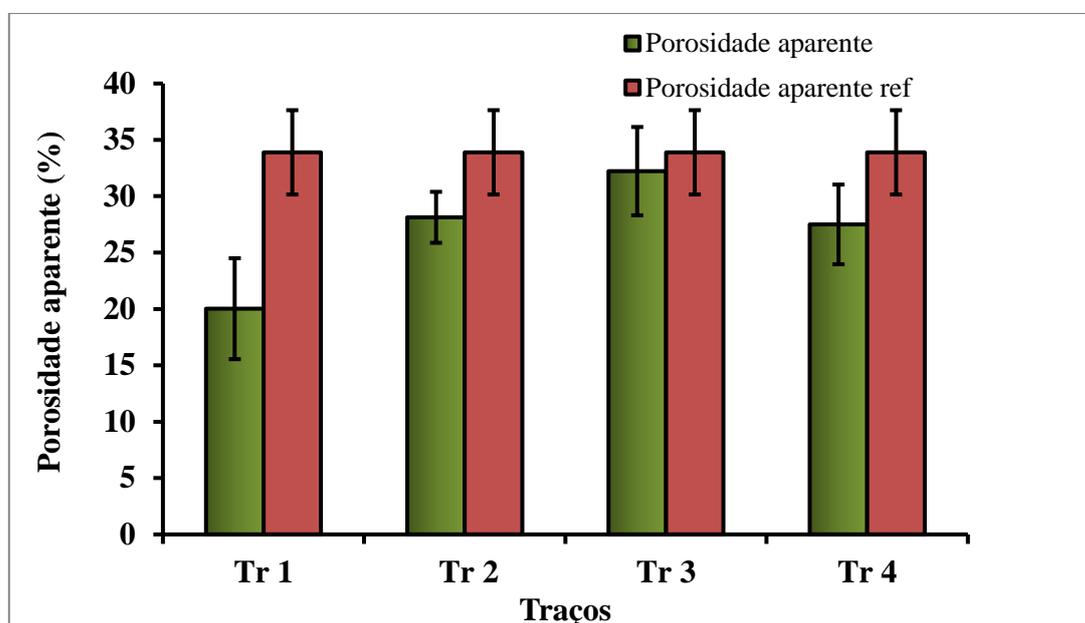


Figura 4.5 - Gráfico de porosidade aparente.

#### 4.2.3 - Correlação entre porosidade aparente e resistência à compressão

No gráfico da Figura 4.6 foi possível correlacionar as variáveis porosidade aparente e resistência a compressão, a relação entre porosidade e resistência, (apresentou uma correlação moderada, a porosidade aumenta com o aumento da perda da resistência, no traço 03 evidenciando que a permeabilidade não depende unicamente da porosidade. Equações empíricas foram utilizadas com frequência na literatura para correlacionar a porosidade com a resistência a compressão, o que provoca acentuada corrosão da fase vítrea e abertura de poros fechados existentes no material aumentando sua porosidade aparente, o que se faz acreditar que a variação de porosidade observada

com mais intensidade nas amostras sem adição de escoria está relacionada a maior quantidade de fase vítrea nesses. Assim, a elevação do módulo de ruptura das amostras aditivadas com quartzo não pode estar relacionada a um aumento (melhora) de empacotamento do sistema, já que foi observado uma nítida diminuição da resistência na amostra 03. Acredita-se que essa melhora na resistência dos corpos, pode estar relacionada ao desenvolvimento de uma microestrutura que, apesar de ter uma menor porosidade aparente, possui uma maior resistência a compressão (SPERANDIO e CARELLI 2019).

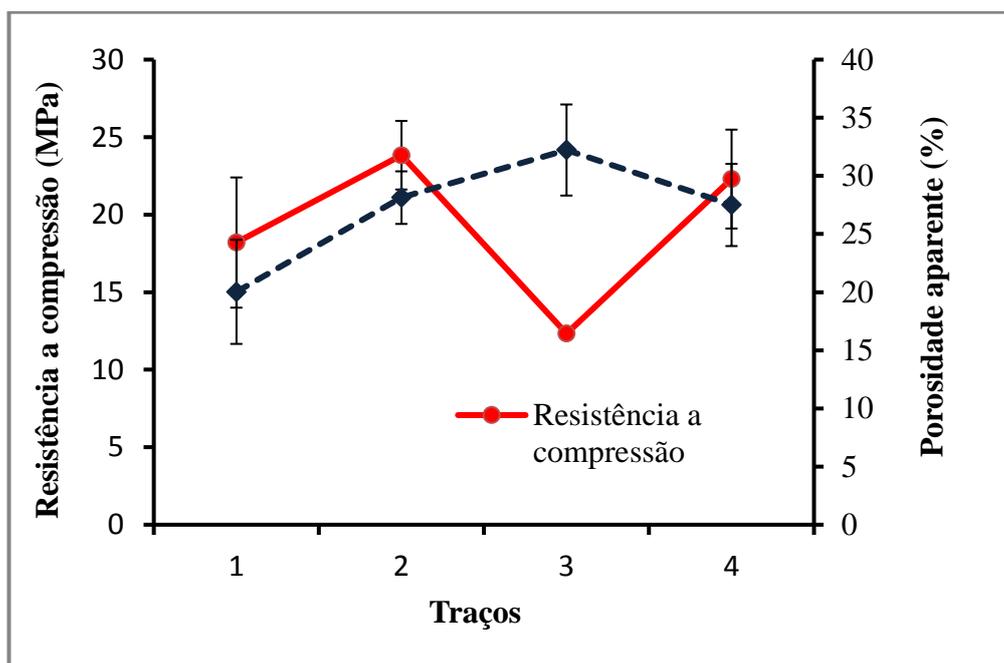


Figura 4.6 - Relação entre resistência compressão e porosidade.

A permeabilidade nos concretos e nas argamassas não depende unicamente da porosidade, contudo, outros fatores tais como: o tamanho e conectividade dos poros podem ser importantes na análise para o melhor entendimento deste processo. PIERALISI *et al.* (2020)

#### 4.2.4 - Absorção aparente e massa específica aparente

As Figuras 4.6 e 4.7 apresentam os resultados das análises de índice de vazio, absorção aparente e massa específica nos tempos de 7 e 28 dias. Verifica-se com os resultados de índice de vazio e absorção que o aumento da adição do resíduo de escoria, implicou no aumento da porosidade, comprovado pela diminuição de resistência nos

traços analisados, observou-se que aos 28 dias houve um aumento pouco significativo em sua porosidade em relação ao traço verificado aos 7 dias, além de aumento relativamente pequenos em relação ao traço de referência em ambos os períodos.

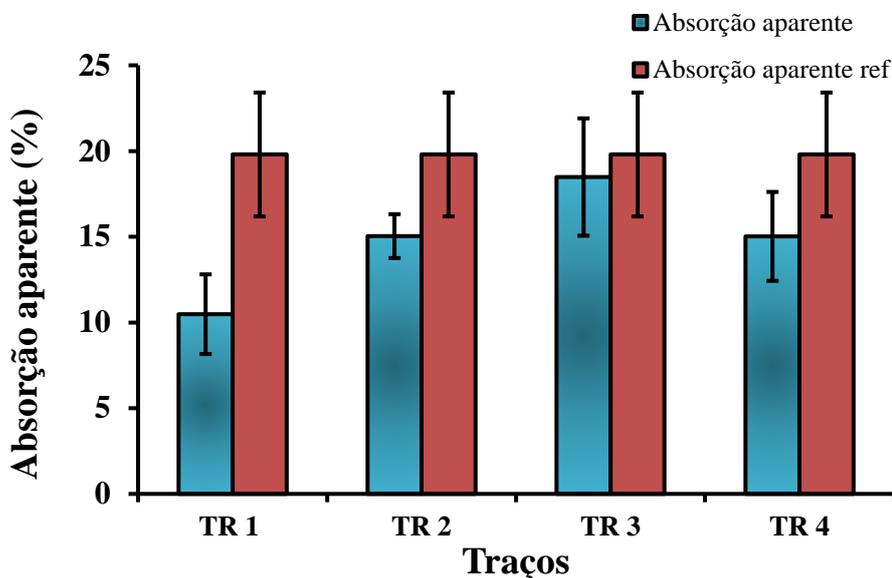


Figura 4.7 - Gráfico do ensaio de absorção.

YUAN (2009) sugere que a EAF interferem no empacotamento das partículas, devido a sua baixa granulometria e na moldagem e nas reações de hidratação do cimento durante a cura, diminuindo, portanto, a porosidade. Todas as amostras apresentaram massas específicas menores se comparadas ao traço de referência demonstrando a influência do resíduo na massa específica da argamassa, resultados semelhantes foram encontrados por TACHARD (2006).

Em relação à massa específica aparente das argamassas, quanto maior a porcentagem de substituição de escória pela areia, maior a massa específica obtida, como pode ser observado na Figura 4.7. Isso se deve ao fato da massa específica da escória de alto forno ser maior que a da areia. Na massa específica aparente do estado endurecido das argamassas de cimento Portland e mistas.

Em relação a classificação conforme a NBR 13281:2005, quanto a massa específica aparente no estado endurecido ( $\text{kg/m}^3$ ) apesar de haver um aumento da massa específica, todas as argamassas investigadas enquadram-se na mesma categoria, classe M6 (massa específica aparente no estado endurecido  $> 1800 \text{ kg/m}^3$ ). Entretanto, conforme a classificação proposta por CARASEK 2018, estabelece que as massas específicas compreendidas entre  $1,40 \text{ g/cm}^3$  a  $2,30 \text{ g/cm}^3$  são classificadas como

normais, com isto, tem-se que as argamassas com o teor de 60% de substituição da areia natural por escória de alto forno é classificada como argamassa pesada.

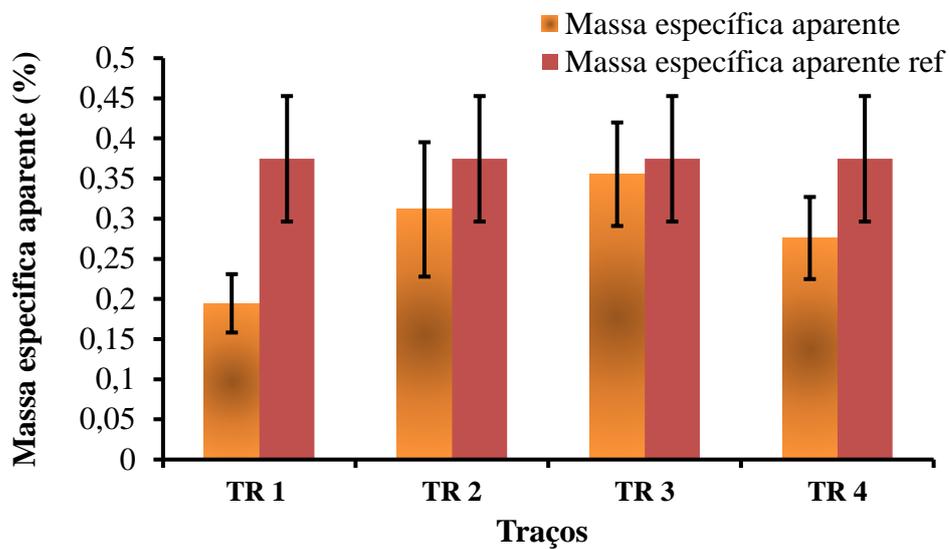


Figura 4.8 - Gráfico de massa específica aparente.

#### 4.2.5 - Correlação entre absorção aparente e massa específica aparente

A absorção aparente, após ser relacionada com a massa específica aparente, demonstrou um comportamento crescente e conforme apresentado no gráfico da Figura 4.9:

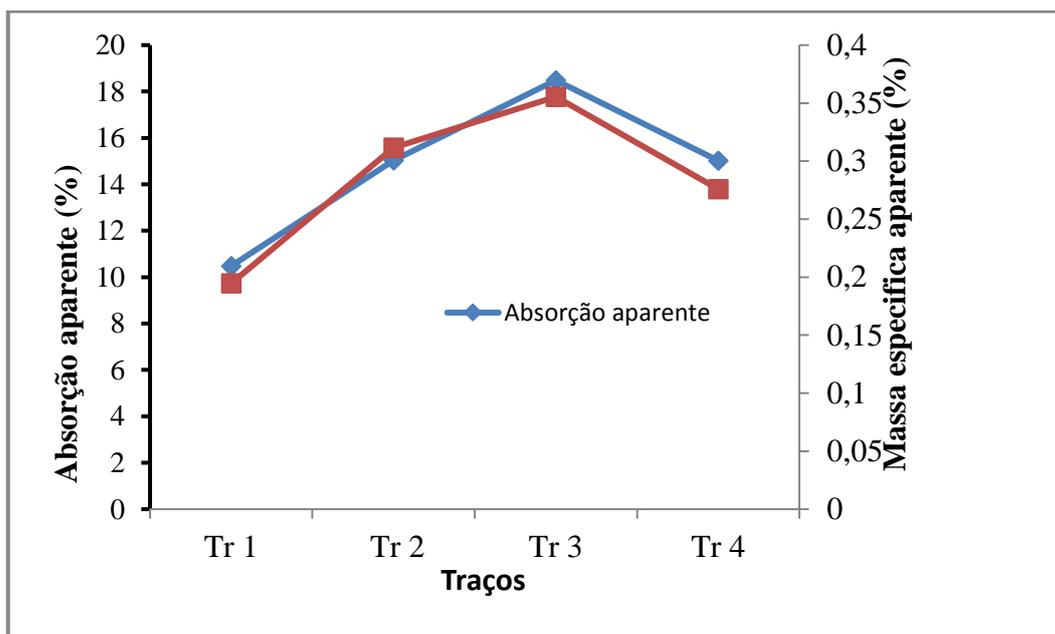


Figura 4.9 - Gráfico de absorção aparente e massa específica aparente.

#### 4.2.6 - Fluorescência de raio – X

A composição química da escória é de grande importância, principalmente para a avaliação de sua reatividade.

Os resultados da análise de FRX apresentados na Tabela 4.4 mostram que a escoria é composta, em sua maioria, por óxidos de Silício ( $\text{SiO}_2$ ), em concentrações de aproximadamente 42,15%. A presença de outros óxidos, tais como:  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ . Observa-se que podem ser consideradas como materiais amorfs devido ao fato de não apresentarem picos característicos e dessa forma uma ausência de um arranjo ordenado e periódico de átomos. Sua composição química é altamente dependente dos minérios encontrado na escória de alto forno, normalmente sílica, cálcio, alumínio, magnésio e oxigênio somam mais de 95% da composição química da escória de alto forno.

Tabela 4.4 - Resultados da FRX do resíduo de escoria de alto forno (EAF).

| Composto                | Concentração m/m(%) |
|-------------------------|---------------------|
| $\text{SiO}_2$          | 42,15               |
| $\text{Al}_2\text{O}_3$ | 16,5                |
| $\text{K}_2\text{O}$    | 1,5                 |
| $\text{Na}_2\text{O}$   | 0                   |
| $\text{MgO}$            | 2,5                 |
| $\text{CaO}$            | 30,2                |
| $\text{Fe}_2\text{O}_3$ | 4,3                 |

Segundo TAYLOR (1997) e LANARO (2016) as composições de maior resistência mecânica apresentam menor cristalinidade nas análises de DRX, com picos mais alargados e menor quantidade de picos do CSH. Isto pode ser observado nas argamassas com escória, pois os valores de resistência à compressão destas foram superiores, sendo que seu difratograma mostrou apenas um pico principal e uma estrutura mais amorfa, o que favorece o processo de vitrificação.

#### 4.2.7 - Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Os corpos de prova analisados via microscopia de varredura foram os correspondentes aos traços TR-02 e TR-03 e TR-04, por apresentarem melhores resultados.

Nos resultados obtidos, apresentados na Figura 4.10, observou-se que, em traços não aditivados com houve um aumento da quantidade de poros na superfície da fratura do material. Pode-se observar que, em sua maioria, a quantidade de poros, como mostra as setas em A e B, possui valores em média entre 67 e 88  $\mu\text{m}$ , provavelmente fazendo com que se tenha a impressão que ocorreu um aumento no seu índice de porosidade, assim contradizendo o ensaio de resistência à compressão. No entanto percebe-se que em C e D nos círculos vermelhos que ocorreu uma perfeita interação entre o cimento a escoria e a areia o que em media torna o material mais compactado o que eleva sua resistência.

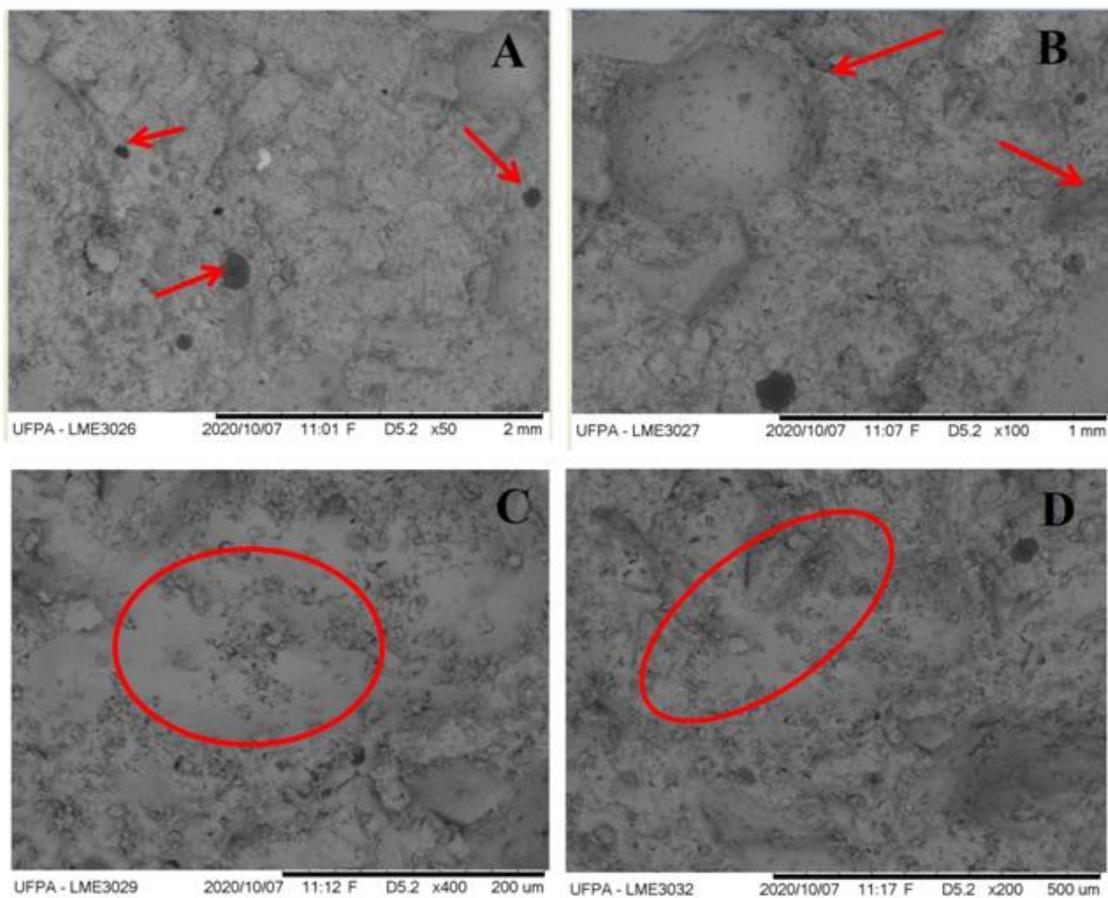


Figura 4.10 - Morfologia dos traços TR-02 e TR-03 e TR-04.

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSÕES E SUGESTÕES

#### 5.1 - CONCLUSÕES

O objetivo geral da pesquisa foi avaliar a viabilidade, do uso de EAF nas propriedades de argamassa elaborada e, com isso, apresentar um modo de reutilização para esse resíduo.

Ressalta-se que os resultados obtidos devem ser comparados, confrontados e mencionados no futuro através de novas pesquisas, que apresentem resultados que possam complementar os parâmetros obtidos nesse estudo. Dentre as principais conclusões vale destacar de acordo com os tópicos abordados:

- O resíduo (EAF), utilizado nesta pesquisa sob condições experimentais que foram estabelecidas, apresentam grande potencial para utilização em argamassas sem função não estrutural, mas com aplicações de resistência elevada, fator esse importante em relação à pesquisa.
- Quanto a caracterização desses materiais as análises de Granulometria a laser mostraram que o material se comporta como areia fina apresentando um  $D_{50}$  de aproximadamente 50,02  $\mu\text{m}$ . As análises de DRX mostram verificação predominância do mineral quartzo e calcita, bem como a presença de hematita em sua análise sendo que o material encontra-se, em grande parte, em estado amorfo e que os mesmos se enquadram dentro da norma a norma NBR 7211 como agregado miúdo.
- Em relação às principais etapas de caracterizações desses materiais, os resultados permitiram concluir que os resíduos estudados se enquadram dentro das características de agregado miúdo e pozolânico realizados de acordo com as normas NBR 7211/2009, NBR 7181/1984, NBR15115/2004.
- Referente ao teor de água na mistura das argamassas, constatou-se que para o resíduo de EAF a relação a/ag de 40% foi a mais adequada nas proporções das misturas por apresentar maiores valores de resistência mecânica, e ao mesmo tempo reduzindo os valores de porosidade aparente para os corpos fabricados.

- Um elevado ganho de resistência para todos os traços analisados e comparados com os traços dos corpos de prova de referência. Isto é, para os traços que tiveram a EAF em sua composição os mesmos apresentaram um ganho maior de resistência, em destaque os traços (Tr 02 e Tr 04)
- Em relação a composição química mostram que a escoria é composta, em sua maioria, por óxidos de Silício ( $\text{SiO}_2$ ). No experimento de fluorescência de raios - X, a EAF em
- O estudo apresentou predominância em sua composição química dos óxidos de silício ( $\text{SiO}_2$ ), cálcio ( $\text{CaO}$ ) e alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ).

## 5.2 - SUGESTÕES

- Avaliar a influência outros aditivos poliméricos no comportamento mecânico e reológico das argamassas produzidas com rejeito da construção civil e cinza volante;
- Avalia modelos reológicos dependentes do tempo no estudo das argamassas produzidas com rejeitos industriais;
- Realizar o estudo econômico da utilização das argamassas produzidas para revestimento e assentamento.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- \_\_\_\_\_. **NBR 7211: Agregados para concreto - Especificação.** Rio de Janeiro, 2009.
- \_\_\_\_\_. **NBR 7215: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão.** Rio de Janeiro, 1996.
- \_\_\_\_\_. **NBR 9778: Argamassa e concretos endurecidos - Determinação da absorção de água por imersão - Índices de vazios e massa específica.** Rio de Janeiro, 1987.
- \_\_\_\_\_. **NBR 10004: Resíduos Sólidos - Classificação.** Rio de Janeiro, 2004.
- \_\_\_\_\_. **NBR 10007: Amostragem de Resíduos.** Rio de Janeiro, 2004.
- \_\_\_\_\_. **NBR 10006: Solubilização de Resíduos.** Rio de Janeiro, 2004.
- \_\_\_\_\_. **NBR 11578: Cimento Portland composto.** Rio de Janeiro, 1991.
- \_\_\_\_\_. **NBR 11768: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland - Requisitos.** Rio de Janeiro, 2011.
- \_\_\_\_\_. **NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura e determinação do índice de consistência.** Rio de Janeiro, 2005.
- \_\_\_\_\_. **NBR NM 23: “Cimento Portland e outros materiais em pó-Determinação da massa específica.** Rio de Janeiro, 2001.
- \_\_\_\_\_. **NBR NM 24: “Materiais Pozolânicos – Determinação do Teor de Umidade”.** Rio de Janeiro, 2003.
- \_\_\_\_\_. **NBR 6457: "Amostras de Solo – “Preparação para Ensaios de compactação e ensaios de caracterização”.** Rio de Janeiro, 1986.
- \_\_\_\_\_. **NBR 10004: Resíduos Sólidos - Classificação.** Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_ **NBR 13749 – Limite de Resistência de aderência à tração.** Rio de Janeiro 1996.

\_\_\_\_\_ **NBR 13530. Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Classificação.** Rio de Janeiro, 1995.

\_\_\_\_\_ **NBR 13279: “Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos- Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão”.** Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_ **NBR 13529 (ABNT, 1995) – Revestimento de paredes e Tetos de argamassas inorgânicas.** Rio de Janeiro, 1995.

\_\_\_\_\_ **NBR 13281: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos- Requisitos.** Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_ **NBR 6502: Rochas e solos.** Rio de Janeiro, 1995.

Associação brasileira de cimento portland. **Guia básico de utilização do cimento portland.** 7.ed. São Paulo: ABCP, 2002.

Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais. **Gestão de Coprodutos: Estudo Prospectivo do Setor Siderúrgico.** (Nota Técnica) (2008) 14.

AGOPYAN, V.; JOHN, V.M. **Durability evaluation on vegetable fibre reinforced materials.**

AMANCIO, F. A.; LIMA, D. A.; DIAS, A. R. O., et al. **Propriedades mecânicas de argamassas com substituição da areia natural por escória de aciaria BSSF (baosteel'sslag short flow)** revista Matéria, v.25, n.1, 2020.

AMICO, S. C. **Vegetables fibers as multifunctional materials.** Revista Matéria, v. 15, n. 2, p. 386-395, 2010.

BAUER, E. *et al.* **Requisitos das argamassas estabilizadas para revestimento.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 11., Porto Alegre, 2015. Anais [...] Porto Alegre, 2015.

BAUER, E.; SOUSA, J. G. G.; GUIMARÃES, E. A. **Estudo da consistência de argamassas pelo método de penetração estática de cone.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, VI., 2005, Florianópolis. **Anais.** Florianópolis: ANTAC, 2005. p. 95-105.

BARRETO, M. L. **Mineração e desenvolvimento sustentável: Desafios para o Brasil.** Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2001. 215 p.

BATTAGIN, A. F. *et al.* **Influência das Condições de cura em algumas propriedades dos concretos convencionais e de alto desempenho.** 44º Congresso Brasileiro do Concreto. Belo Horizonte, IBRACON, 2002.

BEN HABA, M., LE SAOUT, G., WINNEFELD, F. *et al.* **“Influence of activator type on hydration kinetics, hydrate assemblage and microstructural development of alkali activated blast-furnace slags”.** Cement and Concrete Research, v. 41, ed. 3, 301–310 p., 2011.

BESHR, H.; ALMUSALLAM, A. A.; MASLEHUDDIN, M. **Effect of coarse aggregate quality on the mechanical properties of high strength concrete.** Constr. Build. Mater. 17, 97–103, 2003.

BIJEN, J. **Blast furnace slag cement for durable marine structures.** Stichting Bet on Prima: The Netherlands, 1996. 62p. ISBN: 90-71806-24-3.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Pormin. **Recuperação de Áreas Degradadas e Fechamento de Minas.** Disponível em: . Acesso em: 7 de abril de 2020.

BRUM, I. A. S. **Recuperação de áreas degradadas pela mineração (monografia).** Departamento de Hidráulica e Saneamento, Escola Politécnica USP. São Paulo, 2000.

CARASEK, H. *et al.* **Estudo e avaliação de agregados reciclados de resíduo de construção e demolição para argamassas de assentamento e de revestimento.** Cerâmica, v.64, n. 370, p. 288-300, jun. 2018.

CARDOSO, D. N. P.; CARDOSO, D. N. P.; MACEDO, A. N.; MACÊDO, E. N.; RACANELLI, L. A.; SANTOS, W. G.; RODRIGUES, E. C.; OLIVEIRA, R. M.; SILVA, J. A. **Influence of the mixed water content on the mechanical and rheological properties of mortars made with sulfacted copper floating waste fines.** Brazilian Journal of Development, v. 6, p. 41123-41130, 2020.

CASTRO, K. F. **Estudo de Parâmetros Físico-químicos para a Produção de Argamassas Utilizando Resíduos Industriais e da Construção Civil.** 2014. Dissertação (Mestrado Em Engenharia Química) - Programa de Pós Graduação Em Engenharia Química, Universidade Federal do Pará, Belém.

CINCOTTO, M.A.; JOHN, V. M. **Cimento alternativo à base de escória de alto-forno.** Construção São Paulo, n 2204, maio 1990. (Encarte Tecnologia de Edificações).

COIMBRA, M. A.; LIBARDI, W.; MORELLI, M. R. **Utilização de rejeitos de pilha zinco carvão em argamassas e concretos de cimento Portland.** Revista Cerâmica. Vol. 50. n.316. p. 300-307. 2004.

CONTRERAS, M. *et al.* **Arecycling of construction and demolition waste for producing new construction material (Brazil case-study).** Construction and Building Materials, v. 123, p. 594-600, 2016.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA nº 001, de 23/01/86.**

COSTA E SILVA, A. J. **Metais.** Disponível em:. Acesso em: 27 de dezembro de 2019.

COSTA, P. E. F. **Influência da finura e teor de escória na penetração de cloretos no concreto.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa

COSTA, I. **Estudo comparativo entre as argamassas de revestimento externo: preparada em obra, industrializada fornecida em sacos, e estabilizada dosada em central.** Trabalho de Conclusão de Curso, Lajeado, 2016.

COVAS, B. **Resíduos da Construção Civil e o Estado de São Paulo.** Governo do Estado de São Paulo secretaria do Meio Ambiente e Coordenadoria de Planejamento Ambiental, 2012.

DAS, B.; PRAKASH, S.; REDDY, R. S. P.; MISRA, V. N. **Na overview of utilization of slang and sludge from steel industries.** Resources, Concervation and Recycling, v. 50, p. 40-57, 2007.

DEMOULIAN, E.; GOURDIN, P.; HAWTHORN, F.; VERNET, C. **Influence of slags chemical composition and texture on their hydraulicity, 7º International Congresso n the Chemistry of Cement.** Paris, 1980.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL (DNPM). **Gestão de Recursos Minerais como Fator de Desenvolvimento**. In: Congresso Internacional de Direito Minerário. 2010.

ENRÍQUEZ, M. A. R. S. Drummond, J. A. **Mineração e desenvolvimento sustentável dimensões, critérios e propostas de instrumentos**. In: FERNANDES, F.; C., Z.; LUZ, A. B.; MATOS; G. (eds.). Tendências tecnológicas Brasil 2015.

FARIAS, C. E. G. **Mineração e Meio Ambiente no Brasil**. Outubro, 2002. Disponível em: . Acesso em: 7 de março de 2020.

FERNANDES. E. A.; SANTOS, H. I. **Análise de operação da barragem de rejeitos da Mineração serra Grande S.A., Municipio de Crixás**. Goiás. Goiânia 2008.

FLEISSNERN, H. **Blast furnace slag and Its applications – an important by-product of the iron industry**. Scientific American, v. 72, p. 386-400, 1912.

FUJIYAMA, K. **Crystallographic observation and delamination damage analyses for termal barrier coatings under termal exposure**. In: BORISENKO, E. Crystallization and materials Science of modern artificial and natural crystals. Intech, 2012. Cap. 1, p.1-21.

GARCIA, T. L.; NAVES, V. C.; ALVES, J. D.; BARROS, B. de C.; RODRIGUES, C. S. G.; PEREIRA, E. A. A.; ATAIDES, R. L. de A. **Substituição de parte do cimento por finosinertes de pedreira em concretos com baixo fator a/c**. IV Seminário de Iniciação Científica. Goiânia: 2006. Curso de Engenharia Agrícola. Unidade Universitária de Ciências exatas e tecnológicas, Universidade Estadual de Goiás.

GEYER, R. M. T. *et al.* **Escórias Siderúrgicas: caracterização e aplicações para a Indústria da Construção**. Building Research and Information, v. 20, n.4, 1992 p.233-235).

GOMES, A. M.; ALMEIDA, M. L. B.; LOPES, L. E. F. **Controle ambiental das indústrias de ferrogusa em altos-fornos a carvão vegetal**. Belo Horizonte: Projeto Minas Ambiente, 2002. 302p.

GRUEN, R. **Blast furnace slag – what It Is, and how It my be used as a building materials**. Scientific American, v. 125, p. 265-280, 1921.

IAB **Instituto Aço Brasil**. Disponível em: <<http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/numeros/estatisticas.asp?par=201312>>. Acesso em: 20 de julho de 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). **Informações sobre a economia mineral brasileira**. Brasília, 2015. Instituto Aço Brasil, Disponível em: <[http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/biblioteca/relatorio\\_sustentabilidade\\_2012.pdf](http://www.acobrasil.org.br/site/portugues/biblioteca/relatorio_sustentabilidade_2012.pdf)>. Acesso em: 04 de maio de 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). **Mineração & Economia Verde: Encontro da Indústria para a sustentabilidade**. Brasília, 2012

JACOMINO, V. M. F.; CASTRO, L. F. A.; RIBEIRO, E. D. L.; LEÃO, M. M. D.; SOUZA, C. M.; JANTSCH, A. C. A. **Análise da Permeabilidade de Argamassas Estabilizadas Submetidas a Tratamento Superficial com Aditivos Cristalizantes**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

JOHN, V. M. **Cimentos de escória ativada com silicatos de sódio**. São Paulo: EP USP, 1995 (Tese de Doutorado).

KUMMER, L.; BASSETTI, F. de J.; RIELLA, H. G.; AZEVEDO, J. C. R. **Reutilização dos Resíduos de Polimento de Porcelanato e Feldspato na Fabricação de novo produto cerâmico**. Cerâmica Industrial, v.12, p.1 - 5, 2007.

LANGARO, E. A.; ANGULSKI DA LUZ, C.; BUTH, I. S.; MORAES, M.; FILHO, J. I. P.; MATOSKI, A. revista Matéria, v.22, n.1, 2017.

LIMA, R.M.F. e DA LUZ, J.A.M. **Análise granulométrica por técnicas que se baseiam na sedimentação gravitacional: lei de Stokes**. Rev. Escola de Minas, v. 54, n. 2, Ouro Preto, abr/jun., 2001.

LOBATO, N. C. C.; VILLEGAS, E. A.; MANSUR, M. B. **Avaliação de alternativas tecnológicas para o gerenciamento dos resíduos sólidos siderúrgicos: escória e lamas de alto-forno**. XXV Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa & VIII Meeting of the Southern Hemisphere Mineral Technology, Goiânia - GO, 20 a 24 de outubro 2013.

MARTINS, A. *et al.* **Apostila de treinamento de mão de obra para construção civil: Cimento**. Cia. de Cimento Itambé. Curitiba, 2008.

MARTINS, T. **O conceito de desenvolvimento sustentável e seu contexto histórico: algumas considerações.** Jus avigandi, Teresina, ano 9, n. 382, 2004

MASCARENHAS, J. **Sistemas de construção II – paredes.** Ed. livros horizonte, Lisboa, (2003).

MASSUCATO, C. J. **Utilização de escória de alto-forno à carvão vegetal como adição no concreto.** Carlos José Massucato - Campinas, SP: [s.n.], 2005. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.

MECHI, A.; SANCHES, D. L. **Impactos ambientais da mineração no estado de São Paulo.** Revista de Estudos Avançados, v. 24, n. 68, São Paulo, mar. 2010.

MENDES, W. **Dissertação de Mestrado,** Universidade Estadual de Campinas, Brasil, 1999.

MOSTAFA, N. Y.; EL-HEMALY, S. A. S.; AL-WAKEEL, E. I.; EL-KORASHY, S. A.; BROWN, P. W. **Characterization and evaluation of the hydraulic activity of water-cooled slag and air-cooled slag.** Cement and Concrete Research, v. 31, p. 899-904, 2001.

MOURA, C B. **Aderência de revestimentos externos de argamassa em substratos de concreto: influência das condições de temperatura e ventilação na cura do chapisco.** 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

MOURA, L. A. A. **Qualidade e gestão ambiental.** 4. ed. [rev. e atual]. São Paulo: Juarez de Oliveira, 2004.

MENDES, W. **Dissertação de Mestrado.** Universidade Estadual de Campinas, Brasil, 1999.

NENO, C. J. F. **Desempenho de argamassas com incorporação de agregados finos provenientes da trituração do betão.** Lisboa, 2010. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Civil). Universidade Técnica de Lisboa. Dezembro 2010.

NEVILLE, A. **Propriedades do concreto.** São Paulo: Pini, 1997 Building Research and Information, v. 20, n.4, 1992 p.233-235.

NEVILLE, A. M. **Properties of concrete**. Fourth edition, Longman Group Limited, England, pp. 844; (1995).

OLIVEIRA, C. T. A. **Água do poro de pastas endurecidas de cimento de escória**. São Paulo, Escola Politécnica da USP, Tese de Doutorado. 2000.

OLIVEIRA, I.; STUDART, A.; PILLEGI, R.; PANDOLFELLI, V. **Dispersão e em pacotamento de partículas – Princípios e aplicações em processamento cerâmico**. 18ª ed. São Paulo, Fazendo Arte, 2000.

OLIVEIRA, V. C. **Estudo comportamental da formulação, dos requisitos e das propriedades das argamassas estabilizadas de revestimento**. Brasília, 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) –Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

OZTURK, M.; AKGOL, O.; SEVIM, U. K. *et al.* “**Experimental work on mechanical, electromagnetic and microwave shielding effectiveness properties of mortar containing electric arc furnace slag**”, **Construction and Building Materials**, v. 165, pp. 58-63, março 2018.

PAZ, D. H.; LAFAYETTE, K. P. **Forecasting of construction and demolition waste in Brazil**. **Wast Management & Research**, v. 34, p. 708-716, 2016.

PERA, J. State of the art report: use of waste materials in construction in western Europe. In: **Seminário sobre reciclagem e reutilização de resíduos como materiais de construção**. São Paulo, 1996. Anais. São Paulo (PCC-EPUSP), 1996. p.1-20.

PUPATTO, J. G. C.; BÜLL, L. T.; CRUSCIOL, C. A. C.; MAUAD, M.; SILVA, R. H. **Pesquisa Agropecuária Bras.**38. (2003) 1323.

SCHNEIDER JR, S.J., “**Ceramics and Glasses**”, **Engineered Materials Handbook, The Materials Information Society**, 4 ed. Hardbound, Publisher: ASM, 1991.

R. PIERALISI *et al.* **Contribución al desarrollo de una metodología de dosificación para hormigón permeable basada en el desempeño**. **Journal of Urban Technology and Sustainability** 3 (2020) 18-27.

PIMENTEL M. G.; VASCONCELOS, A. L. R.; PICANÇO M. S.; SOUZA J. V. B; MACÊDO, A. N. **Characterization of blast furnace slag from industrial waste**

**aiming its use in construction.** Brazilian Applied Science Review, Braz. Ap. Sci. Rev., Curitiba, v.3, n. 2, p. 895-907, mar./abr. 2019.

PINTO JUNIOR, L.; BORLINE, M.; PEIXOTO, R.; OLIVEIRA, J. **Adição de resíduo de manta cerâmica em argamassa.** Brazilian Journal of Environmental Sciences (Online), 2011.

RODRIGO ZORZALVELTEN, ALEXANDRE PELISSARISANT'ANA, DARIO CARDOSO DE LIMA, CLÁUDIO HENRIQUE DE CARVALHO SILVA, CARLOS ALEXANDRE BRAZ DE CARVALHO, LAURO GONTIJO COUTO E CARLOS CARDOSO MACHADO. **Caracterização mecânica de misturas solo-escória de alto forno granulada moída para aplicações em estradas florestais.** R. Árvore, Viçosa-MG, v.30, n.2, p.235-240, 2006.

ROSSA, J. *et al.* **Adição de escória de alto forno em argamassas colantes tipo AC-I Cerâmica**58 (2012) 542-548.

SPERANDIO, G. S; CARELLI, J. M. **Definição de uma curva de correlação entre a resistência à compressão axial e o índice esclerométrico utilizando diferentes relações água/cimento.** Conhecimento em Construção, Joaçaba, v. 6, p. 73-88, 2018/2019.

SCANDOLARA, J. P. **Propriedades de argamassas obtidas pela substituição parcial de cimento Portland por rejeitos particulados de tijolos.** Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais. Joinville: Ed. UESC, 2010. [Dissertação de Mestrado].

SOUZA, C. S. **Análise energética do processo de produção de ferro gusa em altos-fornos: Identificação de oportunidades em redução de emissões de gases de efeito estufa.** Aracruz, 2010. 41f. Dissertação (Mestrado Profissional em Tecnologia Ambiental), Faculdade de Aracruz. Aracruz, 2010.

SILVA, A. R. B. **Potencialidades minerais na Amazônia. Boletim da Mineração.** Ano III. Número 20. Brasília/DF: IBRAM, 2008.Civil. In: Seminário de Redução e Matérias-Primas Resíduos na Siderurgia, 25. Volta Redonda, RJ. Anais. Volta Redonda, 1994, p.363- 381 Maria, Santa Maria, 2001.

SILVA, D. A. **Efeitos dos polímeros HEC e EVA na microestrutura de pastas de cimento portland.** Florianópolis: Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC, Universidade Federal de Santa Catarina- UFSC, (2001).

SIQUEIRA, J. S. de. **Reciclagem de resíduo a partir de cinzas de carvão mineral: produção de argamassas.** 2011. 91 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Belém, 2011. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química.

TACHARD, A. L. R. S. **Avaliação da Resistência de Argamassas de Cimento Portland Contendo Serragem de Couro Tratada em Meio Ácido.** Dissertação (Mestrado). Universidade de São Carlos, São Carlos (SP), 2006.

TAYLOR, H. F. W. **Cement Chemistry.** 2 ed, Thomas Telford, 1997.

VELTEN, R. Z.; Sant’Ana, A. P.; de Lima, D. C.; Silva, C. H. C.; de Carvalho, C. A. B.; Couto, L. G.; Machado, C. C.; **Revista Árvore**, 2006, 30, 235.

YUAN, S. Y. **Estudo da influência da adição de serragem de couro tratada quimicamente nas características de argamassas de cimento portland.** Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Carlos, São Carlos (SP), 2009.

ZEGHICHI, L. **The effect of replacement of naturals aggregates by slag products on the strength of concrete.** Asian Journal of Civil Engineering, v. 7, p. 27-35, 2006.

## APÊNDICE A

### MATRIZES E TABELAS DE PROPORÇÃO

Tabela A.1 - Massa total da mistura para elaboração de 1 corpo de prova.

|                          | (g)      |
|--------------------------|----------|
| <b>1 corpo-de-prova</b>  | 400      |
| <b>4 corpos-de-prova</b> | 1.200,00 |
| <b>Extra</b>             | 250,00   |
| <b>Mtotal</b>            | 2.750,00 |

Água = 480g

## APÊNDICE B

### RESULTADOS

As tabelas abaixo apresentam todos os dados obtidos nos ensaios de absorção por imersão, porosidade aparente e resistência à compressão

Tabela B.1 - Ensaio de absorção nos traços de argamassa.

| Traços               | Massa Seca | Massa Úmida | Massa Imersa | Absorção Aparente |
|----------------------|------------|-------------|--------------|-------------------|
| TR-01                | 92         | 104         | 56           | 13,04             |
|                      | 94         | 102         | 53           | 8,51              |
|                      | 91         | 100         | 52           | 9,90              |
| <b>Média</b>         | 92,33      | 53,7        | 53,66        | 10,5              |
| <b>Desvio Padrão</b> | 1,53       | 2,12        | 2,08         | 2,32              |
| TR-02                | 90         | 102         | 54           | 13,33             |
|                      | 92         | 105         | 56           | 14,13             |
|                      | 69         | 80          | 43           | 15,94             |
| <b>Média</b>         | 80,5       | 92,5        | 49,5         | 15,03             |
| <b>Desvio Padrão</b> | 16,26      | 17,67       | 9,19         | 1,28              |
| TR-03                | 82         | 95          | 50           | 15,85             |
|                      | 87         | 102         | 54           | 17,24             |
|                      | 85         | 104         | 52           | 22,35             |
| <b>Média</b>         | 84,66      | 100,33      | 52           | 18,48             |
| <b>Desvio Padrão</b> | 2,51       | 4,72        | 2            | 3,42              |
| TR-04                | 90         | 104         | 57           | 15,55             |
|                      | 89         | 104         | 54           | 16,85             |
|                      | 91         | 103         | 55           | 13,18             |
| <b>Média</b>         | 90         | 103,5       | 54,5         | 15,02             |
| <b>Desvio Padrão</b> | 1,41       | 0,70        | 0,7          | 2,59              |
| TR05                 | 82         | 95          | 50           | 15,85             |
|                      | 87         | 102         | 54           | 17,24             |
|                      | 85         | 104         | 52           | 22,35             |
| <b>Média</b>         | 86         | 103         | 53           | 19,79             |
| <b>Desvio Padrão</b> | 1,41       | 1,41        | 1,41         | 3,61              |

Tabela B.2 - Ensaio de porosidade aparente nos traços de argamassa.

| Traços               | Massa Seca | Massa Úmida | Porosidade Aparente | Massa específica aparente | COMPRESSÃO |
|----------------------|------------|-------------|---------------------|---------------------------|------------|
| TR-01                | 92         | 104         | 25                  | 0,23                      | 14,25      |
|                      | 94         | 102         | 16,32               | 0,16                      | 17,74      |
|                      | 91         | 100         | 18,75               | 0,19                      | 22,61      |
| <b>Média</b>         | 92,33      | 53,7        | 20,02               | 0,19                      | 18,2       |
| <b>Desvio Padrão</b> | 1,53       | 2,12        | 4,47                | 0,03                      | 4,19       |
| TR-02                | 90         | 102         | 25                  | 0,24                      | 19,14      |
|                      | 92         | 105         | 26,53               | 0,25                      | 25,4       |
|                      | 69         | 80          | 29,72               | 0,37                      | 22,27      |
| <b>Média</b>         | 80,5       | 92,5        | 28,13               | 0,311                     | 23,83      |
| <b>Desvio Padrão</b> | 16,26      | 17,67       | 2,26                | 0,083                     | 2,21       |
| TR-03                | 82         | 95          | 28,8                | 0,317                     | 12,25      |
|                      | 87         | 102         | 31,25               | 0,31                      | 12,30      |
|                      | 85         | 104         | 36,53               | 0,42                      | 12,41      |
| <b>Média</b>         | 84,66      | 100,33      | 32,22               | 0,355                     | 12,33      |
| <b>Desvio Padrão</b> | 2,51       | 4,72        | 3,917               | 0,06                      | 0,11       |
| TR-04                | 90         | 104         | 29,78               |                           | 21,41      |
|                      | 89         | 104         | 30                  | 0,312                     | 24,55      |
|                      | 91         | 103         | 25                  | 0,23                      | 20,04      |
| <b>Média</b>         | 90         | 103,5       | 27,5                | 0,27                      | 22,295     |
| <b>Desvio Padrão</b> | 1,41       | 0,70        | 3,535               | 0,05                      | 3,18       |
| TR-05                | 82         | 95          | 28,88               | 0,317                     | 12,25      |
|                      | 87         | 102         | 31,25               | 0,319                     | 12,30      |
|                      | 85         | 104         | 36,53               | 0,423                     | 12,41      |
| <b>Média</b>         | 86         | 103         | 33,81               | 0,37                      | #DIV/0!    |
| <b>Desvio Padrão</b> | 1,41       | 1,41        | 3,73                | 0,07                      | #DIV/0!    |

Tabela B.3 - Ensaio de resistência à compressão nos traços de argamassa elaborados com escoria.

| Traços               | Resistência à Compressão (Mpa) |
|----------------------|--------------------------------|
| TR-01                | 14,25                          |
|                      | 17,74                          |
|                      | 22,61                          |
| <b>Média</b>         | 18,2                           |
| <b>Desvio Padrão</b> | 4,19                           |
| TR-02                | 19,14                          |
|                      | 25,4                           |
|                      | 22,27                          |

|                      |                         |
|----------------------|-------------------------|
| <b>Média</b>         | 23,83                   |
| <b>Desvio Padrão</b> | 2,21                    |
| TR-03                | 12,25<br>12,30<br>12,41 |
| <b>Média</b>         | 12,33                   |
| <b>Desvio Padrão</b> | 0,11                    |
| TR-04                | 21,41<br>24,55<br>20,04 |
| <b>Média</b>         | 22,295                  |
| <b>Desvio Padrão</b> | 3,18                    |
| TR-05                | 12,25<br>12,30<br>12,41 |
| <b>Média</b>         | #DIV/0!                 |
| <b>Desvio Padrão</b> | #DIV/0!                 |

## ANEXO I

### CLASSIFICAÇÃO DAS ARGAMASSAS

Tabela I.1 - Classificação das argamassas, quanto a resistência a compressão ABNT, NBR 13279-Resistência a compressão em Mpa.

| <b>Resistência à compressão (Mpa)- ABNT NBR 13279</b> |                                       |
|---|---------------------------------------|
| <b>Classe</b>   | <b>Resistência à compressão (Mpa)</b> |
| P1  | < 2,0                                 |
| P2  | 1,5 a 3,0                             |
| P3  | 2,5 a 4,5                             |
| P4  | 4,0 a 6,5                             |
| P5  | 5,5 a 9,0                             |
| P6  | >8,0                                  |