



Paulo Rafael Nunes e Silva Albuquerque

**FABRICAÇÃO DE TELHA DE  
CONCRETO COM A UTILIZAÇÃO  
DO RESÍDUO DA BAUXITA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

Instituto de Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Dissertação Orientada pelo professor Marcelo de Souza Picanço

Belém – Pará – Brasil

2022

Universidade Federal do Pará  
Instituto de Tecnologia  
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil



**Paulo Rafael Nunes e Silva Albuquerque**

## **Fabricação de telha de concreto com a utilização do resíduo da bauxita**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço  
Coorientador: Prof. Dr. Wener Miranda Teixeira dos Santos

**Belém**  
**Mai de 2022**

## **CESSÃO DE DIREITOS**

AUTOR: Paulo Rafael Nunes e Silva Albuquerque.

TÍTULO: Fabricação de telha de concreto com a utilização do resíduo da bauxita.

GRAU: Mestre

ANO: 2022

É concedida à Universidade Federal do Pará permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

---

**Paulo Rafael Nunes e Silva Albuquerque.**

Av. Augusto Correa, nº1, Campus Universitário do  
Guamá, Laboratório de Engenharia Civil, Belém, Pará  
CEP 66075-970

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD  
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará  
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

---

A345f Albuquerque, Paulo Rafael Nunes E Silva.  
Fabricação de telha de concreto com a utilização do resíduo da  
bauxita / Paulo Rafael Nunes E Silva Albuquerque. — 2022.  
cxxvii, 127 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço  
Coorientador(a): Prof. Dr. Wener Miranda Teixeira dos Santos  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,  
Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil, Belém, 2022.

1. Resíduo da bauxita. 2. Substituição de areia. 3.  
Desempenho. 4. Telha de concreto. 5. Propriedades  
mecânicas. I. Título.

---

CDD 624



## FABRICAÇÃO DE TELHA DE CONCRETO COM A UTILIZAÇÃO DO RESÍDUO DA BAUXITA


AUTOR:

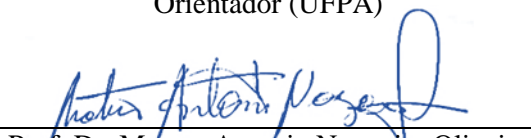
**PAULO RAFAEL NUNES E SILVA ALBUQUERQUE**

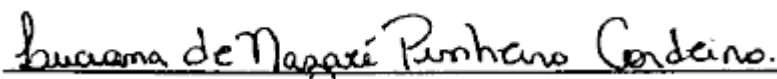
DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL DO INSTITUTO DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ, COMO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL NA ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL.

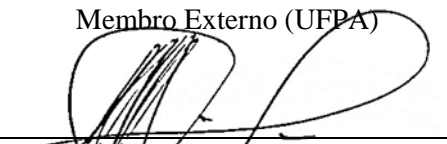
APROVADO EM: 12/05/2022.

BANCA EXAMINADORA:


  
Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço  
Orientador (UFPA)

  
Prof. Dr. Mateus Antonio Nogueira Oliveira  
Membro Externo (UFMG)

  
Profa. Dra. Luciana de Nazaré Pinheiro Cordeiro  
Membro Externo (UFPA)

  
Prof. Dr. Alcebíades Negrão-Macêdo  
Membro Interno (UFPA)

Visto:

  
Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço  
Coordenador do PPGEC / ITEC / UFPA

*“ Nem tudo que se enfrenta pode ser modificado, mas  
nada pode ser modificado até que seja enfrentado ”*

*(Albert Einstein)*

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, meu Pai que sempre esteve comigo, me dando forças para que eu chegasse até aqui.

Ao Prof. Dr. Marcelo Picanço que me orientou na pesquisa.

Agradeço à minha mãe, Maria Selma, pelas conversas, orações, apoio incondicional, conselhos, carinho, dedicação e ensinamentos que me motivam a continuar caminhando em direção aos meus sonhos.

Também agradeço à minha irmã, Paula Raíssa, que sempre esteve ao meu lado, me instruindo através de conselhos que foram essenciais para mim, mesmo morando em outro estado. Meu pai, Paulo Viana, que também é sempre presente na minha vida, me tranquilizando nos momentos mais turbulentos, além de sempre me estimular a estudar.

Aos meus amigos e companheiros de vida acadêmica, Myrela, Moisés, Mariana e Bruna, que sempre estiveram ao meu lado apoiando e aconselhando.

Ao laboratorista Jurandir, que quando possível, me auxiliou nos ensaios necessários para a realização da pesquisa.

Ao Laboratório de Concreto e Materiais pela disponibilização dos equipamentos e materiais necessários para a produção dos ensaios.

Aos meus amigos da igreja, enviados por Deus, que se mostraram sempre disponíveis para ajuda e se encontravam nos melhores e piores momentos desta fase da pesquisa. Em especial, Laura Correia e Francisco, peças fundamentais para que eu conseguisse concluir a pesquisa.

À minha amiga e parceira de vida, Camilla Arraiz, que se mostrava sempre disposta a me ajudar.

Aos meus queridos e amados amigos da época de escola, Ana Clara Pires, Daniel Gomes, Gabriela Farias, Marina Almeida, Juliana Leite, Lucas Henrique e Mariana Protázio que me acompanharam durante todo esse período da minha vida.

Enfim, agradeço a todos que direta e indiretamente me ajudaram, torceram por mim e contribuíram para que eu chegasse até aqui

## RESUMO

ALBUQUERQUE, P. R. N. S. **Fabricação de telha de concreto com a utilização do resíduo da bauxita**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Pará. Belém, 2022.

Ao longo dos anos, a atividade mineradora tem sido responsável pelas inúmeras alterações do equilíbrio ecológico. O processo de beneficiamento da bauxita, por exemplo, é uma das atividades que gera resíduos com potencial de impacto ambiental negativo, como o resíduo da bauxita. No entanto, estudos vêm sendo desenvolvidos a fim de encontrar soluções na incorporação deste rejeito na indústria da construção civil como um material alternativo. Neste sentido o objetivo desta pesquisa é fornecer subsídios técnicos quanto ao uso do resíduo da bauxita na fabricação de telhas de concreto utilizando-o *in natura* como substituto parcial da areia. Para tanto, foi realizada a caracterização do resíduo da bauxita do ponto de vista físico, químico, mineralógico e morfológico, bem como caracterização do agregado miúdo e cimento. A partir dessas análises foram produzidos corpos de prova argamassados (cilíndricos e prismáticos) com porcentagens de 0, 15, 30, 45 e 60% de substituição parcial da areia pelo resíduo da bauxita em massa. Em seguida foram efetuados ensaios para determinar as propriedades mecânicas, morfológicas, químicas, mineralógicas e ambientais. E por fim, a última etapa, que foi a produção de telhas de concreto com substituição da areia pelo resíduo com a porcentagem de 30%, que foi a que obteve os melhores resultados físico-mecânicos entre as amostras com o rejeito da bauxita na etapa II, analisando algumas de suas propriedades mecânicas. Para as telhas de concreto produzidas com 30% de resíduo da bauxita em substituição à areia, foram analisados o peso seco, permeabilidade, absorção e carga de ruptura à tração na flexão. Observou-se, por exemplo, que aos 28 dias de cura, a carga média de ruptura à tração na flexão foi de 2443,85 N e aos 60 dias foi de 3243,517 N, valores superiores ao exigido por norma. Após a análise dessas características, concluiu-se que o resíduo da bauxita, indicou o seu uso como proposta viável na forma de substituição do agregado miúdo *in natura* para a fabricação de telhas de concreto, pois as telhas fabricadas apresentaram resultados satisfatórios frente aos limites exigidos pela norma NBR 13858-2 (ABNT, 2009), demonstrando assim, potencial uso na indústria da construção civil.

**Palavras-chave:** Resíduo da bauxita. Substituição de areia. Desempenho. Telha de concreto. Propriedades mecânicas.

## ABSTRACT

ALBUQUERQUE, P. R. N. S. **Manufacture of concrete tile using bauxite residue.** **Dissertação de Mestrado.** Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Pará. Belém, 2022.

The mining sector has been responsible for many environmental impacts throughout history due to its by-products and The Bayer Process residue is well known as bauxite residue. Studies have been developed in order to incorporate this residue as an alternative material in construction. In this sense, the aim of this research is to evaluate and provide technical data regarding the use of bauxite residue in the manufacture of concrete tiles, using it raw as partial replacement for sand. The bauxite residue considered was characterized regarding its physical, chemical, mineralogical and morphological properties, as well fine aggregate and cement were characterized (step I). Mortar specimens (cylindrical and prismatic) were produced with percentages of 0, 15, 30, 45 and 60% considering partial mass replacement of sand by bauxite residue (step II). Ultimately, tests were carried out to determine the mechanical, morphological, chemical, mineralogical and environmental properties. The last step (III) was concrete tiles production with sand replacement by the residue at 30%, which was the percentage that obtained the best physical-mechanical results among the samples analyzed in step II. For the concrete tiles produced with 30% replacement, the dry weight, permeability, absorption and breaking load in flexural strength were analyzed. At 28 days of curing, the average breaking load in flexural strength was 2443.85 N while at 60 days it was 3243.517 N, values \_\_\_ higher than minimum standard requirement. Therefore, raw bauxite residue is indicated as sustainable alternative for partial sand replacement for concrete tiles, since the manufactured tiles presented adequate results as NBR 13858-2 (ABNT, 2009) requirements, thus demonstrating its potential use in construction industry.

Keywords: Bauxite residue. Replacement. Mortar. Concrete tile. Mechanical properties.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Bauxita - matéria prima do alumínio. ....	22
Figura 2.2: Mineração da bauxita, alumina e alumínio primário no Brasil.....	25
Figura 2.3: Alumina / Óxido de alumínio. ....	28
Figura 2.4: Evolução cronológica dos métodos de produção de alumina. ....	30
Figura 2.5: Processo Bayer.....	31
Figura 2.6: Exemplo de estocagem a seco de resíduo de bauxita (dry-stacking).....	34
Figura 2.7: Lagoa de disposição de resíduo de bauxita.....	35
Figura 2.8: Perfil de um lago de resíduos.....	36
Figura 2.9: Distribuição granulométrica do resíduo de bauxita da Grécia.....	37
Figura 2.10: Distribuição granulométrica do resíduo de bauxita brasileira. ....	38
Figura 2.11: Difração de raio X do resíduo de bauxita. ....	41
Figura 2.12: Difração de raio x (resíduo de bauxita).....	42
Figura 2.13: Micrografia do resíduo de bauxita obtida por MEV.....	43
Figura 2.14: Micrografia do resíduo de bauxita obtida por MEV.....	43
Figura 2.15: Componentes da pasta.....	48
Figura 2.16: Componentes da argamassa. ....	48
Figura 2.17: Componentes do concreto simples.....	48
Figura 2.18: Telha de concreto.....	51
Figura 2.19: Telha de concreto.....	51
Figura 2.20: Processo de fabricação de telha de concreto. (a): peneiramento da areia. (b): esteira. (c): misturador. (d): extrusora. ....	54
Figura 2.21: Dispositivos presentes nas telhas. ....	55
Figura 3.1: Lagos de resíduo da bauxita no Maranhão.....	60
Figura 3.2: Fluxograma da metodologia da pesquisa (etapa 1).....	62
Figura 3.3: Fluxograma da metodologia da pesquisa (etapa 2).....	62
Figura 3.4: Fluxograma da metodologia da pesquisa (etapa 3).....	64
Figura 3.5: Materiais pesados pronto para serem misturados. ....	67
Figura 3.6: CP's cilíndricos.....	68
Figura 3.7: CP's prismático.....	68
Figura 3.8: Equipamento Micromeritics, modelo AccuPyc II 1340.....	69
Figura 3.9: Equipamento Malvern Panalytical, modelo Zetium. ....	70
Figura 3.10: Difratorômetro de raio X.....	71
Figura 3.11:Quanta 650FEG, FEI.....	72
Figura 3.12: CP cilíndrico submetido ao ensaio de resistência à compressão. ....	73
Figura 3.13: CP's prismáticos moldados em forma de madeira. ....	75
Figura 3.14: CP prismático na iminência de ser rompido. ....	75
Figura 3.15: Maquinário utilizado para a fabricação das telhas desta pesquisa. ....	76
Figura 3.16: Formas metálicas usadas para a fabricação das telhas.....	77
Figura 3.17: Telha de concreto produzida com resíduo da bauxita.....	78
Figura 3.18: Ensaio de impermeabilidade.....	80

Figura 3.19: Ensaio de resistência à tração na flexão das telhas. ....	81
Figura 4.1: Curva granulométrica do cimento CP IV.....	83
Figura 4.2: Granulometria do agregado miúdo. ....	85
Figura 4.3: Curva granulométrica do RB. ....	87
Figura 4.4: Difratoograma de raio-x do RB. ....	90
Figura 4.5: Fases identificadas. ....	90
Figura 4.6: MEV do resíduo da bauxita (A, B, C e D).....	91
Figura 4.7: MEV (A) (C) e EDS (B) (D) do RB. ....	92
Figura 4.8: Resistências médias à compressão dos traços estudados (0, 15%, 30%, 45% e 60%) em função dos dias de cura (3, 7 e 28 dias). ....	94
Figura 4.9: Massa específica aparente das argamassas estudadas aos 28 dias de cura. ....	97
Figura 4.10: Absorção de água total e índice de vazios das argamassas estudadas aos 28 dias. ....	97
Figura 4.11: MEV da amostra Aref (a), A15RB (b), A30RB (c), A45RB (d) e A60RB (e)....	99
Figura 4.12: EDS da amostra Aref. ....	100
Figura 4.13: EDS da amostra A15RB. ....	101
Figura 4.14: EDS da amostra A30RB. ....	102
Figura 4.15: EDS da amostra A45RB. ....	102
Figura 4.16: EDS da amostra A45RB. ....	103
Figura 4.17:Difratoograma das amostras com 28 dias de cura.....	106
Figura 4.18: Resistência média à tração na flexão dos traços estudados. ....	108
Figura 4.19: Representação da distância "d". ....	110
Figura 4.20: Gráfico comparativo de peso seco das telhas.....	110
Figura 4.21: Gráfico comparativo de absorção das telhas.....	111
Figura 4.22: Resultado do teste de impermeabilidade.....	112
Figura 4.23: Gráfico comparativo de cargas da ruptura à tração na flexão das telhas. ....	114

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Parâmetros de consumo da alumina. ....	29
Tabela 3.1: Ensaio de caracterização do resíduo da bauxita.....	61
Tabela 3.2: Especificação dos CP's argamassados cilíndricos.....	65
Tabela 3.3: Especificação dos CP's argamassados prismáticos.....	66
Tabela 3.4: Determinação dos traços para produção de argamassas.....	66
Tabela 3.5: Quantidade de telhas de concreto por ensaio.....	78
Tabela 4.1: Características avaliadas - cimento Portland CP IV.....	83
Tabela 4.2: Composição química do cimento.. ....	84
Tabela 4.3: Caracterização granulométrica do agregado miúdo. ....	84
Tabela 4.4: Características físicas do agregado miúdo.....	85
Tabela 4.5: Características avaliadas - resíduo da bauxita. ....	87
Tabela 4.6: Análise química do resíduo da bauxita.....	88
Tabela 4.7: Resistência média à tração na flexão.....	107
Tabela 4.8: Peso seco das telhas de concreto 30%.....	109
Tabela 4.9: Resultado de absorção para a telha de concreto 30%.....	111
Tabela 4.10: Resultado da carga de ruptura à tração na flexão para a telha de concreto 30%. .....	113

## LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1: Produção de bauxita, alumina e alumínio primário em escala global. ....	23
Quadro 2.2: Produção de bauxita, alumina e alumínio primário no Brasil. ....	24
Quadro 2.3: Principais empresas que atuam no ramo da mineração da bauxita no Brasil. ....	25
Quadro 2.4: Características dos três principais minerais que compõem a bauxita. ....	27
Quadro 2.5: Composição química do resíduo da bauxita. ....	40
Quadro 2.6: Valores limites da geometria da telha. ....	55
Quadro 2.7: Limites exigidos pela NBR 13858 – 2. ....	56
Quadro 2.8: Classe do perfil em função da profundidade da telha e da carga de ruptura à flexão. ....	57
Quadro 4.1: FRX das amostras estudadas aos 28 dias de cura. ....	105
Quadro 4.2: Resultado dos parâmetros inorgânicos – lixiviação. ....	107

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABAL	Associação Brasileira de Alumínio
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BBC	British Broadcasting Corporation
CETEM	Centro de Tecnologia Mineral
CP IV	Cimento Portland Pozolânico
CP's	Corpos de prova
DRX	Difração de raio x
EPA	Environmental Protec्य Agency
FRX	Fluorescência de raio x
IBRACON	Instituto Brasileiro de Concreto
LCT	Laboratório de Caracterização Tecnológica
LEC	Laboratório de Engenharia Civil
MA	Maranhão
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
NBR	Norma Brasileira Registrada
NM	Norma Mercosul
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
RB	Resíduo da bauxita
SEBRAE	Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas
UEMA	Universidade Estadual do Maranhão
UFMA	Universidade Federal do Maranhão
UFPA	Universidade Federal do Pará
USDA	United States Departament of Agriculture
USGS	United States Geological Survey
USP	Universidade de São Paulo

## LISTA DE SÍMBOLOS

%	Percentual
a/c	Água/cimento
g	Grama
g/cm <sup>3</sup>	Gramas por centímetro cúbico
kg	Quilograma
mm	Milímetro
mm <sup>2</sup>	Milímetros quadrados
N	Newton
°C	Grau Celsius
cm <sup>3</sup>	centímetro cúbico
m <sup>2</sup> /g	metros quadrados por grama

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>17</b>
1.1 Justificativa.....	19
1.2 Objetivos .....	20
1.2.1 Objetivo Geral .....	20
1.2.2 Objetivos Específicos .....	20
1.3 Estrutura da Dissertação .....	21
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>22</b>
2.1 Bauxita .....	22
2.1.1 A indústria da bauxita no Brasil .....	23
2.1.2 A composição da bauxita.....	26
2.2 Alumina.....	28
2.2.1 Processo de obtenção de alumina (Processo Bayer).....	29
2.3 Resíduo de bauxita .....	32
2.3.1 Estocagem e Deposição .....	33
2.3.2 Características.....	36
2.3.2.1 Características físicas.....	36
2.3.2.2 Características químicas .....	39
2.3.2.3 Características mineralógicas.....	41
2.3.2.4 Características morfológicas.....	42
2.3.3 Classificação.....	44
2.3.4 Resíduo de bauxita e construção civil .....	45
2.4 Concreto e argamassa.....	47
2.4.1 Exploração da areia e os impactos gerados .....	49
2.5 Telha de concreto .....	51
2.5.1 Fabricação.....	53
2.5.2 Características da telha de concreto.....	54
2.5.2.1 Dimensionais e geométricas .....	54
2.5.2.2 Propriedades a serem avaliadas .....	55
2.5.3 Estudos realizados com telha de concreto .....	57
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>59</b>
3.1 Materiais.....	59

3.1.1	Cimento Portland.....	59
3.1.2	Agregado miúdo .....	59
3.1.3	Água .....	60
3.1.4	Resíduo da Bauxita.....	60
3.2	Métodos.....	61
3.2.1	Preparação das argamassas.....	64
3.2.2	Composição Granulométrica .....	68
3.2.3	Massa específica .....	69
3.2.4	Fluorescência de raio-x (FRX) .....	70
3.2.5	Difração de raio-x (DRX).....	71
3.2.6	Microscopia Eletrônico de Varredura (MEV) e Espectrometria de energia dispersiva de raios-x (EDS).....	72
3.2.7	Resistência à compressão e absorção de cp's cilíndricos.....	73
3.2.8	Determinação da lixiviação .....	74
3.2.9	Resistência à tração na flexão.....	75
3.2.10	Fabricação de telha de concreto com resíduo da bauxita .....	76
3.2.10.1	Preparação das telhas de concreto.....	76
3.2.10.2	Absorção de água e peso seco.....	78
3.2.10.3	Impermeabilidade .....	79
3.2.10.4	Carga de ruptura à tração na flexão .....	80
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>82</b>
4.1	Caracterização dos materiais.....	82
4.1.1	Caracterização físico-química do cimento Portland.....	82
4.1.2	Caracterização física da areia .....	84
4.1.3	Caracterização física do resíduo da bauxita .....	86
4.1.4	Caracterização química do resíduo da bauxita .....	88
4.1.5	Caracterização mineralógica do resíduo da bauxita .....	89
4.1.6	Caracterização morfológica do resíduo da bauxita.....	91
4.2	Resultados referentes às argamassas cilíndricas e prismáticas .....	92
4.2.1	Resistência à compressão de CP's cilíndricos.....	93
4.2.2	Absorção de CP's cilíndricos, índice de vazios e massa específica .....	96
4.2.3	Análise morfológica das argamassas (MEV/EDS).....	98
4.2.4	Análise química (FRX).....	104
4.2.5	Análise mineralógica (DRX).....	105

4.2.6	Análise ambiental (lixivação).....	106
4.2.7	Resistência à tração na flexão de CP's prismáticos.....	107
4.3	Resultados referentes às telhas de concreto .....	109
4.3.1	Peso seco .....	109
4.3.2	Absorção de água.....	111
4.3.3	Impermeabilidade .....	112
4.3.4	Carga de ruptura à tração na flexão .....	113
<b>5.</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>116</b>
5.1	Conclusões .....	116
5.2	Sugestões para trabalhos futuros .....	118
<b>6.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>119</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O meio ambiente vem sofrendo ao longo dos anos inúmeras alterações do equilíbrio ecológico, influenciadas principalmente pelos impactos das atividades humanas, que estão cada vez mais evidentes. Esses temas preocupantes começaram a se transformar em assuntos de extrema importância entre alguns pesquisadores e cientistas na década de 60, ganhando dimensão política em meados da década de 70, e atualmente são um dos assuntos mais polêmicos e de grandes repercussões. Não é mais possível implantar qualquer projeto ou discutir qualquer planejamento sem considerar o impacto sobre o meio ambiente (Eterovic et al., 2019).

Entre as atividades humanas que mais alteram o meio ambiente, estão a agricultura e mineração, uma vez que são atividades econômicas básicas a nível mundial e são de fundamental importância para a sobrevivência do homem no planeta Terra. Destaca-se que junto à mineração e agricultura, existem a construção civil, indústrias químicas, metalúrgicas e exploração florestal, que também são causadores dos impactos que ocorrem sobre o meio ambiente.

Em relação à mineração, esta atividade causa um impacto ambiental considerável, uma vez que é capaz de alterar intensamente a área minerada e áreas vizinhas, onde os rejeitos são depositados. O resíduo que destacaremos é o resíduo de bauxita da indústria da alumina, que é conceituado como o resíduo cáustico gerado a partir da produção de alumina no processo Bayer e é formado durante a digestão da bauxita com soda cáustica (NaOH) e obtido após a clarificação (Guerreiro et al., 2018).

A produção de alumina acarreta em uma produção mundial cerca de 120 milhões de toneladas de resíduo de bauxita por ano (POWER et al., 2011). A literatura afirma que dependendo das características da bauxita, a quantidade de resíduo de bauxita gerado por tonelada de alumina pode variar entre 0,3 a 2,5 t (Komnitsas et al., 2004). Por outro lado, Silva Filho et al. (2007) citam na literatura que são mais comuns as referências de valores entre 1 e 2 toneladas de resíduo de bauxita por tonelada de alumina produzida.

Esta geração de resíduos sempre foi considerada um potencial risco ao meio ambiente, devido a sua alcalinidade e ao fato de conter alguns elementos metálicos, sendo um sério problema para a indústria metalúrgica, uma vez que se apresenta em grande quantidade e seu destino final ainda é muito questionado e estudado por pesquisadores da área. A falta de cuidado

no armazenamento e na manutenção desses depósitos de resíduo de bauxita pode resultar em danos irreversíveis ao meio ambiente.

Por conseguinte, a grande preocupação em torno da produção, aliada às dificuldades quanto à sua destinação final faz com que ocorra uma busca incessante por alternativas que visem a reutilização desse material. Dar um destino nobre a esse rejeito de mineração é um grande desafio. Nesse sentido, pesquisas são desenvolvidas com o objetivo de encontrar soluções de aproveitamento e valorização deste produto, com o intuito de minimizar a disponibilidade no meio ambiente, além de atribuir funções para este tipo de rejeito.

Os manuseios de novas técnicas de aproveitamento de resíduos vêm ganhando um grande destaque na construção civil, principalmente quando está relacionado à utilização de rejeitos de outros setores da indústria e da diminuição de consumo de matérias primas naturais. Entre os materiais mais utilizados na construção civil, está o concreto. Muito têm se discutido sobre este material, visto que ele é formado por constituintes essencialmente extraídos da natureza, como exemplo, tem-se as grandes extrações de jazidas de areia, que muitas vezes são realizadas sem supervisão ou regulação, acarretando problemas como erosão de praias, problemas com percursos de rios, lençol freático, além de destruir os ecossistemas costeiros, entre outros.

Com este interesse, novos estudos estão sendo realizados ao longo do tempo a fim de encontrar soluções ambientalmente e economicamente viáveis na substituição desses materiais na construção civil. O aproveitamento de resíduos da indústria na substituição de elementos naturais costuma ser uma alternativa a ser estudada, pois reduziria o consumo de recursos provenientes de fontes naturais e aumentaria a oferta de insumos no mercado da construção civil.

A grande capacidade criativa de engenheiros e arquitetos, além da precisão dos novos métodos modernos de cálculos acabam impulsionando o desenvolvimento das tecnologias do concreto e cimento, possibilitando ao homem modificar o meio em que vive. E mais, a inenarrável disponibilidade dos materiais que formam o concreto e as diversas aplicações deixam claro que ele é solução para inúmeros elementos construtivos, como por exemplo, as telhas de concreto.

## 1.1 Justificativa

O resíduo da bauxita originado na etapa de digestão do processo Bayer é um rejeito que quando não armazenado adequadamente pode causar um impacto ambiental muito sério ao meio ambiente. O armazenamento em barragens não construídas de forma adequada pode representar um sério risco, pois qualquer descuido gera problemas como a contaminação do lençol freático, contaminação da água de superfície e subterrânea por NaOH, ferro, alumínio ou outro agente químico, contato direto com animais, plantas e seres humanos, além de que o vento pode carrear pó dos depósitos de resíduo de bauxita seca, formando nuvens de poeira alcalina e impacto visual sobre uma extensa área (Silva Filho et al., 2007).

A areia é um insumo da construção civil que possui uma exploração extremamente desordenada. De acordo com o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente - PNUMA (2019), a cada ano cerca de 40 a 50 bilhões de toneladas de areia são extraídas, ou seja, há uma intensa exploração desse recurso natural a fim de suprir principalmente a indústria da construção civil. A extração de jazidas de areia acaba danificando rios, destruindo ecossistemas costeiros e causando erosão em praias, além da mudança no habitat de espécies vegetais e animais.

Possuindo o entendimento de que a indústria da construção civil é uma potencial consumidora de recursos industriais que até então seriam inservíveis e que a indústria mineradora é uma potencial geradora de recursos, essa situação configura um panorama ideal para aproveitamento e reciclagem destes resíduos, de forma adequada ambiental, econômica e tecnicamente.

Com a finalidade de reduzir os custos com a manutenção dos depósitos de resíduo de bauxita, bem como reduzir os impactos ambientais causados pelo grande volume deste resíduo e de diminuir os impactos ambientais relacionados à atividade de exploração das jazidas de areias, diversas empresas estão à procura de parcerias com centros de pesquisas e universidades a fim de estudarem destinações adequadas e úteis aos seus resíduos de forma a agregar valor (Melo, 2012).

A partir desses pressupostos, surge a motivação e o objetivo dessa pesquisa, que busca fabricar telhas de concreto utilizando o resíduo da bauxita como material de construção civil (agregado miúdo) em argamassa de cimento, reduzindo a quantidade de areia em sua produção. Avaliando as características físico-mecânicas do produto final.

Espera-se que a valorização do resíduo da bauxita como material de construção civil (agregado miúdo) represente uma alternativa capaz de melhorar ou manter a qualidade das

telhas de concreto, além de proporcionar uma redução do volume do resíduo de bauxita armazenada nas indústrias. Dessa forma, espera-se também que os resultados obtidos nesta pesquisa ajudem a preservar os recursos naturais não renováveis com a minimização de sua retirada.

## 1.2 Objetivos

Tendo em vista as problemáticas descritas no início deste trabalho e as questões de pesquisa apresentadas anteriormente, este estudo possui o objetivo geral e os objetivos específicos descritos a seguir:

### 1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é fornecer subsídios técnicos quanto ao uso do resíduo da bauxita na fabricação de telhas de concreto utilizando o resíduo *in natura* como substituto parcial da areia.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar o resíduo da bauxita do ponto de vista químico, físico, mineralógico e morfológico;
- Estudar o aproveitamento do resíduo da bauxita como agregado miúdo na produção de argamassas cilíndricas com substituição em massa de 0, 15, 30, 45 e 60% e analisar os efeitos da substituição parcial da areia pelo rejeito avaliando as características físico-mecânicas, morfológicas, mineralógicas, química e a lixiviação.
- Investigar o aproveitamento do resíduo da bauxita como agregado miúdo na produção de argamassas prismáticas com substituição em massa de 0, 15, 30, 45 e 60% e analisar resistência à tração na flexão;
- Avaliar a viabilidade técnica do uso do resíduo da bauxita como agregado miúdo na confecção de telhas de concreto, através da análise das propriedades físicas e mecânicas, com substituição em massa da porcentagem que obteve os melhores resultados quanto as características físico-mecânicas no estudo dos corpos de prova argamassados.

### 1.3 Estrutura da Dissertação

A presente pesquisa se desenvolve em cinco capítulos, conforme descrito a seguir: o primeiro capítulo aborda a introdução versando o contexto e importância do tema, as justificativas, bem como o objetivo geral e os específicos almejados, além da estrutura da dissertação.

O segundo capítulo é constituído por uma revisão bibliográfica, onde inicialmente explana sobre a bauxita, bem como a indústria da bauxita no Brasil e sua composição. Em seguida, são abordados a alumina e o seu processo de obtenção. Posteriormente é discutido o resíduo de beneficiamento da bauxita, mais conhecido como resíduo de bauxita, sua disposição e estocagem, como também suas características (físicas, químicas, mineralógicas e morfológicas). A pesquisa também explana o resíduo de bauxita e sua influência no meio ambiente e construção civil. Por fim, o concreto e argamassa são abordados, com ênfase na exploração da areia e produção de telhas de concreto, bem como suas características, materiais e técnicas de fabricação.

O terceiro capítulo aborda os materiais e métodos. A etapa I da metodologia aborda os materiais que serão utilizados para a fabricação dos corpos de prova argamassados e da telha de concreto, além dos ensaios de caracterização. A etapa II versa sobre o uso do resíduo da bauxita como agregado miúdo na fabricação de corpos de provas argamassados cilíndricos e prismáticos e faz uma análise experimental acerca dessa abordagem. Já a etapa III descreve a fabricação das telhas de concreto com o resíduo em questão, além de explicar a análise experimental. O quarto capítulo apresenta os resultados obtidos dos ensaios, seguidos de sua discussão e análise. O quinto capítulo finaliza o trabalho com as conclusões e sugestões para pesquisas futuras.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Bauxita

De acordo com a Associação Brasileira do Alumínio (ABAL), o nome “bauxita” é referente à uma cidade de Les Baux, localizada na França, onde o minério foi identificado em 1821 pela primeira vez. A bauxita (figura 2.1) é uma rocha de coloração avermelhada, rica em alumínio, apresentando geralmente mais de 40% de alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). É válido destacar que a nomenclatura “bauxita” é o nome popular do minério bauxito, já que a bauxita se refere a uma espécie mineralógica de composição  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , não encontrada na natureza ou sintetizada artificialmente. A coloração avermelhada se dá pela presença de óxidos de ferro em sua composição. A bauxita é a rocha (minério) a partir do qual é originado o alumínio. Ele é o terceiro elemento em maior abundância na crosta terrestre, ficando atrás apenas do oxigênio e do silício. Destaca-se que essa rocha é encontrada em regiões subtropicais e tropicais, com ação do intemperismo sobre os aluminosilicatos (Motta et al., 2007; ABAL, 2017).

Figura 2.1: Bauxita - matéria prima do alumínio.



Fonte: Revista alumínio, 2019.

A produção mundial de bauxita em 2008 foi de aproximadamente 205 milhões de toneladas, tendo como os principais países produtores a Austrália, China, Índia, Brasil e Jamaica (Morelli et al., 2012). Apesar de ser frequentemente descrita como o mineral de alumínio, a bauxita não é uma espécie mineral propriamente dita, mas sim, uma rocha heterogênea composta por uma mistura de hidróxidos de alumínio hidratados contendo impurezas (Constantino et al., 2002).

De acordo com especialistas, as reservas mundiais de bauxita acumulam aproximadamente 70 bilhões de toneladas. Desta forma, a estimativa é que esta reserva seja o suficiente para conseguir atender à demanda dos mercados globais pelos próximos 250 a 300

anos. Para que a produção de alumínio, através da bauxita, seja economicamente aproveitável, a bauxita deve apresentar no mínimo 30% de óxido de alumínio aproveitável. É importante salientar que são necessários 5 a 7 toneladas de bauxita para ter um quantitativo de 2 (duas) toneladas de óxido de alumínio (alumina), que se transformam em 1 (uma) tonelada de alumínio (ABAL, 2017).

### 2.1.1 A indústria da bauxita no Brasil

De acordo com ABAL (2017), no ano de 2015, a bauxita era detentora da terceira posição dos recursos naturais (em volume) produzidos no Brasil, com aproximadamente 37 milhões de toneladas por ano. Ficando atrás apenas de agregados utilizados na construção civil, como por exemplo, areia, brita, cascalho e cimento, com aproximadamente 772 milhões, e do minério de ferro, com 411 milhões de toneladas anuais. As principais reservas localizam-se na Guiné e Austrália, com 7,4 bilhões e 6,2 bilhões de toneladas, respectivamente. No tocante ao panorama global, a bauxita produzida no Brasil em 2015 ocupou a terceira posição, como pode ser observado no quadro 2.1 abaixo, ficando atrás da Austrália, com aproximadamente 81 milhões de toneladas anuais e logo em seguida, a China, com aproximadamente 65 milhões. Logo em seguida, estão Guiné, Índia e Jamaica com 27,6, 24,2 e 8,5 milhões de toneladas anuais, respectivamente.

Quadro 2.1: Produção de bauxita, alumina e alumínio primário em escala global.

Ranking	Reserva de Bauxita (milhões de toneladas)		Produção (mil toneladas)					
	Países	Volume	Bauxita	Volume	Alumina	Volume	Alumínio Primário	Volume
1°	Guiné	7400	Austrália	81741	China	58978	China	31870
2°	Austrália	6200	China	65000	Austrália	20097	Rússia	3454
3°	Brasil	2600	Brasil	37057	Brasil	10452	Canadá	3209
4°	Vietnã	2100	Guiné	27605	Índia	5000	Emirados Árabes	2471
5°	Jamaica	2000	Índia	24219	Estados Unidos	4541	Índia	1909
6°	Indonésia	1000	Jamaica	8540	Rússia	2593	Austrália	1646
7°	China	980	Malásia	7664	Jamaica	1865	Noruega	1231
8°	Guiana	850	Rússia	5432	Canadá	1561	Bahrain	971
9°	Índia	590	Cazaquistão	4802	Ucrânia	1481	Estados Unidos	818
10°	Suriname	580	Grécia	2100	Cazaquistão	1448	Brasil	793
11°	Arábia Saudita	210	Arábia Saudita	1660	Espanha	1400	Islândia	764
	Outros	3490	Outros	4672	Outros	7284	Outros	8421
	<b>Total</b>	<b>28000</b>		<b>270492</b>		<b>116700</b>		<b>57557</b>

Fonte: ABAL, 2017 (Adaptado pelo autor).

No quadro 2.2, a seguir, tem-se um panorama do consumo doméstico da bauxita, alumina e alumínio primário no Brasil. O quadro ainda mostra algumas das consequências da queda de produção do alumínio primário, se contrapondo com a elevação do número de exportações da alumina e da bauxita. Assim, o país passou a importar mais alumínio primário no ano de 2015 em relação ao ano de 2014.

Quadro 2.2: Produção de bauxita, alumina e alumínio primário no Brasil.

Itens	Produção total 2015 (mil toneladas)	% destinado ao consumo doméstico	Observações
Bauxita	37.057	66%	O volume cresceu 2,1% e as exportações cresceram 11,8% em relação a 2014. Os principais destinos da bauxita exportada foram EUA, Canadá e China.
Alumina	10.452	19%	A produção foi equivalente a 2014. O consumo doméstico recuou 14,7% em relação a 2014. As exportações cresceram 3,5%. Os principais destinos da alumina brasileira foram Canadá, Noruega e Emirados Árabes.
Alumínio Primário	772	61%	O volume produzido foi 19,7% menor que 2014 devido ao encerramento de atividades de plantas, causada por aumentos dos custos de produção, principalmente os de energia elétrica.

Fonte: ABAL, 2017 (Adaptado pelo autor).

Grande parte das reservas de bauxita no mundo, encontram-se localizadas em regiões de climas subtropicais e tropicais. Destaca-se ainda que ela ocorre com um percentual de 57% em climas tropicais, 33% em climas mediterrâneos e 10% em climas subtropicais. É válido salientar que a produção de bauxita possui duas principais finalidades, são elas: produção metalúrgica e produção de refratários. Do total, cerca de 90% é usada na produção de alumínio e seus derivados (alumínio primário e alumina), e aproximadamente 10% é usada para outros fins, como a produção de refratários, por exemplo, representados por abrasivos, cimentos argilosos, indústria química (sulfato de alumínio), dentre outros (Quaresma, 2009).

Ainda de acordo com Quaresma (2009), no Brasil, cerca de 92% das reservas de bauxita são para produção metalúrgica e aproximadamente 8% são destinados a serem usadas na indústria química e refratária. Dessa forma, a bauxita para produção metalúrgica é o grande destaque da produção brasileira representando a grande maioria de utilização. Ela é produzida de forma integrada desde a mineração passando pela fase intermediária do refino em alumina, resultando na forma metal de alumínio. Segundo ABAL (2017), o estado do Pará concentra cerca de 91 % da produção de bauxita com a finalidade de uso metálico, e as principais empresas que atuam neste ramo no Brasil, estão representadas no quadro 2.3 abaixo.

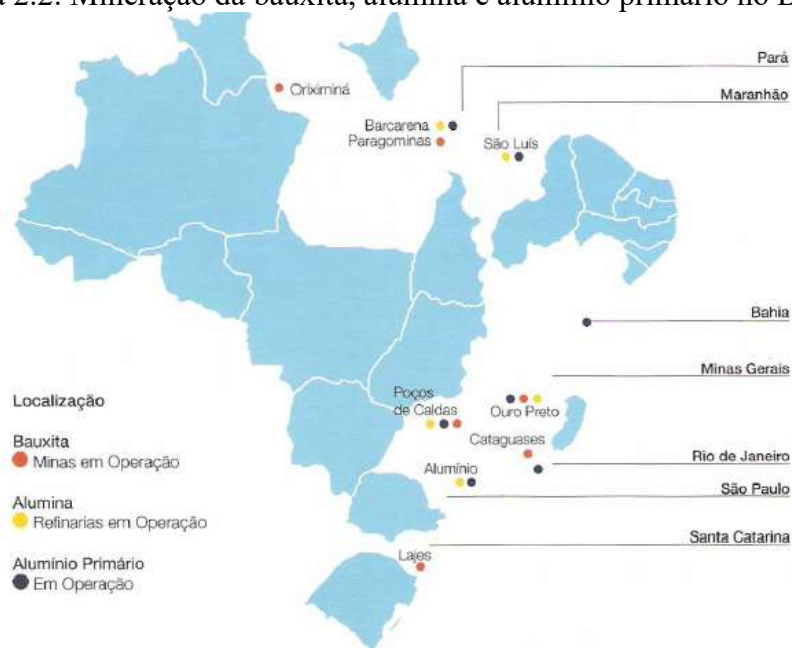
Quadro 2.3: Principais empresas que atuam no ramo da mineração da bauxita no Brasil.

Empresa	Volume - 2015 (milhões)	%	Localização
MRN - Mineração Rio do Borte S.A.	17,82	48	Trombetas (PA)
Mineração Paragominas S.A.(Hydro)	10,06	27	Paragominas (PA)
Alcoa Alumínio S.A.	5,73	15	Juriti (PA) e Poços de Caldas (MG)
Companhia Brasileira de Alumínio - CBA	2,12	6	Itamarati, Cataguases e Mirai (MG)
Outros	1,33	4	
Total	37,06	100	

Fonte: ABAL, 2017 (Adaptado pelo autor).

O Brasil é um país que possui um enorme potencial metalúrgico na mineração da bauxita. Esse potencial tende a aumentar e manter a distribuição regional para os próximos anos como o perfil atual, considerando a quantidade de áreas em pesquisa (prospectos) existente atualmente. Esse ramo de indústria de mineração se faz presente em 9 (noves) estados brasileiros. São eles: o estado do Pará, Minas Gerais, Maranhão, Amapá, Santa Catarina, São Paulo, Rio de Janeiro, Amazonas e Goiás (Quaresma, 2009). A figura 2.2 abaixo mostra os estados nos quais ocorre a existência de minas em operação da bauxita, refinarias em operação e alumínio em operação no Brasil.

Figura 2.2: Mineração da bauxita, alumina e alumínio primário no Brasil.



Fonte: ABAL, 2017.

### 2.1.2 A composição da bauxita

A bauxita é uma rocha composta de minerais de alumínio (hidróxidos de alumínio hidratados), apresentando como os mais importantes a gibbsita  $\text{Al}(\text{OH})_3$ , o diásporo  $\alpha$  -  $\text{AlO}(\text{OH})$  e a bohemita  $\gamma$  -  $(\text{OH})$ . As proporções desses minerais podem variar na rocha entre os depósitos, assim como a quantidade de impurezas do minério, como por exemplo, óxido de ferro, sílica, argila, dióxido de titânio, entre outros. Grande parte das bauxitas que são economicamente aproveitáveis, possuem uma quantidade de alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) na ordem de 50 a 55%. É válido destacar que para que ela seja considerada aproveitável deve ter um teor mínimo entre 30 a 40% (Centro de Tecnologia Mineral, 2008).

A gibbsita  $\text{Al}(\text{OH})_3$  é um óxido hidratado com aproximadamente de 65% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . A bauxita boehmítica é aquela em que o óxido hidratado é a boemita ( $\gamma$ - $\text{Al}(\text{OOH})$ ) e a bauxita diaspórica é a composta pelo óxido hidratado denominado diásporo ou diasporio ( $\alpha$ - $\text{Al}(\text{OOH})$ ), nas duas se encontram concentrações de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  superiores a 80% (Cardoso et al., 2012).

Apesar da diversidade de minerais que um depósito de rocha bauxita possui, grande parte dessas rochas não metalúrgicas são formadas de minerais de alumínio chamados de oxi-hidróxidos de alumínio. Dessa forma, algumas bauxitas refratárias são compostas por gibbsita, com uma menor quantidade de caulinita. Como já mencionado, a gibbsita, bohemita e o diásporo são os minerais mais importantes que estão presentes nas rochas de bauxita. Entre as suas principais impurezas, tem-se: caulinita, quartzo, hematita, goethita, rutilo e anatásio.

No quadro 2.4, estão contidos os três principais minerais que são encontrados na bauxita e suas características, além das composições químicas da bauxita metalúrgica e da não metalúrgica. É importante salientar que a diferença mais relevante entre ambas está no teor de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Logo, considera-se que a bauxita refratária deve possuir menos impurezas e mais alumina (CETEM, 2008).

Quadro 2.4: Características dos três principais minerais que compõem a bauxita.

Minerais de alumínio contidos nas bauxitas			
Mineral	Gibbsita	Boehmita	Diásporo
Fórmula química	$\text{Al}(\text{OH})_3 - \gamma$	$\text{AlOOH} - \gamma$	$\text{AlOOH} - \alpha$
$\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	1: 3	1: 1	1: 1
(%) máxima de alumínio	65,4	85,0	85,0
Sistema cristalino	Monoclínico	Ortorrômbico	Ortorrômbico
Dureza Moh	2,5-3,5	3,5-4,0	6,5-7,0
Densidade	2,42	3,01	3,44
Índice de refração	1,568	1,649	1,702
Temperatura (°C) de desidratação	150	350	450
Produto de desidratação	$\text{Al}_2\text{O}_3 - \gamma$	$\text{Al}_2\text{O}_3 - \gamma$	$\text{Al}_2\text{O}_3 - \alpha$
Solubilidade (g $\text{Al}_2\text{O}_3$ /L) (*)	128	54	Insolúvel
(*) Em solução de $\text{Na}_2\text{O}$ a 100 g/L, a 125 °C.			
Bauxita Não-Metalúrgica		Bauxita Metalúrgica	
Constituintes	(%)	Constituintes	(%)
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	2,5 (máx.)	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	11 - 12
$\text{SiO}_2$	5 - 7	$\text{SiO}_2$	< 4,0
$\text{Al}_2\text{O}_3$	50	$\text{Al}_2\text{O}_3^*$	> 48
Densidade aparente > 3		*Alumina aproveitável pelo processo Bayer	

Fonte: Habashi (1993, apud CETEM, 2008).

Estes elementos estão na natureza em proporções que variam de acordo com a localização geográfica da jazida de minério. As bauxitas encontradas em depósitos europeus (França e Grécia), por exemplo, são mais ricas em boehmita, ao passo que aquelas encontradas na China, Hungria e Romênia são ricas em diásporo. As ecologicamente mais novas possuem grande quantidade de gibbsita e ficam localizadas em grandes depósitos de áreas com clima tropical, como Brasil, Guiana, Suriname, Índia, Guiné, Jamaica e Austrália, e são as que apresentam maior interesse comercial (Constantino et al., 2002).

Para que a bauxita se forme, é necessária a existência de uma condição essencial. Esta condição é a presença de um clima tropical, oscilando entre as estações úmidas e secas, que ajudam no processo natural de lixiviação das rochas. Por consequência, os argilominerais e silicatos são decompostos, com remoção da maior parte da sílica. Nesse ínterim, os óxidos de ferro e alumínio são concentrados. Logo, o resultado para uma maior taxa de formação de bauxita ocorre quando: há uma elevada porosidade na rocha; há um longo período de intensa alteração das condições climáticas; uma cobertura vegetal com adequadas atividades bacteriológicas e uma topografia plana ou um pouco acidentada que permita o mínimo de erosão (CETEM, 2008).

Destaca-se ainda que as reservas brasileiras de bauxita são do tipo trihidratadas ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ), significando assim menores custos no processo de produção da alumina, pela razão de solicitarem temperaturas e pressões mais baixas do que as do tipo monohidratadas ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ), encontradas em países como França, Grécia e Hungria (CETEM, 2008).

Salienta-se que a diferença dos hidratos é de suma importância para estabelecer a qualidade comercial e o preço de uma bauxita, com diferenciações do comportamento ao dissolver-se em soda cáustica (procedimento base para a extração industrial da alumina). Tem-se ainda que o trihidrato é muito solúvel desde uma temperatura próxima de 100°C. O monohidrato bohemita, por sua vez, precisa de 180°C ou mais para obter uma solubilidade suficiente, enquanto o do tipo diásporo, acima de 250°C (Villar, 2002). É necessário enfatizar, portanto, que a bauxita usada industrialmente é formada por: 40 a 60% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; 12 a 30% de  $\text{H}_2\text{O}$  combinada; 1 a 15% de  $\text{SiO}_2$  livre e combinada; 1 a 30% de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ; 3 a 4% de  $\text{TiO}_2$ ; 0,05 a 0,2% de outros elementos e óxidos (Constantino, 2002).

## 2.2 Alumina

A alumina ou óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) é um composto químico formado por alumínio e oxigênio, e é o item de maior custo na produção do metal alumínio, ou seja, é matéria prima para a fabricação deste material. A alumina (figura 2.3) de boa qualidade é necessária para produzir metal de qualidade com impacto ambiental baixo. Entre suas principais características, destacam-se: rigidez e resistência, baixa retenção de calor e alto ponto de fusão. A principal aplicação da alumina é para a produção de alumínio pelo processo Hall-Héroult. Outras aplicações industriais incluem abrasivos, aditivos em plásticos e suporte de catalisação em catalisadores industriais (Hydro, 2012).

Figura 2.3: Alumina / Óxido de alumínio.



Fonte: Hydro, 2012.

Para que a produção de alumina ocorra, é necessária a presença de alguns insumos: entre eles, tem-se a bauxita e os combustíveis energéticos. Além destes, a produção de alumina

requer outros insumos, cuja quantidade costuma variar de acordo com a qualidade da bauxita utilizada. Os parâmetros de consumo da alumina podem ser visualizados na tabela 2.1, a seguir.

Tabela 2.1: Parâmetros de consumo da alumina.

Bauxita	1,85 a 3,4 t/t
Cal	10 a 50 kg/t
Soda Cáustica	40 a 140 kg/t
Vapor	1,5 a 4 t/t
Óleo combustível (calcinação)	80 a 130 kg/t
Floculante sintético	100 a 1000 g/t
Energia elétrica	150 a 400 kw/t
Produtividade	0,5 a 3 Hh/t
água	0,5 a 2 m <sup>3</sup> /t

Fonte: ABAL, 2017 (Adaptado pelo autor).

Segundo a United States Geological Survey (2020), em 2019, o volume de bauxita consumida no Brasil foi de aproximadamente 5,1 milhões de toneladas, o que representa 30% mais do que o consumido no ano anterior. Cerca de 73% da bauxita foi refinada pelo processo Bayer para alumina ou hidróxido de alumínio, e 27% para produtos como abrasivos, cimento, produtos químicos, propantes e refratários.

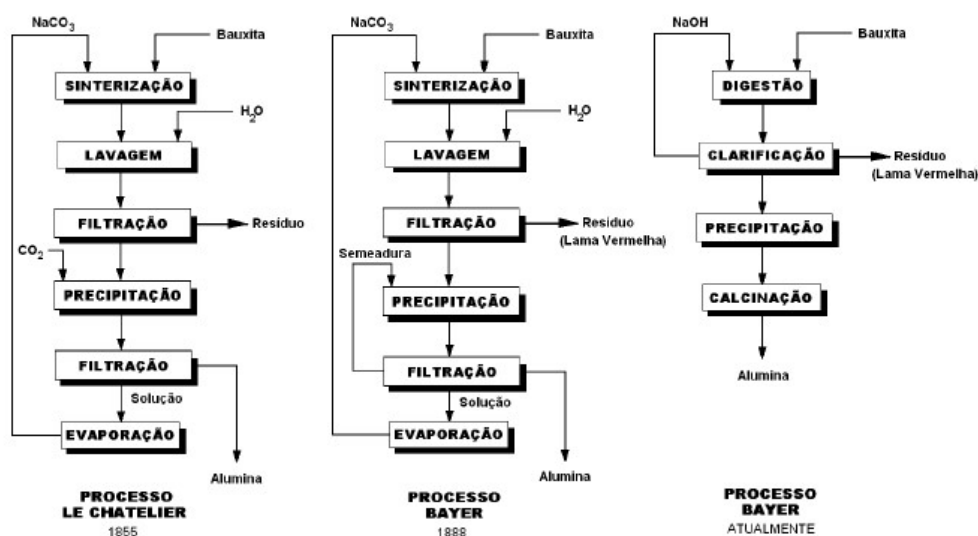
### 2.2.1 Processo de obtenção de alumina (Processo Bayer)

No ano de 1888, Karl Josef Bayer patenteou o processo conhecido internacionalmente como “Processo Bayer”. Inicialmente este processo foi desenvolvido para atender uma demanda da indústria têxtil, que utilizava o  $\text{Al}_2\text{O}_3$  como fixador para o tingimento do algodão. Entretanto, com a sua associação ao processo Hall-Heroult (processo eletrolítico de obtenção de alumínio metálico), ganhou destaque na indústria metalúrgica (SILVA FILHO et al., 2007).

O processo Bayer, atualmente, é utilizado para atividade de refino da bauxita na produção de alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Inicialmente, o beneficiamento da bauxita era realizado através do processo Le Chatelier. Esse método consistia no aquecimento da bauxita com  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  a  $1200^\circ\text{C}$ , remoção dos aluminatos formados com água, precipitação do  $\text{Al}(\text{OH})_3$  através da ação do  $\text{CO}_2$  e, finalmente, o  $\text{Al}(\text{OH})_3$  formado é filtrado, seco e limpo (Silva Filho et al., 2007).

Porém, com o passar dos anos, o processo Le Chatelier foi substituído pelo processo Bayer, devido principalmente à drástica redução no custo de produção da  $Al_2O_3$  que este proporcionou. O processo Bayer é utilizado até hoje praticamente sem mudanças significativas, somente com a substituição do  $Na_2CO_3$  pelo  $NaOH$  e pela utilização de pressão durante a digestão (Silva Filho et al., 2007). A literatura não é clara em relação às datas, mas uma evolução cronológica dos métodos de produção de alumina é apresentada na figura 2.4.

Figura 2.4: Evolução cronológica dos métodos de produção de alumina.



Fonte: Habashi, 2005.

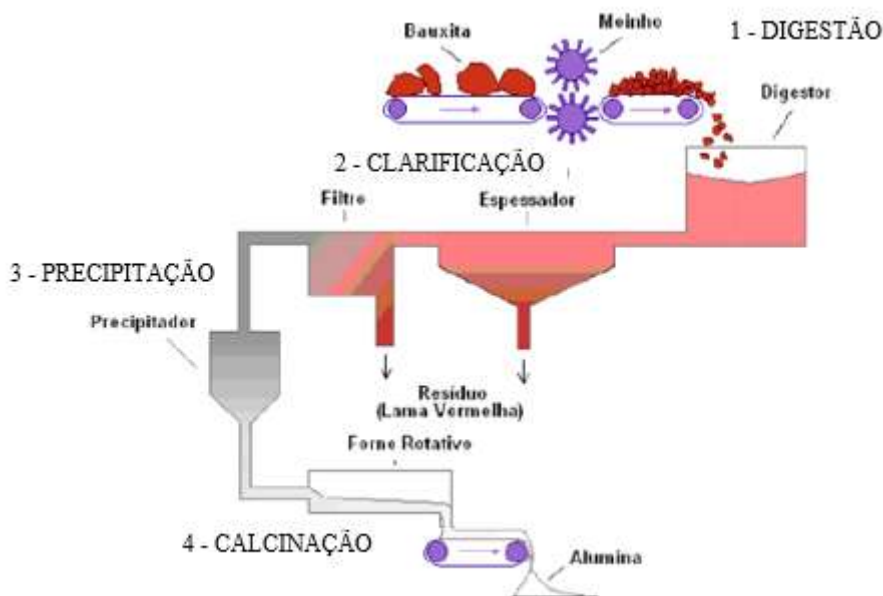
Em relação ao Processo Bayer para a produção de alumina, existem algumas etapas nas quais a bauxita deve passar para chegar ao resultado final. Entre as etapas, pode-se destacar: digestão, clarificação, precipitação e calcinação (figura 2.5).

Na etapa da digestão, que é o estágio inicial, inicialmente ocorre a moagem da bauxita, que fora previamente coletada nas reservas de bauxita para mineração. Posteriormente, ocorre a digestão propriamente dita devido a ação de uma solução de hidróxido de sódio ( $NaOH$ ) sob temperatura e pressão definidos. Essas condições em que a digestão ocorre (temperatura, pressão e temperatura) variam de acordo com as propriedades da bauxita local. Plantas modernas comumente operam em temperaturas entre 200 e 240 °C, e pressão em torno de 30 atm. Assim, nestas condições a maioria das espécies contendo alumínio é dissolvida, formando um licor verde, ou seja, a digestão induz à dissolução do hidróxido de alumínio na bauxita, bem como reduz o teor de sílica (Silva Filho et al., 2007; Rosário, 2013).

A próxima etapa é a clarificação, que por sinal é uma das etapas mais importantes do processo. Nesta etapa, ocorre a separação entre as fases líquida (licor – aluminato de sódio) e

sólida (resíduo insolúvel rico em óxido de ferro – resíduo de bauxita). Normalmente as técnicas empregadas envolvem espessamento seguido de filtração. O espessamento é um processo de decantação, em que o resíduo proveniente da digestão é encaminhado para unidades denominadas de espessadores ou lavadores. Nesta fase é comum a adição de polímeros (como hidroxamatos e poliacrilamida) para induzir a floculação das partículas nos espessadores ou até mesmo a utilização de processos de separação com membranas poliméricas (Silva Filho et al., 2007).

Figura 2.5: Processo Bayer.



Fonte: WAO, 2003 *apud* Silva Filho et al., 2007

Em seguida, ocorre o processo de precipitação, quando se dá o esfriamento do licor verde. Após este esfriamento é feita adição de uma pequena quantidade de cristais de alumina (semeadura) para estimular a precipitação, em uma operação reversa à digestão. A alumina cristalizada é encaminhada para a calcinação e o licor residual contendo NaOH e alguma alumina é recirculada para a etapa de digestão (Silva Filho et al., 2007).

E por fim, tem-se a etapa final do processo, que é a calcinação. Nesta etapa, a alumina é lavada para remover qualquer resíduo do licor e posteriormente seca. Em seguida a alumina é calcinada a aproximadamente 1000 °C para desidratar os cristais, formando cristais de alumina puros, de aspecto arenoso e branco (Motta et al., 2007).

O resíduo insolúvel formado durante a clarificação é chamado de resíduo de bauxita pela indústria de refino da alumina. Este resíduo é composto por óxidos insolúveis de ferro, quartzo, aluminossilicatos de sódio, carbonatos e aluminatos de cálcio e dióxido de titânio (geralmente presente em traços). O resíduo de bauxita sofre uma lavagem, através de um processo de sedimentação com fluxo de água em contracorrente e posterior deságue para a recuperação do NaOH (Silva Filho et al., 2007).

### **2.3 Resíduo de bauxita**

O resultado final das atividades de algumas indústrias no setor primário é acompanhado da geração/produção de uma grande quantidade de resíduos sólidos, que geralmente são depositados em locais próximos às fábricas, com o objetivo de diminuir o custo que representa o seu transporte, gestão adequada e tratamento. Entre esses resíduos sólidos, tem-se o resíduo de bauxita (CETEM, 2008).

O resíduo de bauxita é definido como o resíduo caústico gerado a partir da produção de alumina no processo Bayer. Ela é obtida durante a digestão da bauxita com soda cáustica (NaOH). Comumente, as indústrias optam pelo processo de lavagem desse resíduo insolúvel com o objetivo de recuperar o máximo de NaOH e de alumínio solúvel, porém, esse processo acaba elevando o pH do resíduo de bauxita, que chega a variar em uma faixa entre 10 e 13 (Guerreiro et al, 2018).

Este resíduo é composto, em partes, por substâncias do minério que não foram solubilizados no processo de refino da bauxita e por outros elementos químicos que foram adicionados durante o processo, como o hidróxido de sódio. Desta forma, comumente é encontrado silício, alumínio, ferro, cálcio, titânio, sódio, potássio, cromo, manganês, chumbo, entre outros. As maiores partes são os compostos de ferro mineral como por exemplo, a hematita, magnetita, goetita. Estudos mais atuais também mostram que vários elementos de terras raras estão presentes em sua composição. Salienta-se ainda que devido à grande quantidade de hidroxilas em sua composição, este resíduo insolúvel e alcalino possui coloração avermelhada (Shinomiya, 2015).

Deve-se destacar que de acordo com a qualidade da bauxita, a quantidade de resíduo de bauxita produzida varia entre 55 a 65% da bauxita processada. E ainda, a composição química deste resíduo varia em decorrência da natureza da jazida da bauxita e das técnicas

utilizadas no processo Bayer, tendo como os constituintes principais, óxidos de ferro, alumínio, cálcio, sódio, sílica e titânio (CETEM, 2008; Guerreiro et al., 2018).

O resíduo de bauxita é dependente da composição química da bauxita, da qualidade e da natureza da jazida da bauxita utilizada, por isso, é muito difícil definir a exata proporção entre a quantidade de alumina produzida e a quantidade de resíduo de bauxita gerado. Desta forma, a literatura afirma que dependendo das características da bauxita, a quantidade de resíduo gerado por tonelada de alumina pode variar entre 0,3 a 2,5 t (Komnitsas et al., 2014). Porém, Silva Filho et al. (2007) afirmam que na literatura são mais comuns as referências de valores entre 1 e 2 toneladas de resíduo de bauxita por tonelada de alumina produzida.

Por conseguinte, a produção de alumina a nível global acaba levando a uma produção mundial de aproximadamente 120 milhões de toneladas de resíduo de bauxita por ano (Power et al., 2011). Esta quantidade, porém, é bem questionada por diversos autores, enquanto alguns citam que são gerados mundialmente de 30 a 50 milhões de RB por ano (Motta, 2007), outros afirmam que cerca de 90 milhões de toneladas por ano são produzidas (Wang, 2008). Independente da enorme quantidade e variação de produção do resíduo de bauxita por ano, salienta-se que esta produção representa um forte agravante ambiental que necessita ser resolvido.

### 2.3.1 Estocagem e Deposição

O resíduo gerado na produção da alumina ainda é um sério problema para a indústria metalúrgica, uma vez que se apresenta em grande quantidade e seu destino final ainda é muito questionado e estudado por pesquisadores da área. Para que este resíduo seja estocado de forma correta, ainda há uma série de dificuldades. A começar pela dispendiosa manutenção das grandes áreas ocupadas pelas bacias de contenção, além do risco de contaminação do lençol freático, percolação do material, vazamento de material cáustico para o meio ambiente e geração de poeiras do material seco em virtude de sua granulometria diminuída. Lembrando que o custo de deposição deste resíduo pode chegar a 5% do custo total da produção da alumina (Renforth et al., 2012; Rosário, 2013).

Antigamente, alguns países como França, Jamaica, Itália, Japão, Estados Unidos, dentre outros, despejavam o resíduo de bauxita diretamente no mar, como forma de eliminar custos com possíveis manutenções em manter este resíduo por perto, porém, com o passar dos anos, este método se tornou ultrapassado e preocupante, uma vez que o ecossistema marinho

estaria sendo prejudicado pelo lançamento deste resíduo, apesar da capacidade de a água do mar neutralizar a alcalinidade do rejeito. Atualmente, a maioria dos resíduos do beneficiamento da bauxita utilizam processos de deposição de resíduos modernos avançados e que oferecem menos riscos ao meio ambiente. Geralmente essa estocagem ocorre em grandes lagos que ocupam áreas próximas onde ocorre a atividade metalúrgica (Yang; Xiao, 2007).

Na contemporaneidade, existem dois métodos que são bastante utilizados para a disposição e estocagem do resíduo de bauxita, são eles: os métodos secos ou semi-secos, também conhecidos como “dry-stacking” e os métodos convencionais ou úmidos.

Em relação aos métodos secos ou semi-secos (figura 2.6), o resíduo da bauxita é disposto com um teor de sólido elevado resultando em uma textura pastosa. Este é o método mais vantajoso, pois com menor quantidade de líquidos, o manuseio do material se torna mais seguro e fácil, resultando em um menor volume, portanto em uma menor área de ocupação. Neste método, o resíduo é submetido a altas pressões formando uma torta semi-seca com sólidos acima de 65% e a partir de então são transportados e armazenados (Shinomiya, 2015).

Figura 2.6: Exemplo de estocagem a seco de resíduo de bauxita (dry-stacking).



Fonte: RMP, 2015

Já os métodos convencionais ou úmidos (métodos de lagunagem) possuem esse nome devido à grande quantidade de água que é utilizada no processo, que juntamente com o material sólido, segue para os locais de deposição. Este método consiste em grandes lagoas (figura 2.7) que são construídas próximas à indústria metalúrgica. Neste caso, o RB é disposto com baixo teor de sólidos. Sabe-se que o material sólido se sedimenta e um sobrenadante alcalino surge. Esse método necessita de grandes áreas de deposição, sendo a vida útil do lago entre 4 e 7 anos.

Figura 2.7: Lagoa de disposição de resíduo de bauxita.



Fonte: MOTTA, 2007.

A EPA (United States Environmental Protection Agency) promoveu pesquisas para verificar algumas características do RB, como a corrosividade, reatividade, inflamabilidade e toxicidade do resíduo, e classificou como um resíduo não perigoso. Portanto, indica que a disposição do material necessita ser feita em locais adequados, geralmente lagoas de disposição, construídas com técnicas de elevado custo, que impossibilitem a ocorrência de lixiviação de seus componentes e consequentemente a contaminação dos corpos d'água da superfície e das águas subterrâneas, como já mencionado (WANG et al, 2008).

Os custos relacionados a manutenção são altos devido a necessidade de técnicas de tratamento e amenização do solo, além da preocupação com a impermeabilização dessas áreas, que é feita geralmente com a utilização de membranas plásticas ou aplicação de material impermeável, para evitar a contaminação do lençol freático, principalmente (Silva Filho et al., 2007; Shinomiya, 2015). Na figura 2.8, tem-se o perfil de um lago de resíduos.

Figura 2.8: Perfil de um lago de resíduos.



Fonte: ABAL (2009, apud Rosário, 2013) - adaptado.

### 2.3.2 Características

Como já mencionado, o resíduo da bauxita é um resíduo insolúvel gerado na etapa da digestão e obtido após a clarificação do processo Bayer na produção do alumínio. Este resíduo tão comum na indústria da alumina apresenta inúmeras variações em suas características, que são atribuídas à matéria prima, ao processo industrial e ao tempo de disposição. Este aspecto faz com que o resíduo da bauxita tenha um leque de características e comportamentos diferenciados, podendo assim, apresentar características heterogêneas em uma mesma refinaria (Garcia, 2012).

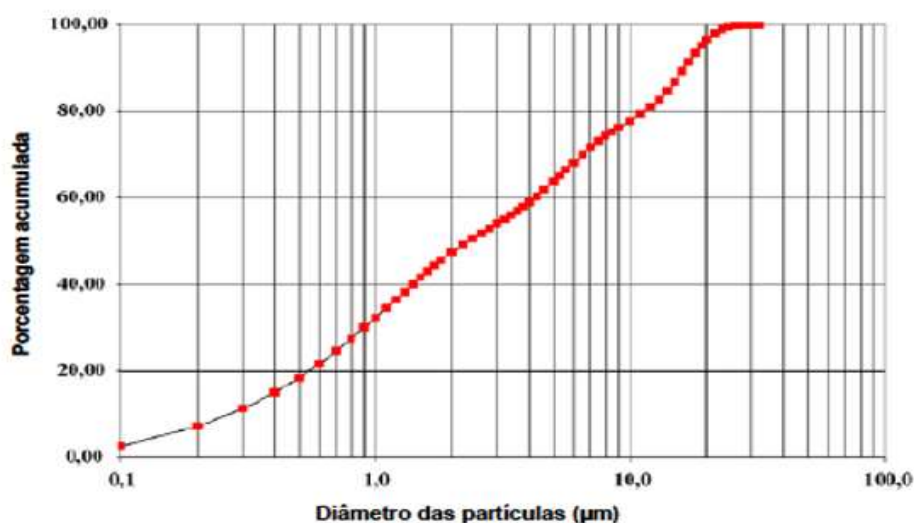
#### 2.3.2.1 Características físicas

Em relação as características físicas do resíduo da bauxita, pode-se destacar a massa específica, a área específica superficial e a granulometria do material. De acordo com Li (2000), em relação à granulometria, o resíduo da bauxita é composto de aproximadamente 15 a 40% de sólidos com partículas muito finas.

Villar (2002) afirma que a granulometria do RB é uma característica que está estritamente relacionada a mineralogia da rocha de origem, ao processo de extração, processamento e deposição (adição de floclulantes). Dessa forma, como essa característica é diferente de região para região é quase impossível determinar uma curva granulométrica padrão para este tipo de material.

Assim, essa característica granulométrica pode alterar de acordo com a região de estudo. Leonardou et al. (2008) fizeram um estudo comparativo entre o RB brasileiro e o da Grécia. A caracterização granulométrica à laser feito por ele demonstrou que o resíduo da bauxita na Grécia é extremamente fino, possuindo 100% das partículas com diâmetro inferior a 28  $\mu\text{m}$  e 50% com diâmetro 2,4  $\mu\text{m}$ , como pode ser visto na figura 2.9.

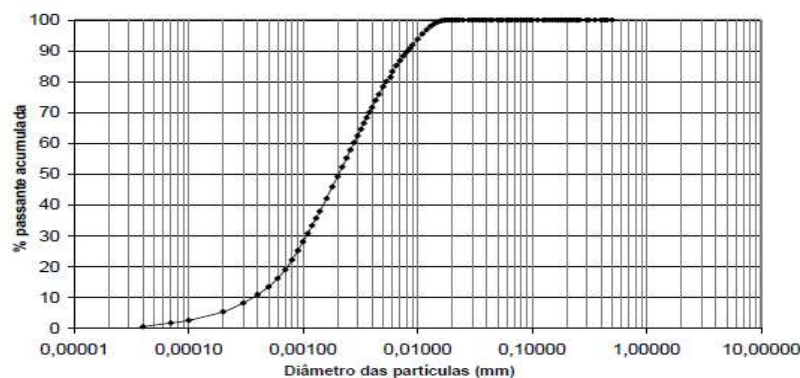
Figura 2.9: Distribuição granulométrica do resíduo de bauxita da Grécia.



Fonte: LEONARDOU et al. (2008)

Destaca-se também a caracterização granulométrica do resíduo da bauxita brasileiro. De acordo com ensaios realizados por Manfroi (2009), este material brasileiro caracterizou-se como um material bem fino, com 100% das suas partículas com diâmetro inferior à 0,018 mm, 50% das suas partículas com diâmetro inferior à 0,0020 mm e 30% das suas partículas com diâmetro inferior à 0,001 mm, como pode ser visto na figura 2.10.

Figura 2.10: Distribuição granulométrica do resíduo de bauxita brasileira.



Fonte: Manfro, 2009.

Sabe-se ainda que as características como área específica e massa específica também variam de acordo com a origem do RB. Chandra (2009) afirma que este material no estado seco pode apresentar massa específica de 2,5 a 2,7 g/cm<sup>3</sup>. Por outro lado, Han et al. (2002) afirmam um valor de massa específica de 3,04 g/cm<sup>3</sup> para o resíduo de bauxita da Coreia.

O resíduo cáustico da indústria da bauxita faz parte de um grupo de resíduos conhecidos como “tailings” e se caracterizam por apresentarem granulometrias muito finas na ordem de 75 µm, massa específica de 2,8 g/cm<sup>3</sup> e área superficial específica de 10 m<sup>2</sup>/g. E devido a essas características, sua deposição em meio líquido é extremamente lenta ao ponto de formar poeiras ao secar (Silva et al., 2007).

Ainda em relação as características físicas, Huang et al. (2008) verificaram que a área específica do resíduo australiano é de aproximadamente 22,71 m<sup>2</sup>/g. Já em relação ao material da Coreia, Han et al. (2002) determinaram uma área específica no valor de 23,53 m<sup>2</sup>/g.

Morelli et al. (2012) analisaram algumas dessas propriedades, obtendo o valor de 20,27 m<sup>2</sup>/g para a área superficial específica, 0,63 kg/dm<sup>3</sup> para a massa unitária e 2,9 kg/dm<sup>3</sup> para a massa específica. Observa-se que uma característica que se destaca é a área superficial do resíduo de bauxita, que é bastante elevada, o que mostra ser este resíduo muito mais fino que o próprio cimento Portland. E ainda, Morelli et al. (2012) estudaram e constataram que o diâmetro médio (D<sub>50</sub>) das partículas do resíduo é de aproximadamente 3,5 µm e Navarro et al. (2011) chegou à conclusão que a área superficial específica do resíduo de bauxita é de 31,25 g/m<sup>2</sup>. Quaresma (2009), por sua vez, obteve um valor de 2,13 g/cm<sup>3</sup> para a massa específica do resíduo de bauxita.

De acordo com Camargo et al. (2009), a maioria das partículas deste resíduo apresentam diâmetro que correspondem à faixa de 0,05mm a 0,002mm. Já Pinheiro et al. (2017)

estudaram a granulometria e classificaram em uma faixa de 0,0001 a 0,1 mm de diâmetro de tamanho de grãos, com predominância de fração silte. É válido destacar que as camadas de material mais profundas concentram as frações silte, com tendência à areia.

Segundo a classificação textural de solos proposta pela United States Department of Agriculture (USDA) o RB se enquadra como um material franco-argilo-siltoso, que se caracteriza por apresentar coesão mesmo a seco, porosidade muito pequena, intensos fenômenos de capilaridade, alguma plasticidade e existência de fenômenos de adsorção (Camargo et al., 2009).

#### 2.3.2.2 Características químicas

Como enfatizado ao longo deste trabalho, a utilização do resíduo da bauxita depende da sua composição química, que também é função da natureza da bauxita e da técnica empregada no processo Bayer. O material em questão é um resíduo altamente alcalino e contém, na sua natureza, óxidos e sais de Fe, Al, Ti, Si, Na e Ca, além de uma variedade de elementos vestigiais (Quaresma, 2009; Guerreiro et al., 2018).

Morelli et al. (2012) afirmam que a concentração de compostos ferrosos, como elevado teor de ferro, alumínio e silício, oferece a esse resíduo uma cor tipicamente avermelhada. Sabe-se que esses elementos proporcionam características mecânicas importantes para o produto a qual ele poderá ser usado, como por exemplo, melhora a resistência mecânica do material (Quaresma, 2009). Além disso, diversos outros elementos-traço, incluindo os óxidos de vanádio, gálio, fósforo, manganês, magnésio, zinco, tório, cromo e nióbio, também podem estar presentes (Silva Filho et al., 2007).

O resíduo da bauxita estudado em questão possui esses componentes químicos presentes, pois retém todo o ferro, titânio e silício presentes na bauxita (rocha de origem), além do alumínio que não foi extraído durante o refino, combinado junto ao sódio sob a forma de um silicato hidratado de alumínio e sódio de natureza zeolítica. Adicionalmente, óxidos de V, Ga, P, Mn, Mg, Zn, Th, Cr, Nb podem estar presentes como traços (Silva Filho et al., 2007).

Sabe-se ainda que o sódio e o cálcio encontrados são adicionados durante o processo de produção do alumínio (processo Bayer). Enquanto o cálcio é adicionado no tratamento cáustico, antes da digestão, o sódio é adicionado na digestão através de uma solução cáustica de hidróxido de sódio (Babisk, 2015).

O quadro 2.5 fornece a composição em dados percentuais do RB apresentado por diversos autores, em alguns países. Pela referida tabela, observa-se que este resíduo é constituído por misturas de óxidos, sendo os principais componentes  $Fe_2O_3$ ,  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $TiO_2$  e  $Na_2O$ , na maioria das vezes. Encontram-se presentes também MgO, CaO e K<sub>2</sub>O, em quantidades moderadas.

Quadro 2.5: Composição química do resíduo da bauxita.

País	Referência	Constituintes do resíduo da bauxita (%)							
		Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	MgO	K <sub>2</sub> O
Brasil	Quaresma (2009)	34,9	18,3	1,32	22,6	5,56	9,31	-	0,13
Brasil	Ribeiro (2012)	19,85	14,34	4,61	19,87	2,66	7,35	-	1,87
Brasil	CETEM (2008)	32,93	19,08	1,21	21,47	4,69	9,42	0,01	0,29
Brasil	Antunes et al., (2011)	27,04	19,19	2,17	22,87	2,98	8,01	0,04	
Brasil	Macedo et al., (2011)	39	17,9	0,87	18	7,9	6,58	0,04	0,12
Brasil	Babisk (2015)	34,49	12,2	3,84	22,11	3,61	5,31		0,66
Austrália	Worsley Alumina. Wang et al., (2008)	60	5	-	15	5	16	-	-
China	Pan et al., (2003) apud Silva, (2007)	9,47	17,75	38,69	7,17	2,41	3,23	1,51	0,5
China	Shandong Aluminium Factory. Gong & Yang (2000) apud Silva, (2007)	6,57	21,9	38,84	7,96		2,32	1,6	0,41
Coreia	Korea Chemical Co. Park & Jun (2005) apud Silva, (2007)	16,6	22,9	6,7	23,7	6,7	11,6	-	-
Espanha	ALCOA - San Cibrao. Diaz et al.,(2004) apud Silva, (2007)	37		6	12	20	5	-	-
Índia	Haláz et al., (2005) apud Silva, (2007)	62,78	6,55	0,23	15	3,77	4,88	-	-
Brasil	Rosário (2013)	30,55	18,13	1,27	22,84	3,88	11,5	-	-
Brasil	Jesus (2011)	28,77	19,5	1,99	23,55	3,49	7,86	0,001	0,67
Brasil	Brito et al., (2018)	30,4	18,2	1,47	21,6	5,79	10,9	0,1	0,1
Brasil	Garcia (2012)	25,6	20,3	1,6	22,8	3,9	11,3	-	1,7

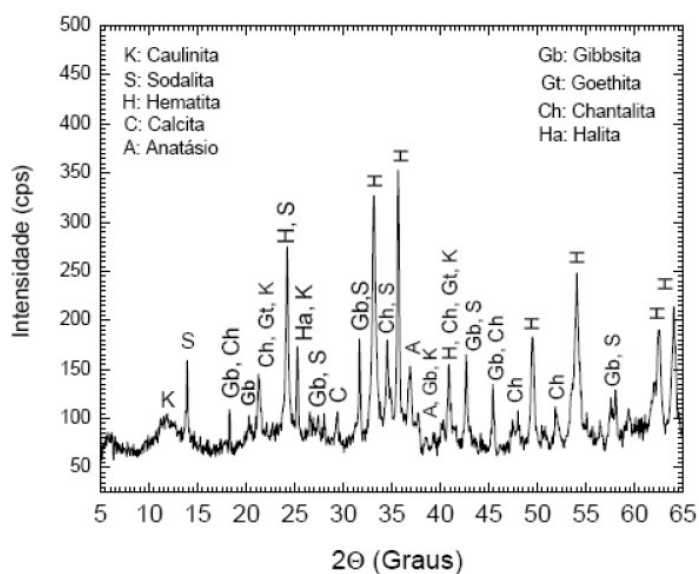
Fonte: Autor, 2021.

### 2.3.2.3 Características mineralógicas

O resíduo da bauxita apresenta uma composição mineralógica extremamente complexa, com a existência de fase amorfa, definida pela baixa intensidade e alargamento dos picos que o difratograma de raio X apresenta e fase cristalina (em maiores quantidades) (Castaldi *et al.*, 2008; Mercury *et al.*, 2010).

Segundo Mercury *et al.* (2010) a difratometria indica a presença de material amorfo que pode estar relacionado a fases silicatadas do tipo zeólitas, conhecidas como produtos de dessilicação que são comumente abordadas na literatura e material cristalino, representado pelos picos no difratograma. Os minerais comumente encontrados, como mostra a figura 2.11, são: hematita (H), anatásio (A), gibbsita (Gb), goethita (Gt), sodalita (S), chantalita (Ch), halita (Ha), calcita (C) e uma banda localizada aproximadamente em  $2\theta = 12^\circ$ , que se atribui à caulinita (K) presente na bauxita proveniente da alteração cáustica hidrotermal sofrida por este argilomineral durante o processo de digestão.

Figura 2.11: Difração de raio X do resíduo de bauxita.



Fonte: Mercury *et al.*, (2010).

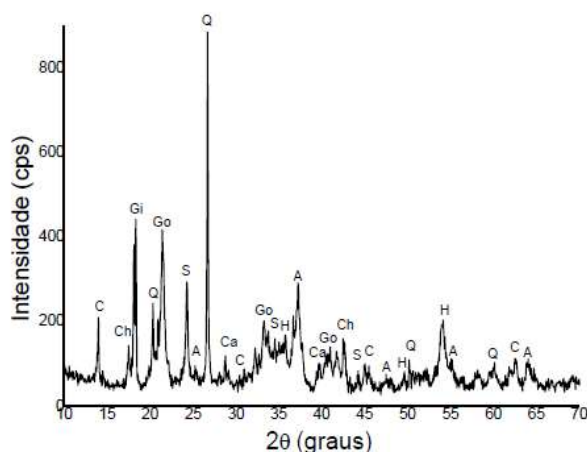
E ainda, Souza (2010) afirma que o resíduo da bauxita apresenta características mineralógicas que são provenientes tanto da própria bauxita quanto do processo bayer. Em relação aos minerais oriundos da bauxita, são vários os encontrados, como por exemplo, gibbsita (G), hematita (H), goetita (Go), anatásio (A), quartzo (Q) e caulinita (K). Já em relação aos encontrados no resíduo devido aos tratamentos no processo Bayer, tem-se: sodalita (S) e

cancretita (C). De acordo com pesquisas realizadas por CETEM (2008), o material possui em sua composição mineralógica quantidades de gibbsita, goethita, hematita, quartzo, rutilo/anatásio, hidróxido de cálcio e alumínio.

Nos estudos elaborados por Mercury et al. (2010), há a confirmação de elevados teores de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{TiO}_2$ , que por sua vez, estão presentes na forma de hematita, goethita e anatásio. Enquanto o  $\text{Al}_2\text{O}_3$  se encontra como gibbsita, caulinita, chantalita e sodalita, o  $\text{SiO}_2$  se encontra como caulinita, chantalita e sodalita.

Babisk (2015), afirma de acordo com estudos, que o RB apresenta uma composição mineralógica complexa, sendo os minerais identificados: C – caulinita  $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ , Ca – calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), Gi – gibbsita ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ), Q – quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), S – sodalita ( $\text{Na}_8(\text{SiAlO}_4)_6\text{Cl}_2$ ), GO – goethita ( $\text{FeO}(\text{OH})$ ), A – anatásio ( $\text{TiO}_2$ ), H – hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) e Ch – chantalita ( $\text{CaAl}_2(\text{OH})_4\text{SiO}_4$ ), como pode ser visto na figura 2.12.

Figura 2.12: Difração de raio x (resíduo de bauxita).

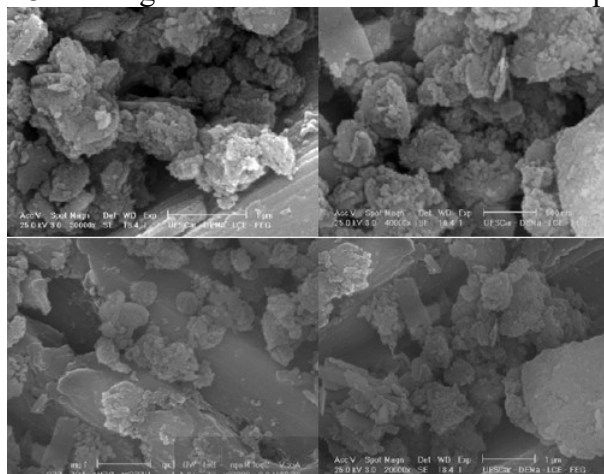


Fonte: Babisk, 2015.

#### 2.3.2.4 Características morfológicas

De acordo com estudo elaborado por Ribeiro (2012), o resíduo da bauxita apresenta uma estrutura floculada, relacionada a placas. Desta forma, é uma estrutura que favorece a adição às matrizes por ser semelhante à encontrada no cimento Portland, como mostra a figura 2.13.

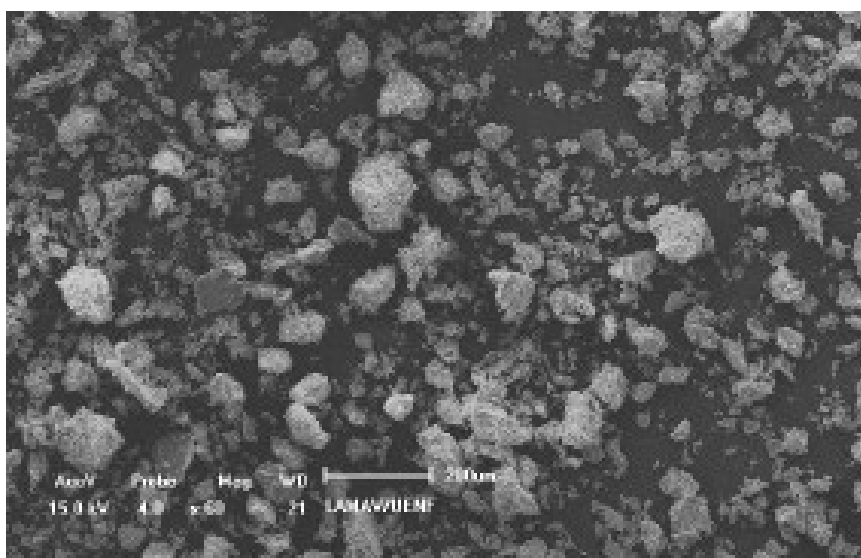
Figura 2.13: Micrografia do resíduo de bauxita obtida por MEV.



Fonte: Ribeiro, 2012.

Na figura 2.14, observa-se a presença de partículas de tamanho e forma irregular. O RB é apresentado praticamente na forma de aglomerados porosos. De acordo com Garcia (2012) a estrutura superficial irregular, junto a presença de fases porosas higroscópicas podem ser fatores importantes relacionados à elevada capacidade do material em recuperar água do ambiente.

Figura 2.14: Micrografia do resíduo de bauxita obtida por MEV.



Fonte: Garcia, 2012.

Mercury et al. (2010) verificaram a presença de partículas de forma e tamanho irregulares inferiores a 2,5 mm. Os aglomerados porosos na forma de flocos maiores que 2,5 µm também estão presentes. Afirma-se que as partículas sólidas pertencem ao grupo dos minerais de ferro e/ou a minerais presentes na bauxita que não sofreram alteração durante o processo de extração (hematita, quartzo), enquanto que as partículas muito finas de menor

tamanho ( $\leq 2,5 \mu\text{m}$ ) em forma de flocos ou aglomerado porosos pertencem a aluminosilicatos conhecidos como produto de dessilicação.

### 2.3.3 Classificação

O resíduo da bauxita é um tipo de resíduo sólido. De acordo com SEBRAE (2012), os resíduos são partes que sobram de processos provenientes de atividades animais, humanas, industriais, comerciais, dentre outros. É muito importante que esse material seja manuseado de maneira correta, uma vez que possui metais pesados que são prejudiciais à saúde humana e ambiental. Dessa forma, devido a necessidade de classificação destes resíduos, no Brasil, a NBR 10004 (ABNT, 2004) classifica os vários tipos a fim de oferecer subsídios para o gerenciamento.

Alguns estudos relacionados às condições ambientais deste resíduo já foram realizados. Dos estudos realizados, CETEM (2008) afirma a elevada alcalinidade do resíduo de bauxita, ficando em uma faixa de pH variando entre 10 e 13. Wang et al (2008) afirmam que apesar de cáustica, O RB não é considerado um resíduo de alta toxicidade. A literatura apresenta contradições quanto à toxicidade do RB. Deste modo, esse resíduo não é particularmente tóxico, inclusive a Environmental Protection Agency (EPA) não o classifica como um resíduo perigoso (BABISK, 2015). Porém, alguns autores consideram tóxico, na medida em que podem ser um perigo para as populações vizinhas devido à presença de grandes quantidades de hidróxido de sódio e cálcio. Já Mercury *et al.* (2010) classificam como resíduo Classe I - perigoso (alta corrosividade e reatividade) devido a sua alta alcalinidade.

As diferentes classificações que o RB possui em relação a sua toxicidade estão relacionadas à composição química do resíduo (influenciado diretamente pela origem da bauxita, e pelo tipo de tratamento) e aos diferentes métodos de ensaio de avaliação. Destaca-se ainda que para a aplicação do resíduo de bauxita em matrizes cimentícias devem ser consideradas as interações dos metais pesados do RB e a matriz cimentícia, pois os metais pesados presentes podem alterar algumas propriedades dos materiais cimentícios (Manfroi, 2009). É importante salientar que para estudos experimentais é válida a análise ambiental do resíduo da bauxita junto à matriz cimentícia, uma vez que a partir de então, a mistura possui sua própria classificação ambiental.

#### 2.3.4 Resíduo de bauxita e construção civil

A crescente exploração de depósitos de minérios resulta em um acúmulo cada vez maior de resíduos de mineração, como o resultante da mineração da bauxita: o resíduo da bauxita. Esta geração de resíduos sempre foi considerada um potencial risco ao meio ambiente. Dessa forma, a grande preocupação em torno da produção, aliada às dificuldades quanto à sua destinação final faz com que ocorra uma busca incessante por alternativas que visem a reutilização desse material. Dar um destino nobre a esse rejeito de mineração é um grande desafio. Nesse sentido, pesquisas são desenvolvidas com o objetivo de encontrar soluções de aproveitamento e valorização deste produto, com o intuito de minimizar a disponibilidade no meio ambiente, além de atribuir funções para este tipo de resíduo.

Os manuseios de novas técnicas de aproveitamento de resíduos vêm ganhando um grande destaque na construção civil, principalmente quando está relacionado à utilização e manuseio de rejeitos de outros setores da indústria e da diminuição de consumo de matérias primas naturais.

A busca por alternativas ambientalmente e economicamente viáveis de reciclagem incluem aplicações do resíduo de bauxita na construção civil, como por exemplo: produção de materiais cerâmicos, compósitos cimentícios, clínquer, pozolana, agregado miúdo, agregado graúdo, blocos de concreto para pavimentação, concreto autonivelante, concreto colorido, entre outros.

Neves et al., (2006) estudaram a aplicação do rejeito do processo Bayer como matéria prima na indústria cerâmica estrutural. Após a pesquisa elaborada, afirmaram que as amostras contendo 50% e 70% do rejeito, possuem todas as possibilidades de serem empregadas na produção de tijolos maciços, telhas e ladrilhos de piso, uma vez que apresentam boa resistência e absorção de água.

Santos et al. (2014) avaliaram a utilização do rejeito da produção da bauxita como matéria-prima na produção de agregados leves. A pesquisa consistiu na mistura entre resíduo de bauxita e outros materiais como sílica e argila. O resultado foi a produção de um material com resistência mecânica e densidade, que pode ser comparada aos agregados naturais utilizados pela indústria de construção civil. Este material sintético é capaz de substituir alguns agregados como o seixo rolado e a brita, com a vantagem de não precisar ser extraído da natureza, contribuindo para a preservação ambiental e consumindo o passivo armazenado pela indústria de alumina.

Morelli et al (2012) pesquisaram acerca das reações álcalis-sílica associadas ao uso do resíduo de bauxita em argamassas colantes e de revestimento. Os resultados encontrados foram satisfatórios. Percebeu-se que a adição do resíduo de bauxita provocou uma redução na tensão de escoamento e um aumento na viscosidade plástica das argamassas, devido à menor quantidade de água livre na mistura e devido à hidratação do cimento.

Ao contrário do esperado, em relação à reação álcali-sílica (RAS), o RB não aumentou esta reação. Provavelmente este resultado esteve associado ao efeito de diluição do teor de cimento, pois o cálcio é fundamental na RAS. A presença do resíduo de bauxita resulta uma redução na expansibilidade decorrente da reação com o MgO e o CaO; as reações expansivas dos álcalis presentes no resíduo de bauxita ( $\text{Na}^+$  e  $\text{Ca}^+$ ) não comprometem o uso deste resíduo em substituição parcial do cimento Portland para aplicações secundárias. É válido salientar que o resíduo da bauxita apresenta uma estrutura floculada, associada a placas. Portanto, é uma estrutura que favorece a sua adição à matrizes cerâmicas por ser semelhante à encontrada no cimento Portland.

Rocha et al (2010) analisaram o comportamento do resíduo de bauxita como material pozolânico em substituição ao cimento para a produção de argamassas. Em seus estudos, chegaram à conclusão que quando calcinada à 600° C, o resíduo apresenta boa atividade pozolânica, e as argamassas produzidas com esse resíduo apresentam resistência à compressão dentro do limite normativo, podendo o material substituir parcialmente o cimento.

Vale a pena destacar o estudo realizado por Carneiro et al (2008). Em suas pesquisas, eles observaram o comportamento de blocos cerâmicos estruturais produzidos a partir da mistura de resíduo de bauxita e argila. A produção dos blocos se deu a partir da mistura de 60% de LV com 40% de argila. Após a realização dos ensaios, observou-se que os blocos estruturais produzidos atenderam aos parâmetros normativos quanto ao índice de absorção de água e resistência à compressão. E mais, as resistências médias e características foram superiores às dos blocos cerâmicos de referência.

É de suma importância mencionar o trabalho elaborado por Rosário (2013). Em seu trabalho, a pesquisadora analisou a utilização de agregado graúdo sintético produzido a partir do resíduo de bauxita. Os resultados encontrados apresentaram resultados satisfatórios, demonstrando que os materiais apresentam potencial para uso na indústria da construção civil.

Sousa et al. (2017) estudaram a avaliação química do resíduo de bauxita da indústria de alumínio para a fabricação de bloquetes intertravados. O estudo teve como objetivo avaliar quimicamente a influência do resíduo de bauxita como agregado fino em argamassa de cimento

para confecção de blocos de pavimentação. As amostras do estudo foram preparadas com percentuais variados de resíduo de bauxita substituindo a areia. Dessa forma, com a adição do resíduo da bauxita, adicionou-se ao sistema um teor elevado de óxido de ferro e alumina que influenciaram nas propriedades mecânicas finais da matriz.

Chegou-se à conclusão que na caracterização química das amostras obteve-se variações dos elementos devido a adição do resíduo da bauxita, os mais significativos foram: alumina, ferro, sódio e o cálcio. Em relação às análises de lixiviação, todas as foram classificadas como classes II-A não inerte. Assim, constatou-se que há um potencial a ser desenvolvido de aplicação desse material no setor da construção civil, sendo uma alternativa viável financeira e ambiental.

## **2.4 Concreto e argamassa**

O concreto é um compósito constituído basicamente por agregados miúdos e graúdos, dispersos em uma matriz formada pelas reações químicas durante a hidratação do cimento Portland pela água. Ou ainda, o concreto é um material de construção proveniente da mistura, em proporção adequada, de aglomerantes, agregados, água e por vezes, aditivos (Pinheiro, 2007). Destaca-se que o material em questão é bastante utilizado na construção civil e que pode ser encontrado desde alvenaria de casas simples até nas construções mais complexas no mundo, como pontes, edifícios e até mesmo em rodovias (Pedroso, 2009).

Cerca de 11 bilhões de toneladas de concreto são produzidas ao ano, o que resulta em aproximadamente em um consumo médio de 1,9 toneladas de concreto por habitante ao ano, valor inferior apenas ao consumo de água (Pedroso, 2009). E ainda, no Brasil, o concreto que sai de centrais dosadoras gira em torno de 30 milhões de metros cúbicos (IBRACON, 2009). Ressalta-se que a mistura entre os materiais que compõe o concreto recebe outros nomes até chegar à mistura final denominada concreto simples. Dessa forma tem-se: pasta, que é o nome dado à mistura entre cimento e água (figura 2.15); argamassa, definida como a mistura entre a pasta e areia (figura 2.16) e por fim, o concreto simples (figura 2.17), que é a mistura entre a argamassa e agregado graúdo.

Figura 2.15: Componentes da pasta.



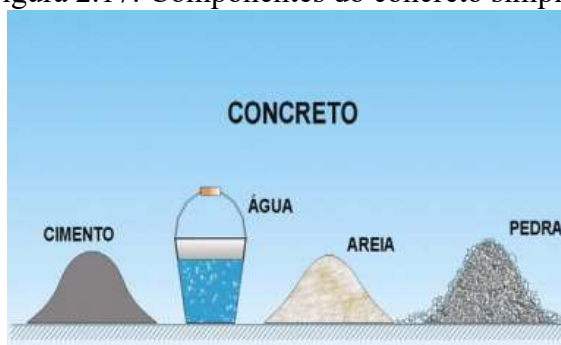
Fonte: Pinheiro, 2007.

Figura 2.16: Componentes da argamassa.



Fonte: Pinheiro, 2007.

Figura 2.17: Componentes do concreto simples.



Fonte: Pinheiro, 2007.

O concreto possui duas propriedades que o destacam como um material construtivo. A primeira é a sua resistência à água que faz com que sofra menor deterioração quando exposto à água e a segunda é a sua plasticidade, o que possibilita obter formas construtivas inusitadas, como se vê nas obras arquitetônicas de Niemayer.

Como mencionado anteriormente, a matéria prima utilizada para a fabricação de argamassa e concreto é basicamente areia, água, cimento e brita. Dessa maneira, muito tem se

discutido sobre tais materiais, uma vez que direta ou indiretamente eles são extraídos da natureza, alterando assim o ambiente natural em que se encontravam originalmente. Como exemplo, tem-se as grandes extrações de jazidas de areia, que muitas vezes são realizadas sem supervisão ou regulação, acarretando problemas como erosão de praias, problemas com percursos de rios, lençol freático, além de destruir os ecossistemas costeiros, entre outros.

Logo, pesquisas vêm se desenvolvendo ao longo do tempo a fim de encontrar soluções ambientalmente e economicamente viáveis na substituição desses materiais na construção civil. Os principais materiais estudados são aqueles resíduos gerados em grandes quantidades e que não possuem nenhuma utilidade, como os resíduos industriais. Dessa forma o aproveitamento de tais resíduos na substituição de materiais naturais costuma ser uma alternativa a ser estudada, pois reduziria o consumo de recursos provenientes de fontes naturais e aumentaria a oferta de insumos no mercado da construção civil.

#### 2.4.1 Exploração da areia e os impactos gerados

Ao longo dos anos, a construção civil teve um desenvolvimento significativo. Como consequência desse desenvolvimento, houve o aumento da demanda por recursos naturais. No que tange à construção civil, um dos principais recursos da natureza é a areia, uma vez que é a matéria prima dos materiais mais utilizados na construção: o concreto e argamassa. É sabido que a extração de jazidas de areia é de suma importância para o desenvolvimento socioeconômico de um país, porém, também é responsável por diversos impactos negativos, como alteração na geomorfologia fluvial de cursos d'água, aumento do processo de erosão, depreciação da qualidade da água, entre outros (Nogueira, 2016).

De acordo com o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente - PNUMA (2019), a cada ano cerca de 40 a 50 bilhões de toneladas de areia são extraídas, ou seja, há uma intensa exploração desse recurso natural a fim de suprir principalmente a indústria da construção civil. E ainda, de todo material que é extraído da terra, aproximadamente 85% é a areia. Destaca-se que esses dados foram baseados em números de produção e vendas de cimento em todo o mundo através de uma relação lógica de uso, uma vez que esse exorbitante consumo é impulsionado pela crescente urbanização. Segundo a Organização das Nações Unidas (2018), a porcentagem da população global que vive em áreas urbanas irá aumentar de 54% para 66% até o ano de 2050. A contar de 1950, a população que vive em área urbana aumentou de 746 milhões para 3,9 bilhões.

O PNUMA acredita que o fato de a extração das jazidas de areia estarem reguladas de forma bem diferente em todo o mundo, faz com que diversas regiões importantes para os ecossistemas e para a biodiversidade se tornem mais vulneráveis. Para o Programa, essa extração acaba se tornando uma questão transfronteiriça, uma vez que não afeta o meio ambiente, mas também ocasiona problemas socioeconômicos, culturais e, por vezes, políticos de longo alcance.

A extração de jazidas de areia, principalmente quando realizada sem supervisão acaba danificando rios, destruindo ecossistemas costeiros e causando erosão em praias. Essa atividade também possui um custo elevado quando se fala em exploração de grandes jazidas e dragagens. Nota-se que como a dragagem de areia é realizada principalmente para fins de construção, os mineiros se concentram em ecossistemas fluviais e costeiros. Consoante a isso, a alteração do fluxo e da capacidade do rio pode ocasionar secas ou inundações. Salienta-se que pelo menos 24 ilhas da Indonésia desapareceram somente para construir Singapura (Mesquita, 2019).

Como demonstrado, a mineração excessiva acaba afetando diversos setores sociais em variadas localidades no mundo. Ela é responsável pela maior quantidade de penetração de água salgada durante a estação seca, o que acaba prejudicando o abastecimento doméstico de água e aumenta a salinização das terras cultivadas. Estudos comprovam que em locais onde ocorre essa atividade, pode ocorrer a propagação de doenças: no Irã, por exemplo, grandes piscinas de água limpa e calma, geradas pela extração de areia de rios, provaram ser locais de reprodução de mosquitos transmissores da malária (BBC NEWS, 2018).

Outro efeito negativo é a mudanças no habitat de espécies animais e vegetais. Em países como o Brasil, a mineração de areia invade áreas protegidas de floresta tropical perto do Rio de Janeiro e também é acusada de causar degradação de áreas da Amazônia. Já nos Estados Unidos, a extração mineral provocou a erosão de áreas costeiras na Califórnia. Alguns cientistas especularam que a erosão e o levante dos mares poderiam fazer 70% das praias do Estado desaparecer completamente até 2100 (BBC NEWS, 2018).

Na Europa, mais precisamente em Portugal, a ruptura de uma ponte em 2001, onde mais de 59 pessoas morreram, teve a mineração como umas das principais causas. Ressalta-se ainda que em 2017, inundações que causaram estragos em Houston, quando o furacão Harvey atingiu o continente, foram intensificadas pela exploração de jazida de areia no rio San Jacinto (BBC NEWS, 2018).

## 2.5 Telha de concreto

A grande capacidade criativa de engenheiros e arquitetos, além da precisão dos novos métodos modernos de cálculos acabam impulsionando o desenvolvimento das tecnologias do concreto e cimento, possibilitando ao homem modificar o meio em que vive. E mais, a inenarrável disponibilidade dos materiais que formam o concreto e as diversas aplicações deixam claro que ele é solução para inúmeros elementos construtivos, como por exemplo, as telhas de concreto (figuras 2.18 e 2.19).

Figura 2.18: Telha de concreto.



Fonte: Votorantim Cimentos, 2018.

Figura 2.19: Telha de concreto.



Fonte: Autor, 2020.

Segundo a norma brasileira NBR 13858-2 (ABNT, 2009), a telha de concreto é um componente para cobertura com forma essencialmente retangular e perfil geralmente ondulado,

composto de cimento, agregado e água, aditivos ou adições, fornecido na cor natural ou colorido pela adição de pigmento. Para que uma telha de concreto seja utilizada, é necessário que atenda a todos requisitos técnicos dessa norma, que tem como objetivo fixar os requisitos exigíveis para o recebimento e aceitação de telhas de concreto, destinadas à execução de telhados.

Historicamente, a origem da telha de concreto é datada por volta do ano de 1844, quando Adolf Kroher registrou a primeira patente na Alemanha. Dessa forma, 20 anos após a patente do cimento Portland, surgiu a iniciativa para fabricar uma telha a base de cimento. Do ano de 1844 a 1919 a produção de telhas era realizada em máquinas de prensagem manual. Posteriormente, as técnicas foram evoluindo e chegando até os dias atuais, com produção automática em misturadores e extrusoras. Durante todos esses anos, muitas importantes melhorias tecnológicas foram sendo implantadas na fabricação das telhas de concreto, proporcionando o rápido crescimento dessa indústria no mundo (ZIEGEL, 2015).

No Brasil, as produções das telhas de concreto iniciaram em 1976 no estado de São Paulo. Embora seja uma produção relativamente nova, o mercado só tende a crescer quando relacionado a esses artefatos de concreto. Empresas produzem telhas nos mais diversos formatos e cores e com qualidade comparada aos melhores fabricantes do mundo. Destaca-se que a primeira norma criada no Brasil foi publicada em 1997 pela ABNT e revisada em 2009. Devido à grande produção, houve a necessidade da criação da Associação Nacional dos Fabricantes de Telhas Certificadas de Concreto (ANFATECCO) para aprimoramento e conformidade do produto (Ziegel, 2015).

Na indústria da construção civil, indiscutivelmente, um dos materiais mais utilizados é o cimento Portland. Entretanto, quando se fala em telhado, lembra-se das telhas cerâmicas, que são utilizadas há séculos como um dos elementos principais de coberturas residenciais ou prediais. Com o passar do tempo, as telhas de concreto têm se destacado na indústria. Até então, esse elemento construtivo era presente apenas em residências de alto padrão, mas, ao transcorrer dos anos ele está cada vez mais comum. Dentre os motivos pelos quais a fabricação de telhas de concreto vem se desenvolvendo, tem-se: a falta de matéria-prima em determinadas regiões para confeccionar telhas cerâmicas e gasto de muita energia em seu processo de produção, além de liberar grande quantidade de gás carbônico (Valcarenghi., et al 2011).

E ainda, de acordo com Toranzo (2017), a telhas de concreto possuem inúmeras vantagens, entre as quais, tem-se:

- Resistência: a referida telha é mais resistente que a telha cerâmica, uma vez que apresenta o dobro na unidade de medida que mensura resistência, o que pode significar menor perda por quebra em carga, descarga e transporte;
- Manutenção: devido a elevada resistência, quando comparada à telha cerâmica, romper esse material torna-se uma tarefa difícil, o que resulta na redução e consequentemente, barateamento da manutenção periódica;
- Encaixe: como esse material é produzido em formas e é mais robusto, quando comparado à telha cerâmica, sua aparência e estrutura ficam próximos a perfeição, facilitando encaixe e alinhamento;
- Impermeabilidade: esse tipo de telha absorve pouca água, não precisando suportar o peso da água, que se acumula durante o período de chuva.

#### 2.5.1 Fabricação

O processo de fabricação de telhas de concreto (figura 2.20) é considerado simples e é realizado em algumas etapas, entre as quais pode-se citar: mistura dos materiais, extrusão e cura das peças em estufas. Na etapa de mistura, os materiais (cimento, areia, água e aditivo) são adicionados em um misturador, com a finalidade de transformá-los em uma massa uniforme e homogênea. Destaca-se que a areia em especial, passa por um peneiramento prévio com a finalidade de retirar corpos estranhos, como casca de árvores, cascalhos, entre outros.

Após a mistura, a massa homogênea (argamassa) segue para uma caixa alimentadora da máquina por meio de uma esteira, chegando até a extrusora. A extrusora tem a função de fazer a moldagem das telhas. De acordo com Isaia (2007), elas são produzidas por meio de conformação por compactação ou por extrusão.

Essas peças de concreto são fabricadas em grande quantidade por equipamentos de alta produção com processos de adensamento associados à prensagem de grande capacidade. Na etapa de extrusão, a argamassa homogênea é depositada sobre formas metálicas e, posteriormente são prensadas a partir de um êmbolo que é capaz de transmitir esforços uniformes em toda superfície da peça, definindo assim a forma das telhas (Isaia, 2007).

Logo após o processo de extrusão, as telhas moldadas são retiradas das formas e seguem em prateleiras para as câmaras úmidas com o objetivo de realizar o processo de cura.

Figura 2.20: Processo de fabricação de telha de concreto. (a): peneiramento da areia. (b): esteira. (c): misturador. (d): extrusora.



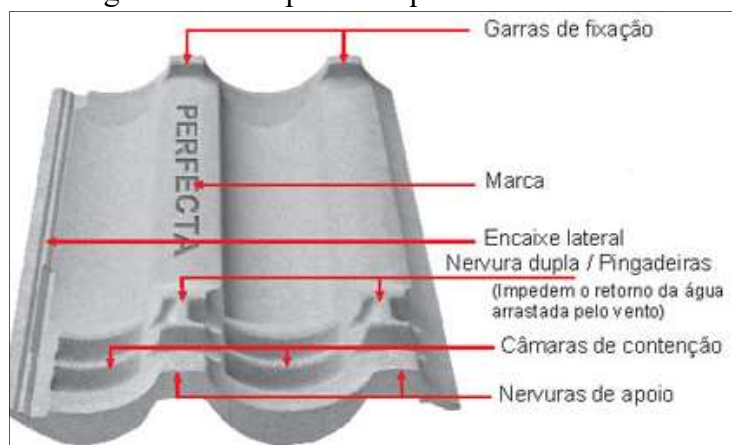
Fonte: Brandão et al., 2015.

## 2.5.2 Características da telha de concreto

### 2.5.2.1 Dimensionais e geométricas

De acordo com a norma brasileira NBR 13858-2 (ABNT, 2009), as telhas devem possuir os seguintes dispositivos mostrados na figura 2.21 abaixo:

Figura 2.21: Dispositivos presentes nas telhas.



Fonte: Perfecta, 2017

E mais, para a utilização e venda no mercado, elas também devem atender alguns requisitos dimensionais sinalizados na norma que aborda esse material, como os requisitos apresentados no quadro 2.6 abaixo.

Quadro 2.6: Valores limites da geometria da telha.

Características	Valores e limites
Comprimento e largura nominais	Estabelecido e declarados pelo fabricante, devendo obedecer às seguintes tolerâncias.
Comprimento total	
Comprimento útil declarado	
Largura total	
Largura útil declarada	1) Dimensões até 420 mm, tolerância de $\pm 2$ mm; 2) Dimensões acima de 420 mm, tolerância de $\pm 0,5\%$
Sobreposição lateral	Estabelecido e declarados pelo fabricante, devendo obedecer à tolerância de $\pm 5\%$ .
Sobreposição longitudinal mínima	
Altura característica do perfil	
Gap / Máximo individual	60 mm

Fonte: ABNT NBR 13858-2, 2009 (Adaptado pelo autor).

### 2.5.2.2 Propriedades a serem avaliadas

Segundo a norma brasileira NBR 13858-2 (ABNT, 2009), as telhas devem possuir algumas características técnicas (propriedades físicas) que devem ser controladas e comprovadas por meio de ensaios laboratoriais para que sejam utilizadas no mercado da construção civil, dessa forma, tem-se o quadro 2.7 abaixo.

Quadro 2.7: Limites exigidos pela NBR 13858 – 2.

Requisitos	Limites
Peso seco	<p>O peso das telhas de concreto é expresso em decanewton por metro quadrado de área útil de telha. Os resultados finais devem ser menores ou iguais a:</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) 52 daN/m<sup>2</sup> para classe A;</li> <li>2) 50 daN/m<sup>2</sup> para classe B;</li> <li>3) 48 daN/m<sup>2</sup> para classe C;</li> <li>4) 45 daN/m<sup>2</sup> para classe D;</li> <li>5) 55 daN/m<sup>2</sup> para telhas planas;</li> </ol>
Impermeabilidade	A telha não deve apresentar vazamentos ou formação de gotas em sua face inferior, sendo, porém, tolerado o aparecimento de manchas de umidade, quando submetida ao ensaio para verificação da permeabilidade;
Absorção de água	A absorção de água da telha não deve ser superior a 10%;
Carga de ruptura	A carga de ruptura à flexão aos 28 dias de idade possui intervalos limites entre 1200 a 2400 N, dependendo da classe do perfil e função da profundidade da telha.

Fonte: ABNT NBR 13858-2, 2009 (Adaptado pelo autor).

Em relação a absorção de água, esta não deve ser superior a 10%. Deve-se determinar a absorção em função da quantidade de água absorvida dentro de limites preestabelecidos de umedecimento e secagem.

Na impermeabilidade é verificada através da pressão de coluna d'água onde a telha não deve apresentar vazamentos ou formação de gotas em sua face inferior, sendo, porém, tolerado o aparecimento de manchas de umidade, como citado no quadro 8.

A carga de ruptura de uma telha é verificada pela aplicação de uma força, a velocidade definida, no centro da telha, estando o ponto de aplicação em contato com a superfície da telha onde a carga de ruptura a flexão possui valores mínimos determinados de acordo com a classe do perfil em função da profundidade da telha, como demonstrado no quadro 2.8.

Quadro 2.8: Classe do perfil em função da profundidade da telha e da carga de ruptura à flexão.

Classe do perfil	Profundidade do perfil (d) em mm	Carga de ruptura à flexão
A	$d \geq 50$	2400 N
B	$40 \leq d < 50$	
C	$30 \leq d < 40$	2000 N
D	$20 \leq d < 30$	
Plana	$d < 20$	1200 N

Fonte: ABNT NBR 13858-2, 2009 (Adaptado pelo autor).

### 2.5.3 Estudos realizados com telha de concreto

Como destacado no início deste trabalho, a quantidade de resíduos sólidos gerados pela atividade industrial cresce a cada ano, representando milhões de toneladas por dia no mundo todo. Dessa forma, surge a necessidade do desenvolvimento de estratégias e soluções capazes de reduzir os impactos ambientais causados por esses resíduos. Na busca por novas alternativas, tem-se o setor da construção civil, que é um ramo que apresenta grande potencial para aproveitamento desses materiais. Desse modo, vários estudos são realizados com o objetivo dar um destino adequado e consequentemente, reduzir os impactos ambientais, como por exemplo, estudos relacionados à telha de concreto.

Brandão et al (2015) analisaram as propriedades físicas, mecânicas e térmicas de telhas de concreto fabricadas com adição de diferentes materiais isolantes. Os materiais utilizados foram: vermiculita em proporções de 5% (TAV5) e 10% (TAV10), poliestireno em proporções de 5% (TAI5) e aditivo incorporador de ar em proporções de 5% (TAA5). Com base nos resultados das propriedades físicas, verificou-se que todos os materiais testados atenderam aos requisitos exigidos pela norma brasileira. Já em relação às propriedades mecânicas, a carga de ruptura à flexão foi inferior ao mínimo recomendado. Porém, em geral, a incorporação de materiais com características isolantes em telhas de concreto apresentou boa eficiência na redução da temperatura da face interna das telhas.

Pimentel (2000) realizou uma pesquisa que teve como objetivo desenvolver a dosagem adequada de compósito madeira-cimento utilizando resíduos de *Pinus caribaea* oriundos da indústria de lápis Faber Castell para a produção de telhas de concreto. Em seu estudo, os resultados indicaram a grande potencialidade do uso desses resíduos para a produção das telhas, uma vez que obtiveram resistências mecânicas compatíveis com a norma, além de atenderem aos requisitos mínimos do ensaio de permeabilidade. Destaca-se também, que a telha executada

com partículas de *Pinus caribaea* leva vantagem sobre a de concreto pois é cerca de 40% mais leve, resultando em menor carga estrutural e consequentemente menor gasto com estrutura do telhado.

Antunes et al (2015) estudaram a adição de fibra oriunda do bagaço de cana como reforço em telha de concreto. Na pesquisa, as fibras foram tratadas com o método de deslignificação alcalina. Como resultado, em relação ao ensaio de flexão as 6 telhas com adição de fibra apresentaram valores de carga na ruptura inferiores aos obtidos nas telhas sem adição, porém o valor médio encontrado de 3,70 kN atendeu às especificações da NBR 13858-2 (ABNT, 2009). No ensaio de permeabilidade, 2 peças apresentaram vazamentos e no ensaio de estanqueidade do sistema de cobertura baseado na NBR 15575-5 (ABNT, 2013) não ocorreu vazamento após uma aspersão de água por 6 h.

Fernandes (2017) teve como objeto de estudo o desenvolvimento da telha de concreto ecoeficiente utilizando resíduo de mármore do tear de fio diamantado. Como resultado a nova telha de concreto apresentou carga de ruptura à flexão entre 2524 N e 2528 N e absorção de água entre 8,3 e 8,2%, os quais atendem às especificações técnicas brasileiras para esta tipologia de material de construção.

No estudo de Schneider et al. (2017), houve a análise da viabilidade técnica da utilização de telhas de concreto leve com adição de EPS como agregado miúdo. Nesse estudo, os pesquisadores verificaram que as telhas com 35% e 50% apresentaram falhas no processo de produção e que todas as amostras com adição de EPS não obtiveram resultados satisfatórios para resistência à flexão conforme o mínimo estabelecido pela NBR 13858-2. Porém, quando comparadas com as telhas cerâmicas que possuem resistência a flexão entre 1000 N e 1300 N, as telhas com adição de EPS apresentaram resultados superiores que variam entre 1237.07 N a 1987.42 N, o que evidencia um produto com potencialidade para novos estudos a fim de viabilizar tecnicamente sua produção.

E por fim, Lima et al (2013) que avaliaram a utilização de lama abrasiva gerada no beneficiamento de mármore e granito para confecção de telhas de concreto. Neste estudo, as telhas foram confeccionadas com 10% e 20% de incorporação de lama abrasiva em substituição à areia fina. Após a confecção das telhas, essas passaram por testes de absorção de água, permeabilidade e ruptura à flexão. A partir dos resultados obtidos pode-se concluir que o efeito resultante da incorporação da lama na massa para confecção das telhas de concreto foi favorável, atendendo aos limites estabelecidos pela norma.

### **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

#### **3.1 Materiais**

Com o objetivo de fabricar as telhas de concreto e os corpos de prova desta pesquisa, os materiais utilizados neste estudo foram: cimento Portland tipo CP-IV 32, agregado miúdo quartzoso, água e resíduo da bauxita.

##### **3.1.1 Cimento Portland**

Neste estudo, foi utilizado o cimento Portland pozolânico CP-IV 32, uma vez que é disponível comercialmente na região metropolitana de São Luís, além de ser comumente utilizado pela empresa que fabricou as telhas de concreto. Este material possui em sua composição de 15 a 50% de material pozolânico. Destaca-se que o cimento Portland CP-IV 32 é especificado pela NBR 5736 (ABNT, 2018).

A escolha desse cimento se deu pela estabilidade no uso de agregados reativos, além de diminuir a permeabilidade da matriz cimentícia e o risco de segregação (separação dos materiais) e fissuração.

Para a caracterização do material, foram utilizadas as normas NBR 16605 (ABNT, 2017) com a finalidade de determinar a massa específica e NBR 11579 (ABNT, 2013) para determinar o índice de finura por meio da peneira nº 200. Também foram realizados ensaios de granulometria à laser e fluorescência de raio-X (análise química do material) por meio de técnicas analíticas realizadas no Laboratório de Caracterização Tecnológica na Universidade de São Paulo – USP.

##### **3.1.2 Agregado miúdo**

O agregado miúdo utilizado na pesquisa foi do tipo quartzoso proveniente de jazidas encontradas no estado do Maranhão e comercializado em regiões próximas. Iniciou-se a pesquisa com a secagem da areia, ao ar livre, em local protegido de chuva e vento. Na pesquisa, trabalhou-se com o agregado na condição seca.

O agregado foi caracterizado de acordo com os ensaios de massa específica recomendado pela NBR 9776 (ABNT, 1987), massa unitária e índice de vazios conforme NBR

NM 45 (ABNT, 2006) e determinação da distribuição granulométrica segundo NBR NM 248 (ABNT, 2003).

### 3.1.3 Água

A água utilizada foi proveniente da rede pública de abastecimento local, fornecida e tratada pela Universidade Estadual do Maranhão (UEMA).

### 3.1.4 Resíduo da Bauxita

O resíduo da bauxita utilizado nesta pesquisa é oriundo da indústria de alumina no estado do Maranhão (figura 3.1), mais precisamente da zona industrial da cidade de São Luís. A amostra foi retirada dos lagos de lama vermelha, levando em consideração a NBR 10007 (ABNT, 2004) que trata da amostragem de resíduos sólidos. Lembrando que o resíduo foi utilizado *in natura* para evitar gastos energéticos e viabilizar o seu emprego.

Figura 3.1: Lagos de resíduo da bauxita no Maranhão.



Fonte: Google maps, 2021 (Adaptado pelo autor).

Para conhecimento das características do resíduo da bauxita, o material foi submetido a diversos ensaios (tabela 3.1) realizados pelo Laboratório de Caracterização Tecnológica (LCT) pertencente à Escola Politécnica da USP (Universidade de São Paulo), vinculada ao Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo.

Tabela 3.1: Ensaios de caracterização do resíduo da bauxita.

Ensaios de caracterização		
Ensaio	Método	Laboratório
Difratometria de raios X (DRX)	Método do pó	LCT
Fluorescência de raios X (FRX)	Espectrômetro de FRX (perda ao fogo)	LCT
Massa específica	Pictrometria com intrusão de gás hélio	LCT
Granulometria à laser	Ultrassom com meio de dispersão em água deionizada	LCT
Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	EDS	LCT

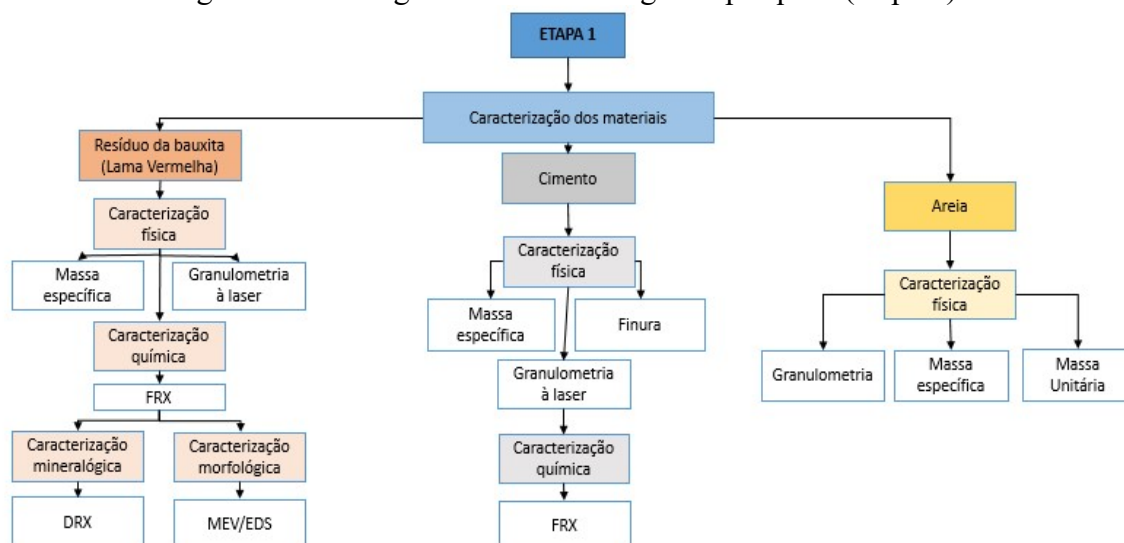
Fonte: Autor, 2022

### 3.2 Métodos

Nesta seção foram realizadas as análises de cada material e a matriz das composições, substituindo parcialmente o agregado miúdo (areia) pelo resíduo de bauxita em massa de 0, 15, 30, 45 e 60%. Com a finalidade de atingir os objetivos desta pesquisa, a metodologia foi dividida em 3 etapas:

A etapa 1 estudou a caracterização dos materiais utilizados para a fabricação dos corpos de prova argamassados (cilíndrico e prismáticos) e telhas de concreto. O intuito foi avaliar se os materiais escolhidos são adequados para a fabricação de telha de concreto. Nesta etapa foi realizada a caracterização físico-química do cimento (granulometria à laser, FRX, finura e massa específica), caracterização física da areia (granulometria, massa específica e massa unitária) e do resíduo da bauxita (massa específica e granulometria à laser), além da caracterização química, mineralógica e morfológica do resíduo por meio dos ensaios de FRX (fluorescência de raio-x), DRX (difração de raio-x) e MEV (microscopia eletrônica de varredura), respectivamente. A seguir, tem-se o fluxograma da etapa 1 (figura 3.2).

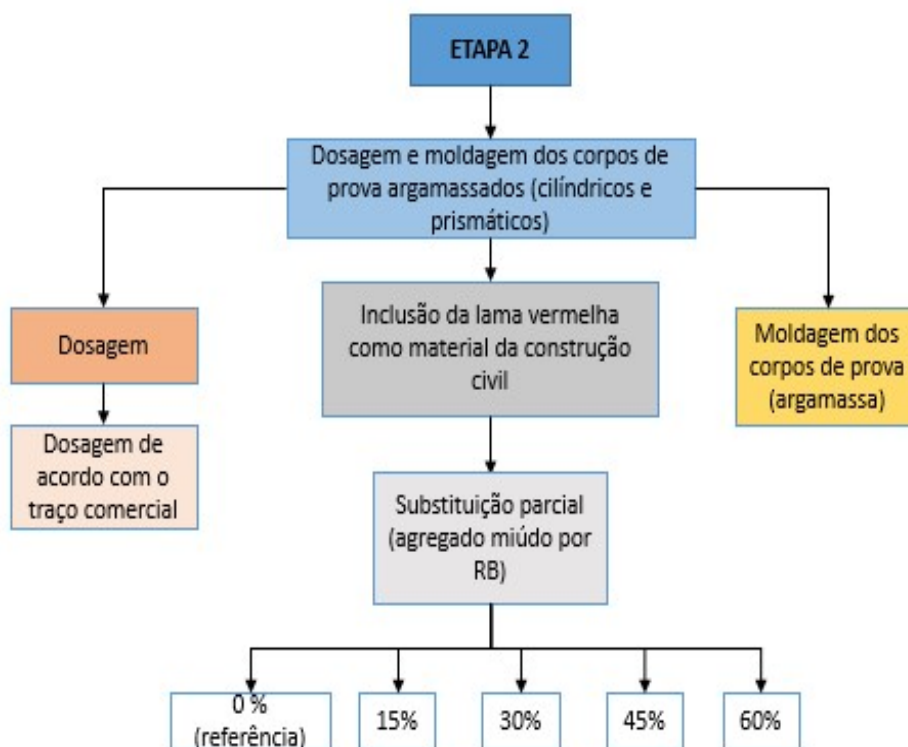
Figura 3.2: Fluxograma da metodologia da pesquisa (etapa 1).

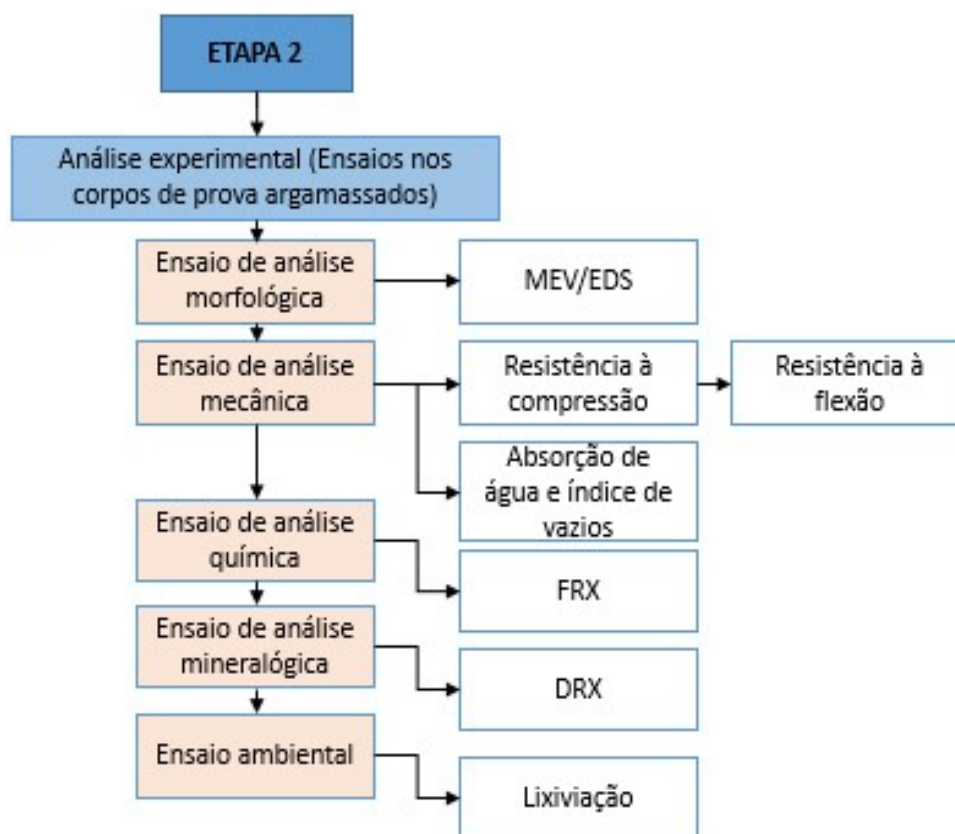


Fonte: Autor, 2022

Na segunda etapa (figura 3.3), avaliou-se o efeito da substituição parcial do resíduo da bauxita por areia natural em matrizes cimentícias em massa nas porcentagens de 0, 15, 30, 45 e 60% em corpos de prova argamassados prismáticos e cilíndricos. Os testes nesta fase da pesquisa tinham por objetivo analisar o teor ótimo de substituição parcial de resíduo.

Figura 3.3: Fluxograma da metodologia da pesquisa (etapa 2).



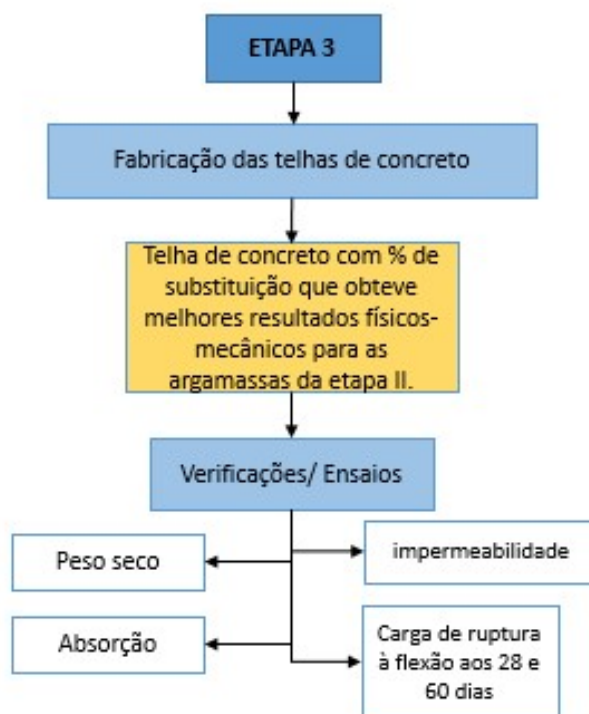


Fonte: Autor, 2022

A variáveis dependentes analisadas foram a resistência à compressão, resistência à flexão e absorção de água total. Como fatores controláveis, tem-se o teor de substituição (0, 15, 30, 45 e 60%) e a idade do ensaio (3, 7 e 28 dias). Como ensaios complementares, efetuou-se os ensaios de análise morfológica (MEV/EDS), química (FRX), mineralógica (DRX) e ambiental (lixiviação).

Uma vez definido o teor ótimo de substituição do resíduo da bauxita, iniciou-se a fase 3 da pesquisa. A etapa 3 correspondeu à fabricação de telhas de concreto com o resíduo da bauxita na porcentagem que obteve os melhores resultados físico-mecânicos entre as amostras argamassadas com teores de resíduo na etapa II. Posteriormente, foram analisadas algumas propriedades das telhas através da execução de ensaios, tais como: peso seco, impermeabilidade, absorção e carga de ruptura à flexão aos 28 e 60 dias (figura 3.4).

Figura 3.4: Fluxograma da metodologia da pesquisa (etapa 3).



Fonte: Autor, 2022.

### 3.2.1 Preparação das argamassas

Com a finalidade de mensurar os efeitos da substituição parcial da areia pelo resíduo da bauxita nas propriedades de argamassas, foi preparada uma argamassa de controle sem substituição da areia pelo resíduo da bauxita, de traço padrão em volume. É válido destacar que a argamassa produzida foi utilizada para corpos de prova cilíndricos e prismáticos.

O traço padrão em volume utilizado foi o mesmo executado pela empresa que fabrica telhas de concreto na cidade de São Luís, uma vez que o estudo está objetivado a analisar o comportamento de argamassas semelhantes àquelas utilizadas na fabricação de telhas de concreto.

Desta forma, utilizou-se um traço padrão de 1:3,75:0,15 (cimento: areia: água), que será citado no presente estudo como argamassa ARef e argamassas substituindo em massa a areia nos teores de 15% (A15RB), 30% (A30RB), 45% (A45RB) e 60% (A60RB), pelo resíduo da bauxita *in natura*.

Essas porcentagens foram escolhidas com base em estudos já realizados. Ganesh Prabuh et al. (2014), por exemplo, utilizaram areia de fundição de alumínio em substituição ao agregado miúdo em porcentagens de 10, 20, 30, 40 e 50%. Já Rosário (2013), substituiu agregado natural por agregado sintético de resíduo da bauxita em porcentagens de 50 e 100%. Dessa forma, buscou-se utilizar um intervalo de substituição próximo aos já apresentados pela literatura.

Os traços com adição de RB sofreram aumento na quantidade de água, uma vez que o resíduo da bauxita é um material bastante absorvente. Dessa forma, a medida que a quantidade desse material foi aumentando, aumentou-se também experimentalmente a quantidade de água com o objetivo de facilitar a moldagem e compactação manual deste material, sem perder a característica de uma argamassa seca. Destaca-se que a consistência do traço apresenta uma argamassa seca, uma vez que a fabricação de telhas ocorre pelo processo de extrusão.

Para a produção das argamassas de cimento Portland foram utilizadas as seguintes quantidades de corpos de prova apresentadas na tabela 3.2 e 3.3 e os seguintes traços definidos na tabela 3.4.

Tabela 3.2: Especificação dos CP's argamassados cilíndricos.

Amostra	% de substituição	Quantidades de CP's 50 x 100 mm			Absorção de água	Total Parcial
		Resistência à compressão				
		3 dias	7 dias	28 dias		
Aref	0	3	3	3	3	12
A15RB	15	3	3	3	3	12
A30RB	30	3	3	3	3	12
A45RB	45	3	3	3	3	12
A60RB	60	3	3	3	3	12
TOTAL						60

Fonte: Autor, 2021.

Tabela 3.3: Especificação dos CP's argamassados prismáticos.

Quantidades de CP's 200x40x20 mm			
Amostra	% de substituição	Resistência à	Total Parcial
		tração na flexão 28 dias	
Aref	0	3	3
A15RB	15	3	3
A30RB	30	3	3
A45RB	45	3	3
A60RB	60	3	3
TOTAL			15

Fonte: Autor, 2021.

Tabela 3.4: Determinação dos traços para produção de argamassas.

Amostras	% de substituição	Traço em volume			Água
		Cimento	Areia	Resíduo da Bauxita	
Aref	0	1	3,75	0	106 ml
A15RB	15	1	3,1875	0,5625	207 ml
A30RB	30	1	2,625	1,125	543 ml
A45RB	45	1	2,0625	1,6875	770 ml
A60RB	60	1	1,5	2,25	1,095 l

Fonte: Autor, 2021.

Após a determinação da quantidade de corpos de prova, foi realizado o cálculo para o levantamento do quantitativo de materiais a serem utilizados nas misturas. O traço em volume foi convertido para traço em massa, com a ajuda dos valores das massas específicas do cimento, areia e resíduo da bauxita. Posteriormente, foram iniciadas as fabricações dos corpos de provas cilíndricos e prismáticos. Destaca-se que a fabricação das argamassas ocorreu no Laboratório de Engenharia Civil (LEC) na Universidade Estadual do Maranhão (UEMA), na cidade de São Luís – MA.

Inicialmente, ocorreu as pesagens dos materiais para logo em seguida, começar a mistura. A figura 3.5 identifica os materiais pesados pronto para serem utilizados.

Figura 3.5: Materiais pesados pronto para serem misturados.



Fonte: Autor, 2021.

As argamassas foram fabricadas de acordo com especificações da NBR 7215 (ABNT, 2019) em um misturador mecânico com velocidade de rotação da pá de  $140 \pm 5$  Rr/min, e velocidade do movimento planetário de  $62 \pm 5$  Rr/min. Em relação à ordem de mistura, inicialmente a areia foi adicionada, seguida do cimento, uma fração de água, resíduo da bauxita e por fim, a outra fração de água. As argamassas eram misturadas em um tempo de aproximadamente 20 minutos.

Posteriormente, foram adicionadas em moldes de PVC adaptados (CP's cilíndricos) e moldes de madeira adaptados com dimensões de  $200 \times 40 \times 20$  mm (CP's prismáticos) e mantidas 24h à temperatura ambiente ( $28 \pm 2$  °C). Lembrando que os corpos de prova foram moldados com a adição das argamassas em 3 camadas, apresentando 20 golpes em cada camada.

Em seguida, foram removidas dos respectivos moldes e deixadas à cura imersa em água saturada de hidróxido de cálcio até a idade do ensaio. A temperatura e a umidade relativa do ambiente de laboratório ficaram em torno de  $28 \pm 2$  °C e  $94\% \pm 1\%$  respectivamente, para todos os ensaios. As figuras 3.6 e 3.7 mostram os corpos de prova fabricados.

É válido salientar que a fabricação, moldagem e compactação de ambos os corpos de prova foram bem dificultosos, uma vez que a argamassa trabalhada era extremamente seca em função da sua finalidade (telhas de concreto). Assim, em alguns casos, foi necessária a utilização de força manual na mistura dos materiais e obviamente na compactação, para que os materiais se tornassem os mais homogêneos possíveis.

Figura 3.6: CP's cilíndricos.



Fonte: Autor, 2021.

Figura 3.7: CP's prismático



Fonte: Autor, 2021.

### 3.2.2 Composição Granulométrica

A caracterização da composição granulométrica possui o objetivo de definir a curva granulométrica, a área da superfície específica, bem como o diâmetro médio das partículas do material estudado. Para determinar a granulometria da areia, foi utilizado o método distribuição granulométrica segundo NBR NM 248 (ABNT, 2003). O ensaio foi realizado no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Estadual do Maranhão. Já para o resíduo da bauxita e cimento, foi realizado o ensaio de caracterização granulométrica à laser, executado pelo Laboratório de Caracterização Tecnológica (LCT), na Universidade de São Paulo.

A granulometria das amostras (RB e cimento) foi realizada por meio do método de dispersão em água deionizada, através do amostrador (equipamento) Hydro 2000MU (unidade de dispersão a úmido com capacidade de 0,8L).

Essa técnica oferece uma ampla variedade de informações sobre a amostra, desde uma medição de tamanho geral até parâmetros de forma que podem ser rigorosamente correlacionados a características específicas de desempenho. Devido à varredura de todas as partículas e aos algoritmos de ajuste, os resultados de medição são compatíveis aos da análise com peneiras.

### 3.2.3 Massa específica

Para a areia, o ensaio de massa específica foi realizado seguindo padrões recomendados pela NBR 9776 (ABNT, 1987). Já a massa unitária e índice de vazios foram determinadas conforme NBR NM 45 (ABNT, 2006). Ambos os ensaios também foram realizados no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Estadual do Maranhão.

As massas específicas do resíduo da bauxita e do cimento também foram realizadas pelo LCT. A determinação da massa específica foi efetuada pelo método de picnometria com intrusão de gás hélio, em equipamento Micromeritics, modelo AccuPyc II 1340 (figura 3.8), com 10 ciclos de purga. O ensaio foi realizado com o material em pó e é executado pela comparação da variação de pressão do gás hélio entre uma câmara de volume conhecido, e uma câmara com a amostra a ser analisada. O gás hélio é utilizado com o objetivo de obter uma maior precisão da análise, devido a facilidade de penetração na amostra e preenchimento dos vazios.

Figura 3.8: Equipamento Micromeritics, modelo AccuPyc II 1340.



Fonte: LCT, 2020.

### 3.2.4 Fluorescência de raio-X (FRX)

O ensaio de Fluorescência de Raios X (FRX) é um método de análise quantitativa e qualitativa da composição dos elementos químicos que estão presentes na amostra, através da excitação dos átomos e posterior detecção de seus respectivos raios X. Em outras palavras, o ensaio de FRX foi realizado com o objetivo de identificar quais elementos químicos estão presentes no material e em qual quantidade.

Em relação ao cimento e ao RB, o ensaio FRX foi realizado no Laboratório de Controle Tecnológico (LCT), em São Paulo. Já para os traços argamassados, o ensaio foi realizado no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal do Maranhão (UFMA).

Foram determinadas em amostra fundida com tetraborato de lítio, na calibração BAX-2 (Bauxitas), relativa a análise quantitativa por comparação com materiais de referência certificados, em espectrômetro de fluorescência de raio X, Malvern Panalytical, modelo Zetium (figura 3.9), com perda ao fogo a 1020° C por 2 h.

Figura 3.9: Equipamento Malvern Panalytical, modelo Zetium.



Fonte: LCT, 2020.

### 3.2.5 Difração de raio-X (DRX)

A caracterização mineralógica foi determinada por meio do ensaio de Difração de Raios X (DRX). Este ensaio auxilia na avaliação (identificação) das características de reatividade do material. Foi realizado com o objetivo de identificar as fases, amorfa ou cristalina, dos minerais que compõe o resíduo de bauxita. Dessa forma, indica a predominância da forma cristalina (baixa atividade pozolânica) ou amorfa (maior potencial pozolânico).

A identificação das fases cristalinas de um material por difração de raios X baseia-se na incidência de um feixe monocromático de raios X de comprimento de onda  $\lambda$ , o qual é difratado por planos de alta concentração atômica da amostra, periodicamente distribuídos, ocorrendo interferências destrutivas ou construtivas entre as ondas difratadas. Dessa forma, são geradas informações referentes às distâncias interplanares dos planos cristalográficos e à intensidade da reflexão, possibilitando a caracterização da fase sólida ordenada reticularmente.

Em relação ao RB, o ensaio DRX foi realizado no Laboratório de Controle Tecnológico (LCT), em São Paulo. Já para os traços argamassados, o ensaio foi realizado no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal do Maranhão (UFMA).

As análises foram realizadas através do método do pó, mediante o emprego de difratômetro de raios X com detector sensível à posição (figura 3.10). A identificação das fases foi obtida por comparação do difratograma da amostra com os bancos de dados PDF2 do International Centre for Diffraction Data (ICDD) e Inorganic Crystal Structure Database (ICSD).

Figura 3.10: Difratômetro de raio X.



Fonte: LCT, 2020.

### 3.2.6 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectrometria de energia dispersiva de raios-X (EDS)

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e a espectrometria de energia dispersiva de raios-x são um tipo de microscopia na qual um feixe de elétrons focalizado varre a superfície da amostra, interagindo com a matéria, gerando diferentes tipos de sinais que podem oferecer informações sobre a morfologia e composição química do material, auxiliando assim na interpretação de alguns resultados que o material da amostra poderá desenvolver quando misturado com outros compostos.

A análise microscópica do resíduo da bauxita foi realizada pelo LCT, na Universidade de São Paulo. O equipamento utilizado nesse ensaio está ilustrado na figura 3.11, trata-se do equipamento Quanta 650FEG, FEI, com sistemas de microanálise química acoplado. Já a análise microscópica e EDS das argamassas foram realizadas no Laboratório de biomateriais do curso de odontologia da Universidade Federal do Maranhão, com o auxílio do equipamento Hitachi TM 3030.

Figura 3.11:Quanta 650FEG, FEI.



Fonte: Fonte: LCT, 2020.

### 3.2.7 Resistência à compressão e absorção de água por imersão total

O ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova argamassados foi baseado nas recomendações da norma NBR 7215 (ABNT, 2019) com ruptura dos corpos de prova aos 3, 7 e 28 dias (Figura 3.12) e foi realizado no Laboratório de Engenharia Civil (LEC) da Universidade Estadual do Maranhão (UEMA).

Figura 3.12: CP cilíndrico submetido ao ensaio de resistência à compressão.



Fonte: Autor, 2021.

Já a determinação da absorção de água por imersão e índice de vazios seguiram as prescrições normativas da NBR 9778 (ABNT, 2009). Foram moldados três corpos-de-prova (CPs) cilíndricos, com 5 cm de diâmetro por 10 cm de altura, para cada porcentagem de substituição. Após a cura aos 28 dias, os CP's foram mantidos por um período de 72 horas na estufa a  $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$  para a secagem. Em seguida, os CP's foram pesados na balança com precisão de 0,01g e imersos em água em temperatura ambiente logo após a pesagem. Após 72 horas de imersão, os CPs foram levados à fervura e mantidos nesta condição por 5 horas e depois passaram pelo processo de resfriamento, até atingir a temperatura de  $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ . Os CP's foram pesados na condição saturada superfície seca e posteriormente, foram pesados na balança hidrostática com precisão de 0,1g.

A absorção de água de cada corpo de prova foi determinada pela equação 3.1 abaixo:

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} * 100 \quad (3.1)$$

Onde:

$m_{sat}$  : massa da amostra saturada após imersão e fervura (g);

$m_s$  : massa da amostra seca (g).

Já o índice de vazios ( $I_V$ ) de cada amostra, foi calculado em porcentagem pela equação 3.2:

$$I_V = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} * 100 \quad (3.2)$$

Onde:

$m_i$  : massa da amostra saturada imersa em água após fervura (g).

### 3.2.8 Determinação da lixiviação

A análise ambiental é de fundamental importância quando se pensa em projetos de desenvolvimento de materiais contendo resíduos industriais. Dessa forma, com o objetivo de analisar ambientalmente a argamassa de referência, bem como as argamassas com resíduo da bauxita, foi realizado o teste de lixiviação. Lembrando que os corpos de prova foram moídos para geração de um material de granulometria pequena, e assim foram enviados para análise.

Sabe-se que lixiviação é o processo para determinação da capacidade de transferência de substâncias orgânicas e inorgânicas presentes no resíduo sólido, por meio de dissolução no meio extrator. Dessa forma, o ensaio de lixiviação foi realizado no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal do Maranhão com base na NBR 10005 (ABNT, 2004).

Esta norma tem o objetivo de fixar os requisitos exigíveis para a obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos, visando diferenciar os resíduos classificados pela NBR 10004 (ABNT, 2004) como classe I – perigosos - e classe II – não perigosos. É válido ressaltar que os resíduos tidos como não perigosos não apresentam riscos ao meio ambiente, já os resíduos classificados como perigosos, agredem o meio ambiente.

O equipamento utilizado foi o do tipo jar-test, de agitação contínua, velocidade indefinida, proporção resíduo/meio extrator (1:16). Segundo o procedimento previsto na norma NBR 10005 (ABNT, 2004), utilizando como meio lixiviante água deionizada e ácido acético 0,5N (pH = 5) para controle do pH.

### 3.2.9 Resistência à tração na flexão

O ensaio de resistência à tração na flexão foi realizado com auxílio da NBR 12142 (ABNT, 2010). A norma emprega o princípio da viga simplesmente apoiada com duas forças concentradas nos terços dos vãos. Foram fabricados 3 (três) corpos de prova prismáticos para cada traço (figura 3.13), totalizando 15 CP's em formas de madeiras com dimensões de 200 mm x 40 mm x 20 mm.

Figura 3.13: CP's prismáticos moldados em forma de madeira.



Fonte: Autor, 2021.

O teste foi realizado com o objetivo de avaliar o comportamento do concreto à tração na flexão com a substituição da areia pelo RB aos 28 dias de cura, uma vez que as telhas de concreto trabalham diretamente à tração na flexão. Os CP's prismáticos foram rompidos no Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal do Maranhão (UFMA), como mostra a figura 3.14.

Figura 3.14: CP prismático na iminência de ser rompido.



Fonte: Autor, 2021.

### 3.2.10 Fabricação de telha de concreto com resíduo da bauxita

As telhas de concreto foram fabricadas com substituição parcial do agregado miúdo pelo resíduo da bauxita *in natura*. É importante destacar que foram fabricadas telhas com a porcentagem de substituição que obteve os melhores resultados quanto às características físico-mecânicas na etapa II. Após fabricadas as telhas de concreto, estas passaram por algumas análises com o intuito de avaliar alguns requisitos técnicos e propriedades por meio de métodos de ensaio de acordo com a NBR 13858-2 (ABNT, 2009), como: absorção, impermeabilidade, peso seco e carga de ruptura à flexão.

#### 3.2.10.1 Preparação das telhas de concreto

Como já mencionado no referencial teórico desta pesquisa, o processo de fabricação de telhas de concreto é considerado simples e é realizado em algumas etapas com auxílio de maquinário pesado (figura 3.15), entre as quais destacam-se: mistura dos materiais, extrusão e cura das peças em estufas. As telhas utilizadas nesta pesquisa foram fabricadas em parceria com a empresa Contelha, localizada na cidade de São Luís – MA. Inicialmente os materiais foram misturados com a finalidade de transformá-los em uma massa uniforme e homogênea. Após a mistura, a massa homogênea (argamassa) seguiu para uma caixa alimentadora da máquina por meio de uma esteira, chegando até a extrusora. A extrusora tem a função de fazer a moldagem das telhas.

Figura 3.15: Maquinário utilizado para a fabricação das telhas desta pesquisa.



Fonte: Autor, 2021.

Na etapa de extrusão, a argamassa homogênea foi depositada sobre formas metálicas (Figura 3.16) e, posteriormente foi prensada a partir de um êmbolo que é capaz de transmitir esforços uniformes em toda superfície da peça, definindo assim a forma das telhas. Posteriormente, as telhas seguiram em prateleiras para as câmaras úmidas com o objetivo de realizar o processo de cura.

Figura 3.16: Formas metálicas usadas para a fabricação das telhas.



Fonte: Autor, 2021.

Para a dosagem das telhas de concreto foi empregado o mesmo traço utilizado conforme tabela 3.4 para fins de comparações, que por sinal, é o traço utilizado comercialmente pela empresa Contelha. A figura 3.17 mostra uma das telhas produzidas com RB neste estudo.

Figura 3.17: Telha de concreto produzida com resíduo da bauxita.



Fonte: Autor, 2021.

Para a produção das telhas de concreto, foram utilizadas as seguintes quantidades de corpos de prova apresentados na Tabela 3.5.

Tabela 3.5: Quantidade de telhas de concreto por ensaio.

Amostra	% de substituição	Quantidades de CP's			Total Parcial
		Carga de ruptura 28 e 60 dias	Peso seco e absorção	Impermeabilidade	
TMRB	% que obteve melhores resultados no estudo II	12	6	6	24
TOTAL					24

Fonte: Autor, 2021.

### 3.2.10.2 Absorção de água e peso seco

Os ensaios de absorção da água e peso seco foram baseados na NBR 13858-2 (ABNT, 2009) (foram realizados 28 dias após a fabricação das telhas) e consistiram inicialmente em imergir os corpos-de-prova em um reservatório com água potável, por um período de 24 h. Após as 24 h, os corpos-de-prova foram retirados e suas superfícies foram enxutas com o objetivo de retirar o excesso de água. Em seguida, foram pesados e o valor da massa “Mu” (massa úmida) foi encontrado. Posteriormente, as telhas passaram pela, a uma temperatura de

(105 +/- 5) ° C durante um período de 24 h e logo em seguida foram pesadas novamente a fim de obter a massa seca ( $M_s$ ). Esses ensaios foram realizados no LEC na UEMA.

A absorção da água ( $A$ ), expressa em porcentagem, foi calculada para cada corpo-de-prova pela expressão 3.3:

$$A = \frac{m_u - m_s}{m_s} * 100 \quad (3.3)$$

Onde:

$m_u$ : é a massa do corpo-de prova inicial úmida para cada corpo-de-prova, em gramas;

$m_s$ : é a massa do corpo-de prova seca para cada corpo-de-provas, em gramas.

Já o peso seco ( $P_s$ ) é calculado em função da massa seca ( $m_s$ ), segundo a equação 3.4:

$$P_s = m_s * g \quad (3.4)$$

Onde:

$m_s$ : é a massa seca, em quilogramas;

$g$ : é a aceleração da gravidade.

A massa seca  $m_s$ , expressa em quilogramas, foi determinada para cada corpo de prova. Para efeito de transformação da massa seca, em decanewton, adotou-se a aceleração da gravidade como sendo igual a 10 m/s<sup>2</sup>.

### 3.2.10.3 Impermeabilidade

O teste de impermeabilidade utilizou como base a norma NBR 13858-2 (ABNT, 2009) e possuiu como princípio o exame visual da passagem de água através da telha, a partir da face superior submetida a uma lâmina de água. Para o requerido ensaio foi utilizada uma caixa horizontal impermeável, com dimensões adequadas para comportar a telha e a lâmina de água com vedação das laterais. Inicialmente, a telha foi colocada em uma posição horizontal dentro da caixa, com suas bordas vedadas para que não passasse água.

A estanqueidade entre as bordas da telha e as laterais da caixa foi assegurada para que o ensaio ocorresse sem falhas. Em seguida, foi despejada água limpa na caixa até atingir um nível de 10 a 15 cm acima da crista da onda mais alta da face superior da telha. A lâmina de

água foi mantida por 24 horas a temperatura ambiente, com intuito de observar vazamentos e/ou formação de gotas aderentes na face inferior das telhas. O referido ensaio foi realizado na sede da empresa responsável pela fabricação da telha. Destaca-se que o ensaio foi realizado após 60 dias de produzidas as telhas. A Figura 3.18 mostra como o ensaio foi realizado.

Figura 3.18: Ensaio de impermeabilidade



Fonte: Autor, 2021.

#### 3.2.10.4 Carga de ruptura à tração na flexão

Para determinar a carga de ruptura à flexão, foram usadas telhas com 28 e 60 dias de cura. Lembrando que os 28 dias foram escolhidos com o objetivo de comparar os resultados encontrados com o limite determinado pela norma. E mais, com o objetivo de analisar o comportamento à flexão da telha ao longo do tempo, foi escolhido um tempo de cura de 60 dias para rompimento, já que esse artefato deve possuir propriedades que viabilizem o seu uso por longos períodos.

As telhas foram posicionadas sobre barras de apoio fixas, para então sofrerem a aplicação da carga através de uma prensa que possibilitou a aplicação de uma força uniformemente distribuída, à velocidade constante, aplicada transversalmente no centro, com ponto de aplicação em contato com a face superior da telha (figura 3.19). A carga de ruptura foi expressa em newtons. O ensaio foi realizado no Laboratório de Ensaios Mecânicos do Instituto Federal de Educação do Maranhão (IFMA).

Figura 3.19: Ensaio de resistência à tração na flexão das telhas.



Fonte: Autor, 2021.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As propriedades físico-químicas do resíduo da bauxita produzido no processo Bayer foram determinadas com o objetivo de substituir parcialmente a areia como agregado fino no setor da construção civil. A substituição ocorreu através da confecção de corpos de provas argamassados (cilíndricos e prismáticos) e telhas de concreto. Foram confeccionados corpos de prova com quantidades variadas de resíduo de bauxita em substituição a areia e suas propriedades químicas, físicas, morfológicas, mineralógicas e ambientais foram analisadas objetivando estabelecer uma relação entre essas propriedades e o teor de resíduo de bauxita presente em cada amostra. Bem como também foram fabricadas telhas de concreto com a porcentagem de substituição que apresentou os melhores resultados físico-mecânicos nas argamassas produzidas anteriormente.

### 4.1 Caracterização dos materiais

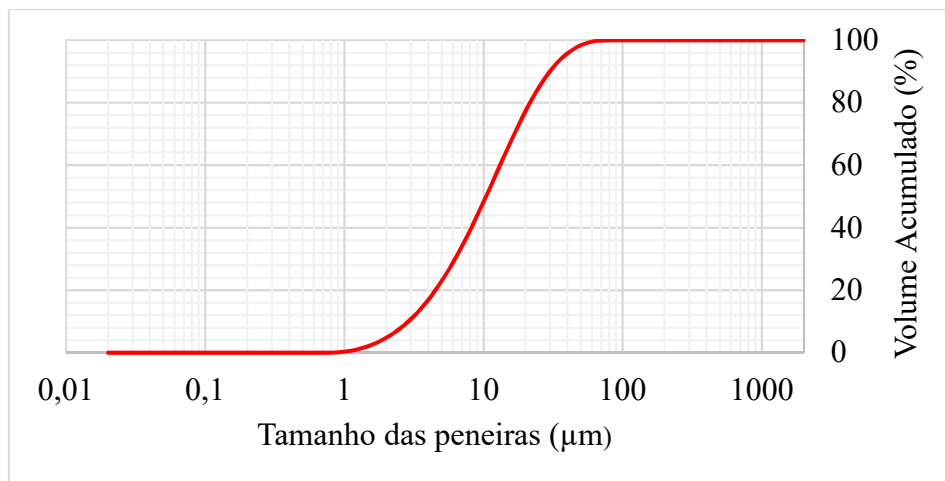
#### 4.1.1 Caracterização físico-química do cimento Portland

O cimento utilizado foi o cimento Portland CP-IV 32 (Cimento Portland Pozolânico), disponível comercialmente na região metropolitana de São Luís. Em relação ao índice de finura, o cimento em questão apresentou um valor de 1,6%, o que está dentro dos limites exigidos pela NBR 5736 (ABNT, 2018), que determina como limite máximo o valor de 8%.

No que tange ao ensaio de granulometria à laser, foi feita uma análise nos grãos de faixa de tamanho entre 0,02 e 2000  $\mu\text{m}$ . Desta análise, foi definida a área de superfície específica de 0,92  $\text{m}^2/\text{g}$  e coeficiente de uniformidade de 0,81. Além disso, também foram definidos os valores de D10, D90 e o diâmetro médio e máximo das partículas. Assim, chegou-se à conclusão que 10% das partículas do cimento são menores que 2,88  $\mu\text{m}$ , 90% são menores que 29,92  $\mu\text{m}$  e que o diâmetro médio das partículas é de 10,41  $\mu\text{m}$ . Destaca-se ainda que o diâmetro máximo é de 34,02  $\mu\text{m}$ .

Em relação à massa específica, o ensaio realizado por meio do método do frasco Le Chatelier apresentou um resultado de 2,79  $\text{g}/\text{cm}^3$ . A figura 4.1 evidencia a curva granulométrica do cimento CP – IV e a tabela 4.1 faz um resumo de todos os resultados encontrados para este aglomerante.

Figura 4.1: Curva granulométrica do cimento CP IV.



Fonte: Autor, 2021.

Tabela 4.1: Características avaliadas - cimento Portland CP IV.

<b>Características avaliadas</b>	<b>Resultados</b>
Área de superfície específica	0,92 m <sup>2</sup> /g
Coefficiente de Uniformidade	0,81
Índice de finura	1,60%
D10	2,88 μm
D90	29,92 μm
Dmédio	10,41 μm
Dmáximo	34,02 μm
Massa específica	2,79 g/cm <sup>3</sup>

Fonte: Autor, 2021.

No que se refere aos compostos químicos presentes no material em estudo, o ensaio de fluorescência de raio X apresentou os seguintes resultados da tabela 4.2.

Tabela 4.2: Composição química do cimento..

<b>Componentes químicos</b>	<b>Quantidade (%)</b>
SiO <sub>2</sub>	42,5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,70
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,31
CaO	35,30
MgO	0,79
SO <sub>3</sub>	2,43
Na <sub>2</sub> O	0,29
K <sub>2</sub> O	0,69
TiO <sub>2</sub>	0,31
P <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	<0,05
MnO	0,05
SrO	<0,05
PF	7,78

Fonte: Autor, 2021.

#### 4.1.2 Caracterização física da areia

Como visto na pesquisa, o agregado miúdo utilizado foi do tipo quartzoso proveniente de jazidas encontradas no Estado do Maranhão e comercializado em regiões próximas. A partir dos resultados apresentados na tabela 4.3 foi possível compreender o comportamento granulométrico do material de estudo através de algumas características como: dimensão máxima do agregado e módulo de finura.

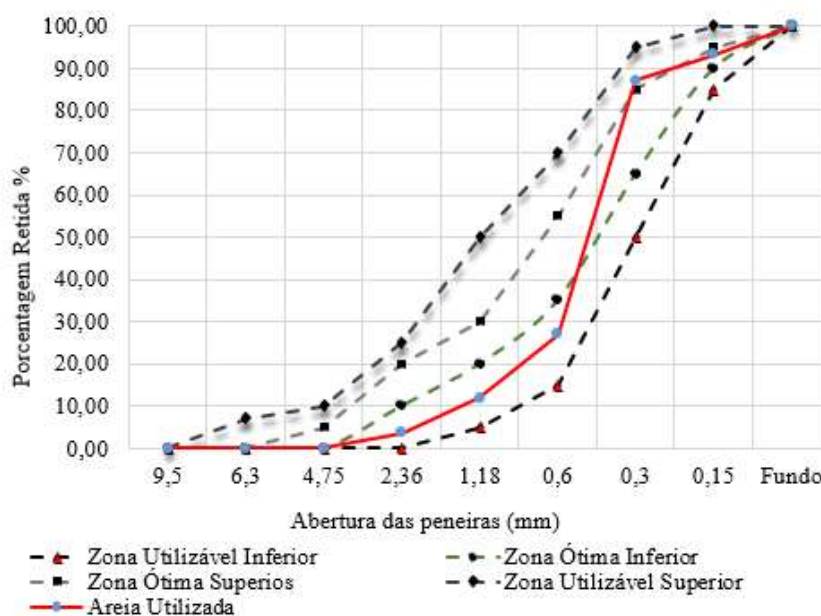
Tabela 4.3: Caracterização granulométrica do agregado miúdo.

<b>Agregado Miúdo</b>					<b>Norma</b>
<b>Abertura das peneiras (mm)</b>	<b>Massa retida (g)</b>	<b>Massa retida acumulada (g)</b>	<b>% Retida</b>	<b>% Retida acumulada</b>	
4,75	0	0	0,00%	0,00	ABNT NBR NM 248 (2003)
2,36	18,641	18,641	3,73%	3,73	
1,18	40,83	59,471	8,17%	11,90	
0,6	75,653	135,124	15,13%	27,03	
0,3	300,03	435,154	60,01%	87,04	
0,15	31,62	466,774	6,32%	93,36	
Fundo	33,226	500	6,65%	100,00	
Módulo de Finura		2,23 mm			ABNT NBR NM 248 (2003)
Dimensão Máxima		2,36 mm			

Fonte: Autor, 2021.

A curva granulométrica com os respectivos limites superiores e inferiores utilizáveis e limites superiores e inferiores ótimos do agregado miúdo estão apresentados na figura 4.2.

Figura 4.2: Granulometria do agregado miúdo.



Fonte: Autor, 2021.

Já a tabela 4.4 apresenta um resumo das características físicas do agregado miúdo utilizado neste estudo.

Tabela 4.4: Características físicas do agregado miúdo.

Características avaliadas	Resultados	Especificações
Massa Específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,65	ABNT NBR 9776 (1987)
Massa Unitária (g/cm <sup>3</sup> )	1,46	ABNT NBR NM 45 (2006)
Módulo de Finura	2,23	ABNT NBR NM 248 (2003)
Dimensão Máxima (mm)	2,36	ABNT NBR NM 248 (2003)
Índice de Vazios (%)	44,9	ABNT NBR NM 45 (2006)

Fonte: Autor, 2021.

De acordo com os dados obtidos, é possível observar que o agregado miúdo utilizado neste estudo está dentro dos limites estabelecidos pela norma, ou seja, está entre as zonas utilizáveis inferior e superior. A areia em questão está dentro da zona ótima apresentando um módulo de finura de 2,23, sendo classificada como areia média. Deste modo, adequada para uso na fabricação de telhas de concreto.

#### 4.1.3 Caracterização física do resíduo da bauxita

Por meio do ensaio de granulometria à laser e pela análise efetuada a partir do método B.E.T. (Brunauer Emmett Teller), foi possível determinar algumas características físicas do resíduo em questão. Deste modo, foi feita uma análise nos grãos de faixa de tamanho entre 0,02 e 2000  $\mu\text{m}$ .

Como demonstrado na revisão bibliográfica desta pesquisa, Villar (2002) afirma que a granulometria do resíduo da bauxita é uma característica que está estritamente relacionada a mineralogia da rocha de origem, ao processo de extração, processamento e deposição e é quase impossível determinar uma curva granulométrica padrão para este tipo de material.

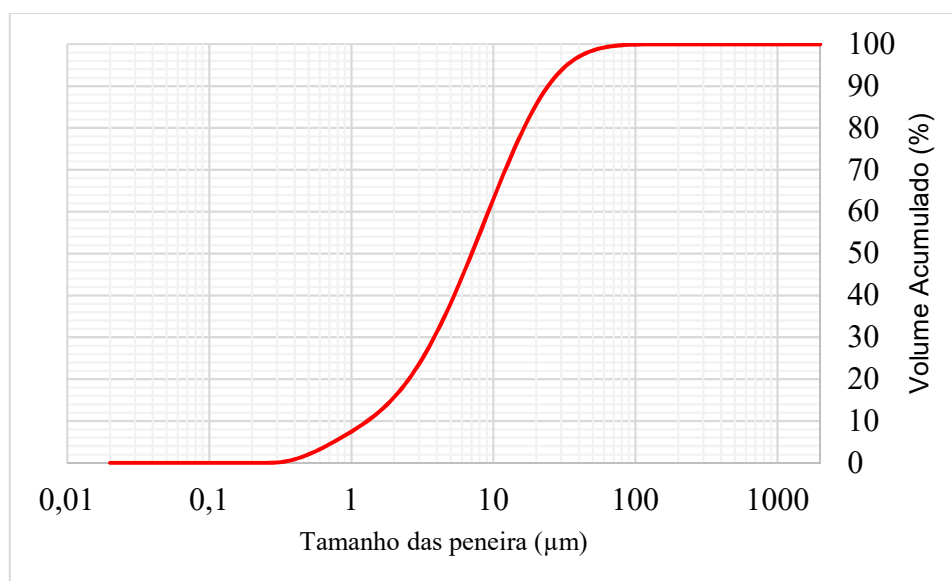
Da análise efetuada, foi definida a área de superfície específica de 1,87  $\text{m}^2/\text{g}$  e coeficiente de uniformidade de 1,05. Além disso, também foram definidos os valores de D10, D90 e o diâmetro médio e máximo das partículas. Assim, chegou-se à conclusão que 10% das partículas do resíduo são menores que 1,29  $\mu\text{m}$ , 90% são menores que 24,20  $\mu\text{m}$  e que o diâmetro médio das partículas é de 7,03  $\mu\text{m}$ . Destaca-se ainda que o diâmetro máximo é de 26,03  $\mu\text{m}$ .

De acordo com resultados encontrados por Santos (2015), 10% das partículas do RB estudado possuem o tamanho menor que 0,812  $\mu\text{m}$  e 50% menores que 7,583  $\mu\text{m}$ . Já, segundo Camargo et al. (2009), a maioria das partículas deste resíduo apresentam diâmetro que correspondem à faixa de 0,05mm a 0,002mm. Ou seja, ambos os estudos apresentaram granulometrias muito finas para o RB, ratificando o resultado encontrado neste estudo.

Em relação à massa específica, o ensaio por picnometria com intrusão de gás hélio apresentou um resultado de 2,43  $\text{g}/\text{cm}^3$ , confirmando o estudo realizado por Chandra (2009), que afirmou que este material no estado seco pode apresentar massa específica de 2,5 a 2,7  $\text{g}/\text{cm}^3$ . Este resultado também se aproximou do encontrado por Quaresma (2009), que obteve um valor de 2,13  $\text{g}/\text{cm}^3$  para a massa específica do resíduo de bauxita.

A figura 4.3 evidencia a curva granulométrica do RB e a tabela 4.5 faz um resumo de todos os resultados encontrados para este material

Figura 4.3: Curva granulométrica do RB..



Fonte: Autor, 2021.

Tabela 4.5: Características avaliadas - resíduo da bauxita.

<b>Características avaliadas</b>	<b>Resultados</b>
Área de superfície específica	1,87 m <sup>2</sup> /g
Coefficiente de Uniformidade	1,05
D10	1,29 μm
D90	24,20 μm
Dmédio	7,03 μm
Dmáximo	26,03 μm
Massa específica	2,43 g/cm <sup>3</sup>

Fonte: Autor, 2021.

É válido ressaltar que apesar do RB possuir características físicas semelhantes às características do cimento, podendo o RB ser objeto de estudo quanto à sua utilização como filer, uma vez que para um rejeito ser utilizado como filer, as partículas devem necessariamente ter dimensão igual ou inferior às partículas do cimento, optou-se por utilizar o resíduo como agregado fino em substituição à areia.

Molin et.al. (2019) estudaram o resíduo da bauxita como filer em matrizes cimentícias. O material foi utilizado como filer em substituição ao cimento em proporções de 5, 10 e 15% em massa. Apesar de existirem estudos utilizando o resíduo como filer, como demonstrado, este estudo busca incorporar uma proporção mássica maior da areia para reduzir o volume do resíduo estocado nas lagoas artificiais, contribuindo também ambientalmente quanto à grande exploração de areia.

Além disso, almeja encontrar soluções inovadoras para o artefato de concreto em pauta. Espera-se que a substituição da areia pelo resíduo resulte em uma argamassa uniforme, melhorando ou pelo menos mantendo os limites aceitáveis por normas de algumas propriedades do artefato que será produzido (telha de concreto), dado que a pequena granulometria do RB misturada à areia poderá facilitar o processo de extrusão das telhas, resultando em produtos melhor acabados.

#### 4.1.4 Caracterização química do resíduo da bauxita

A tabela 4.6 apresenta o resultado da análise química quantitativa do resíduo da bauxita em função dos principais óxidos, gerada pelo método da fluorescência de raios-x (FRX). A composição química encontrada está de acordo com as composições obtidas por diversos autores, apresentadas na revisão bibliográfica deste estudo (Quadro 2.5).

Deste modo, confirma-se que o RB possui em sua composição óxidos, sendo o  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $SiO_2$ ,  $TiO_2$  e  $CaO$  os mais representativos, com valores de 21,5%, 38,6%, 12,2%, 3,48% e 3,01% respectivamente.

Tabela 4.6: Análise química do resíduo da bauxita.

<b>Resíduo da Bauxita</b>	
<b>Componente</b>	<b>%</b>
$Al_2O_3$	21,5
$Fe_2O_3$	38,6
$SiO_2$	12,2
$TiO_2$	3,48
$P_2O_5$	0,08
$CaO$	3,01
$V_2O_5$	0,12
$Cr_2O_3$	0,05
$MnO$	0,03
$ZrO_2$	0,12
PF	13,9

Fonte: Autor, 2021.

O resíduo da bauxita estudado em questão possui esses componentes químicos presentes, pois retém todo o ferro, alumínio, titânio e silício presentes na bauxita (rocha de origem). Já o cálcio encontrado no RB é adicionado durante o processo de produção do alumínio (processo Bayer), no tratamento cáustico, antes da digestão (Silva Filho et al., 2007).

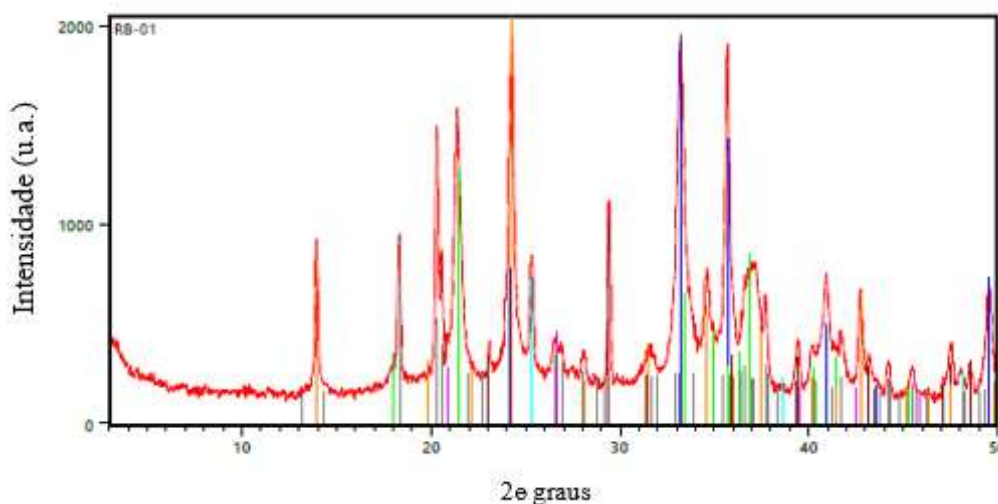
Um outro componente encontrado no RB é o sódio, que é adicionado na etapa da digestão através de uma solução cáustica de hidróxido de sódio. Neste ensaio em específico, sua % na composição do RB não foi contabilizada devido à limitação do método utilizado, uma vez que o padrão de ensaio solicitado não trazia a análise e avaliação de  $Na_2O$ . Entretanto, Mercury et.al. (2010) analisaram quimicamente o RB do Maranhão e encontraram valores de 9,87% para o óxido de sódio, além de que na mineralogia do resíduo em questão será comprovada a presença desse óxido através da identificação da fase mineralógica sodalita, confirmando a presença do óxido de sódio no resíduo estudado.

#### 4.1.5 Caracterização mineralógica do resíduo da bauxita

Observa-se, pelas figuras 4.4 e 4.5, que o RB do estudo apresenta uma estrutura mineralógica complexa, onde possui pequenas quantidades de fases amorfas (apresentam curvas com formas abauladas e ausência de picos), porém com predominância de fases cristalinas, que se caracterizam por apresentarem em seus difratogramas formas com intensa quantidade de picos. Entre os minerais encontrados, tem-se: hematita (H), goetita (Go), calcita, sodalita (S), anatásio (A), gibbsita (G) e quartzo (Q).

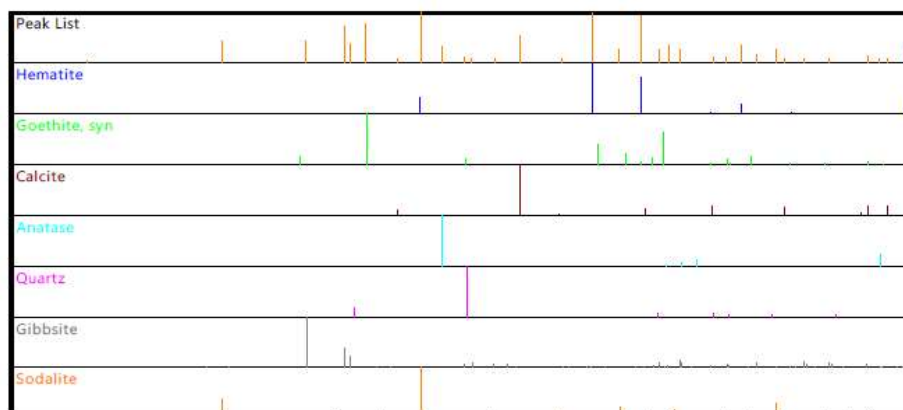
É válido destacar que esses minerais possuem origens diferentes. Enquanto que a hematita, goetita, anatásio, gibbsita e quartzo são provenientes da própria bauxita, a calcita e a sodalita são fases minerais formadas durante o processo Bayer. A sodalita tem sua origem a partir da solução cáustica de hidróxido de sódio e a calcita se formou a partir da reação do  $CO_3^{-2}$  com o aluminato tricálcico hidratado e o CaO, que foram adicionados antes da digestão com o objetivo de melhorar a extração do alumínio (Mercury et.al., 2010).

Figura 4.4: Difratoograma de raio-x do RB.



Fonte: LCT - USP, 2021.

Figura 4.5: Fases identificadas.



Fonte: LCT - USP, 2021.

A composição mineralógica do RB encontrada nesta pesquisa é semelhante a outras composições de RB produzidas em diferentes regiões, como pode ser visto no item 2.3.2.3 deste estudo. Apesar das fases minerais principais variarem consoante a origem da bauxita, a presença de fases encontradas é frequente.

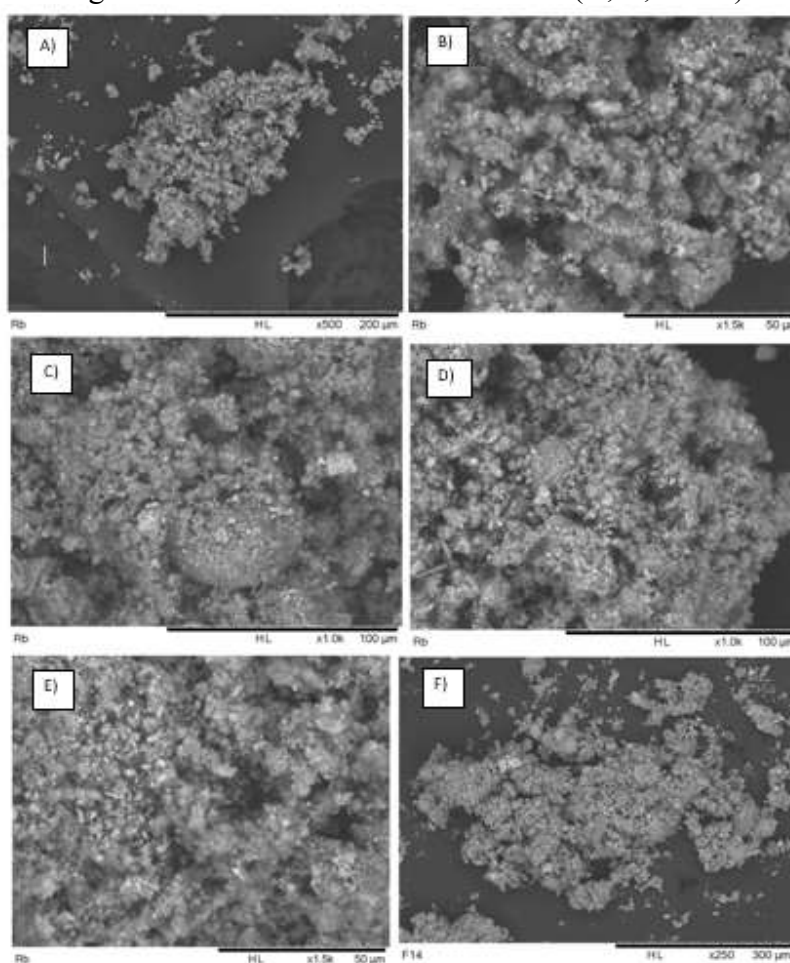
Os resultados encontrados pela análise de DRX também contribuem com a análise química, demonstrada na tabela 4.6. Dessa forma, há a confirmação dos teores de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (38,6%), os quais estão presentes na hematita e goetita. Assim como, o  $\text{TiO}_2$  (3,48%), que se encontra como anatásio,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (21,5%) se encontra como gibbsita e sodalita,  $\text{SiO}_2$  (12,2%) como sodalita e quartzo e  $\text{CaO}$  (3,01%) na calcita.

#### 4.1.6 Caracterização morfológica do resíduo da bauxita

As figuras 4.6 e 4.7 mostram a morfologia do resíduo da bauxita e os resíduos químicos constituintes. Pode-se observar que as formas das partículas se apresentam em uma estrutura floculada, onde favorece a adição às matrizes por ser semelhante à encontrada no cimento Portland. Além de apresentarem tamanhos e formas irregulares. O RB é apresentado praticamente na forma de aglomerados porosos (figura 4.6). Este resultado é semelhante à outras caracterizações de RB que foram discutidas nesta pesquisa, no item 2.3.2.4.

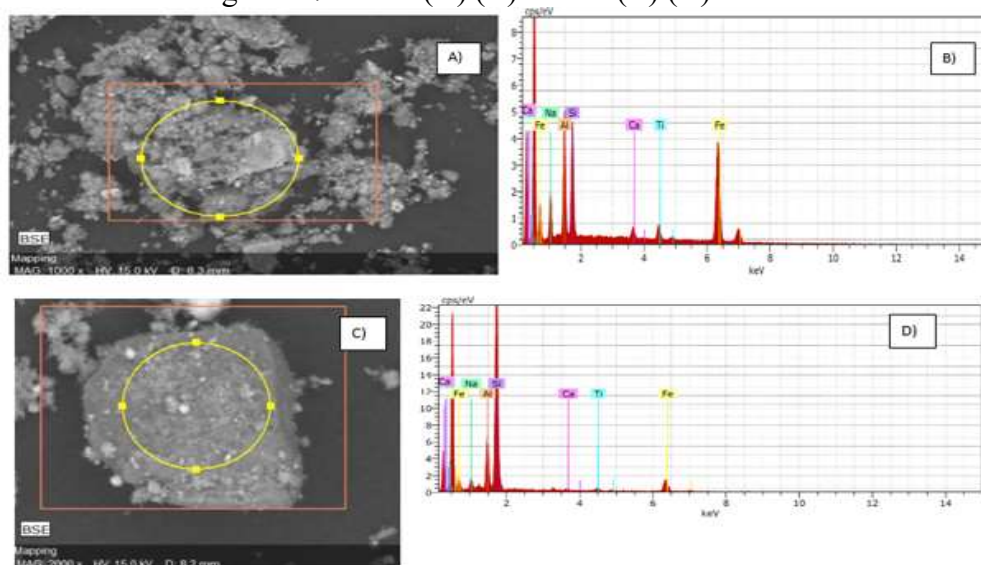
A análise por EDS permitiu identificar partículas compostas pelos seguintes elementos: Fe, Ti, Ca, Si, Al, Na (figura 4.7 (b) e (d)), mostrando um bom acordo com os resultados de DRX e composição química discutidos anteriormente.

Figura 4.6: MEV do resíduo da bauxita (A, B, C e D).



Fonte: LCT - USP, 2021.

Figura 4.7: MEV (A) (C) e EDS (B) (D) do RB.



Fonte: LCT - USP, 2021.

Outros estudos com RB (figura 2.14) confirmam a presença de partículas de tamanho e forma irregular. O resíduo de bauxita é apresentado praticamente na forma de aglomerados porosos. De acordo com Garcia (2012) a estrutura superficial irregular, junto a presença de fases porosas higroscópicas podem ser fatores importantes relacionados à elevada capacidade do material em recuperar água do ambiente.

## 4.2 Resultados referentes às argamassas cilíndricas e prismáticas

Estes resultados buscaram investigar a capacidade de aproveitamento do resíduo da bauxita como substituição parcial em massa do agregado miúdo (areia). Como já explicitado, as substituições foram de 0, 15, 30, 45 e 60% em corpos de prova argamassados cilíndricos e prismáticos.

Para os corpos de prova cilíndricos, de dimensões 50 x 100 mm, foram analisados a resistência à compressão, absorção de água total, índice de vazios, massa específica, análise morfológica, química e mineralógica. Já para os corpos de prova prismáticos, de dimensões 200 x 40 x 20 mm, foi analisada a resistência à tração na flexão.

#### 4.2.1 Resistência à compressão de CP's cilíndricos

A tabela 4.7 e a figura 4.8 apresentam uma análise comparativa entre os corpos de prova argamassados sem o resíduo da bauxita (Aref) e àqueles produzidos com substituição parcial do agregado miúdo pelo RB, nos teores de 15% (A15RB), 30% (A30RB), 45% (A45RB) e 60% (A60RB).

Pelos resultados obtidos, pode-se perceber que à medida que houve um aumento na substituição do resíduo da bauxita pela areia, a resistência à compressão diminui. Observa-se que a amostra de referência (Aref) obteve as maiores resistências para todas as idades de cura e entre as porcentagens de substituição, a A30RB foi a que apresentou os resultados mais próximos à Aref aos 28 dias.

A amostra A30RB no vigésimo oitavo dia obteve uma resistência maior que A15RB. Em relação a amostra de referência, com 28 dias de cura, houve uma redução de 15,68% e 21,78% das respectivas amostras A30RB e A15RB. Já para as amostras A45RB e A60RB, houve uma redução de 62,82% e 68,31%, respectivamente, em relação à Aref. Tais dados podem ser confirmados pelas informações contidas na tabela 4.7 e figura 4.8.

Desse modo, alguns fatores poderiam contribuir para estes resultados. Em primeiro lugar, atribui-se a redução dos valores da resistência à compressão das argamassas com RB em relação à Aref ao fato de que a massa específica do resíduo da bauxita é inferior ao valor da massa específica da areia. Massa específica e resistência são grandezas diretamente proporcionais, ou seja, a medida que a massa específica do agregado aumenta, provavelmente maior resistência eles terão, e consequentemente tais características são transmitidas às argamassas produzidas (Rosário, 2013).

Tabela 4.7: Resistências médias à compressão dos traços estudados em função dos dias de cura (3, 7 e 28 dias).

<b>Resistência média à compressão (MPa)</b>					
<b>Dia de cura</b>	<b>Aref (0%)</b>	<b>A15RB (0%)</b>	<b>A30RB (0%)</b>	<b>A45RB (0%)</b>	<b>A60RB (0%)</b>
<b>3 dias</b>	11,09	7,54	7,61	5,36	3,51
<b>7 dias</b>	12,17	10,77	10,78	5,08	5,08
<b>28 dias</b>	16,57	12,96	13,97	6,16	5,25

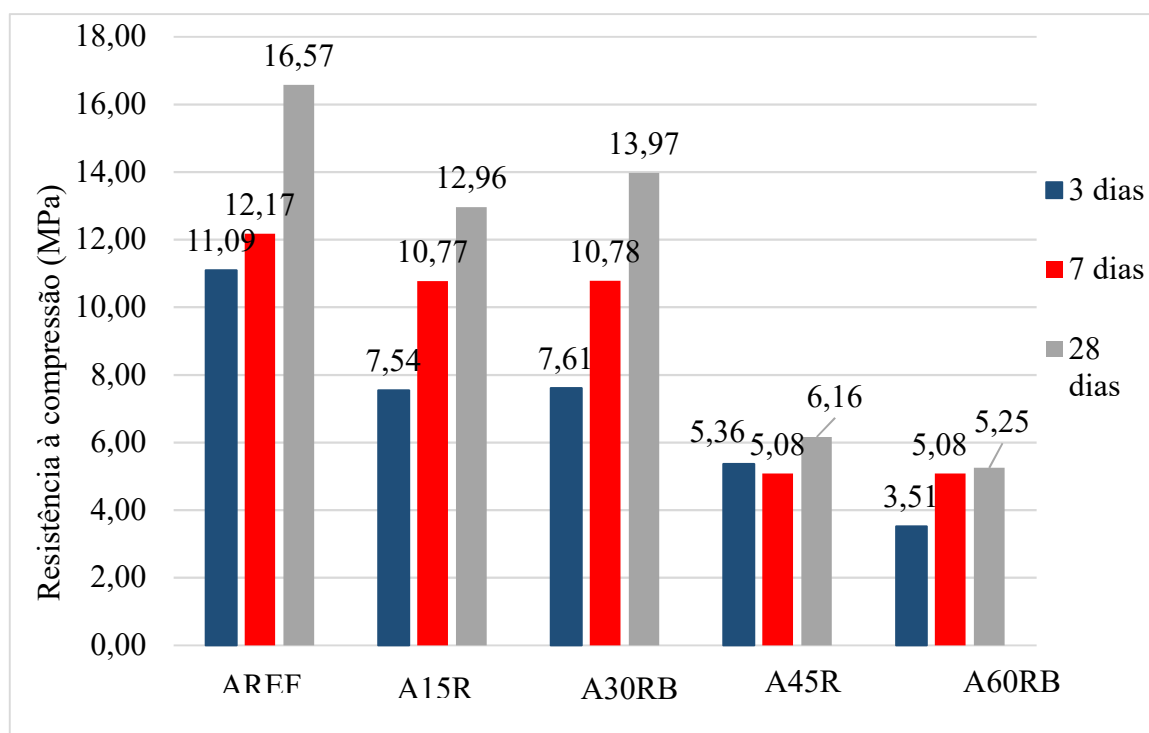
Fonte: Autor, 2022.

Para o comportamento encontrado entre as misturas com RB, observou-se um crescimento na resistência até a A30RB. Entre os fatores que poderiam ter contribuído para esse

comportamento está a finura do RB. Como demonstrado nos resultados da caracterização dos materiais, observou-se que a granulometria do RB é muito fina, desse modo, apesar de ter substituído a areia, há a hipótese de que esse material tenha causado o efeito filer, ou seja, foi responsável por preencher vazios existentes nas argamassas, causando um aumento na densidade da mistura, diminuição no índice de vazios e consequentemente, aumentando a resistência (Pilar, 2012).

A finura do rejeito é também um importante parâmetro que influencia no efeito de nucleação heterogênea, o que acaba gerando maior hidratação das partículas presentes na mistura, causando aumento da resistência (Lawrence, 2005). Para este estudo em específico, observou-se que houve este comportamento até as amostras de A30RB, onde provavelmente a mistura existente favoreceu uma melhor hidratação das partículas cimentícias.

Figura 4.8: Resistências médias à compressão dos traços estudados (0, 15%, 30%, 45% e 60%) em função dos dias de cura (3, 7 e 28 dias).



Fonte: Autor, 2022.

Observou-se que as amostras A45RB e A60RB tiveram resultados para a resistência bem inferiores que A15RB e A30RB. Sabe-se que as partículas de RB influenciam a cinética de hidratação dos grãos de cimento. Porém, a partir de A45RB, este efeito foi reverso, ou seja, em razão da área superficial elevada, o resíduo da bauxita demandou (absorveu) mais água da mistura. Dessa forma, quanto maior a quantidade desse material, mais água ele provavelmente

absorveu, retirando a água que seria para hidratação das partículas cimentíceas, consequentemente, diminuindo a resistência à compressão. Além disso, com maiores quantidades de resíduo da bauxita, provavelmente, as partículas cimentíceas ficaram mais afastadas umas das outras, dificultando a hidratação das mesmas (Cyr et al., 2006).

Destaca-se ainda que os valores das resistências encontrados também podem ter sido resultados da compactação da mistura. A medida que houve um aumento na massa do resíduo da bauxita, a argamassa se tornava mais seca e consequentemente, mais difícil de ser moldada. Logo, em quantidades elevadas (acima da amostra A30RB), provavelmente houve o aumento da porosidade, diminuindo assim a resistência à compressão em função da dificuldade na compactação.

Por ser uma pesquisa inovadora, pouco são os estudos existentes relacionados à substituição de agregado miúdo por resíduo da bauxita. Porém, Rosário (2013) estudou a utilização de agregado graúdo sintético produzido a partir do resíduo da bauxita. Em seus estudos, observou que houve um decréscimo aos 28 dias nos valores de resistência dos concretos com agregado de RB. Para os concretos com substituição de 50% de RB, houve uma redução de 28,25% na resistência. Já para os de 100% de RB, a redução foi de 37,60%. A autora atribuiu esse comportamento ao fato de que parte dos agregados sintéticos de RB possuíam valores de massa específica menores que do agregado natural, logo, as resistências foram menores.

Apesar de o material de estudo não ser resíduo da bauxita, mas possuem características semelhantes, Ganesh Prabuh et al. (2014) utilizaram areia de fundição de alumínio em substituição ao agregado miúdo em porcentagens de 10, 20, 30, 40 e 50%. Os resultados do ensaio de resistência à compressão mostraram que a resistência das misturas foram diminuindo à medida que o percentual de areia de fundição foi aumentando. Os autores concluíram que uma substituição de até 20% poderia ser utilizada na produção do concreto sem afetar seus padrões.

Outro estudo relevante foi o realizado por Hoppen e colaboradores (2005), onde utilizaram o lodo de estação de tratamento de água em matriz de concreto, em substituição parcial à areia. Por meio da análise de fatores como trabalhabilidade, absorção, resistência mecânica, chegaram à conclusão que apesar de a incorporação do lodo em teores inferiores a 10% diminuir a qualidade do concreto, este ainda estaria dentro dos padrões aceitáveis por normas da construção civil.

#### 4.2.2 Absorção de CP's cilíndricos, índice de vazios e massa específica

A substituição parcial da areia pelo resíduo da bauxita surtiu efeito na absorção de água total, índice de vazios e massa específica. As figuras 4.9 e 4.10 e a tabela 4.8 mostram a evolução da massa específica aparente, absorção de água total e índice de vazios das argamassas cilíndricas estudadas. Observa-se que ambas as variáveis estão seguindo o raciocínio semelhante aos resultados apresentados nas resistências à compressão, o que confirma que todas estas propriedades estão intimamente relacionadas entre si.

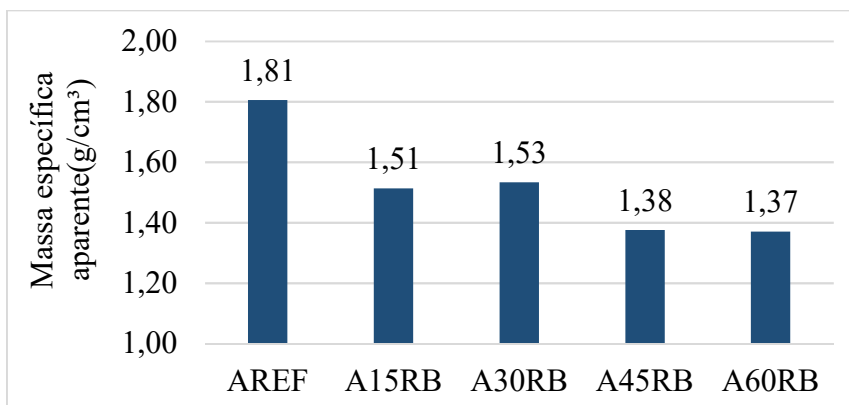
Tabela 4.8: Absorção de água total, índice de vazios e massa específica aparente das argamassas estudadas aos 28 dias.

<b>Traço</b>	<b>Absorção média (%)</b>	<b>índice de vazios (%) – média</b>	<b>Massa específica aparente (g/cm<sup>3</sup>) - média</b>
AREF	6,73	11,80	1,81
A15RB	15,91	24,07	1,51
A30RB	15,47	23,72	1,53
A45RB	22,95	31,52	1,38
A60RB	23,23	31,80	1,37

Fonte: Autor, 2022.

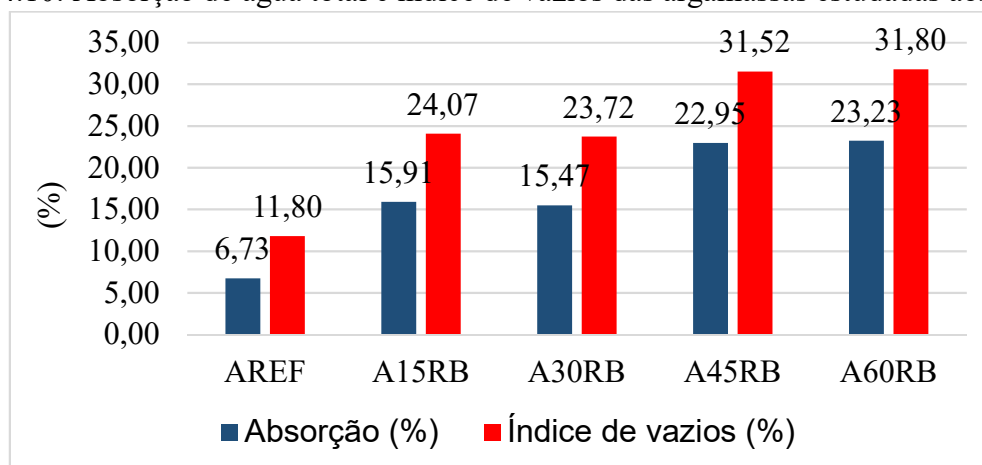
Para a massa específica, à medida que a porcentagem de substituição foi aumentando, a maioria dos seus valores diminuíram, confirmando que de fato, materiais leves tendem a ter resistência à compressão menor. Em relação a Aref, houve uma queda de 16,57% e 15,47% para A15RB e A30RB, respectivamente. Já no que tange aos traços de A45RB e A60RB, houve uma queda de 23,76% e 24,31%, respectivamente, em relação à argamassa de referência.

Figura 4.9: Massa específica aparente das argamassas estudadas aos 28 dias de cura.



Fonte: Autor, 2022.

Figura 4.10: Absorção de água total e índice de vazios das argamassas estudadas aos 28 dias.



Fonte: Autor, 2022.

No que se refere a absorção de água total, houve um acréscimo na porcentagem à medida que a quantidade de resíduo da bauxita foi aumentando. O mesmo ocorreu com o índice de vazios, já que ambos são diretamente proporcionais. Enquanto que a absorção de água total na Aref, foi de 6,73%, nas substituições os valores foram maiores, sendo 15,91% para A15RB, 15,47% para A30RB, 22,95% para A45RB e 23,23% para A60RB. Como já citado, o índice de vazios apresentou um comportamento semelhante, tendo a Aref 11,80%, e as demais 24,07%, 23,72%, 31,52% e 31,80% para A15RB, A 30RB, A45RB e A60RB, respectivamente.

Salienta-se que a medida que a quantidade de poros aumenta, maior será o índice de vazios, menor será a resistência à compressão, além de que quanto menor a massa específica do material, menor também a resistência. De certa forma, todos esses resultados foram comprovados pelas análises das propriedades já citadas (Tavares, 2015).

É importante ressaltar que assim como na resistência à compressão, a amostra A30RB apresentou os resultados mais satisfatórios entre todas as substituições para a absorção, massa específica e índice de vazios. Até a porcentagem de 30% (entre as amostras com RB), a finura das partículas do resíduo propiciou um preenchimento de vazios com consequente refinamento do sistema de poros, aumentando, mesmo que em pequena quantidade, a massa específica, favorecendo um aumento de resistência.

De acordo com Carasek (2016), esse comportamento pode ser atribuído pelo fator de empacotamento. Um melhor empacotamento da mistura resulta em um sistema com menos porosidade.

No entanto, a partir de um certo nível de substituição (acima de 30%), este comportamento foi invertido. Dificuldades na moldagem ocorreram, uma vez que a trabalhabilidade foi reduzida e a massa específica diminuiu. A fraca trabalhabilidade do material a partir de porcentagens elevadas diminuiu a compactação e aumenta a porosidade. O aumento da porosidade faz com que a densidade diminua e eleva a taxa de absorção de água (Ganesh Prabuh et al., 2014).

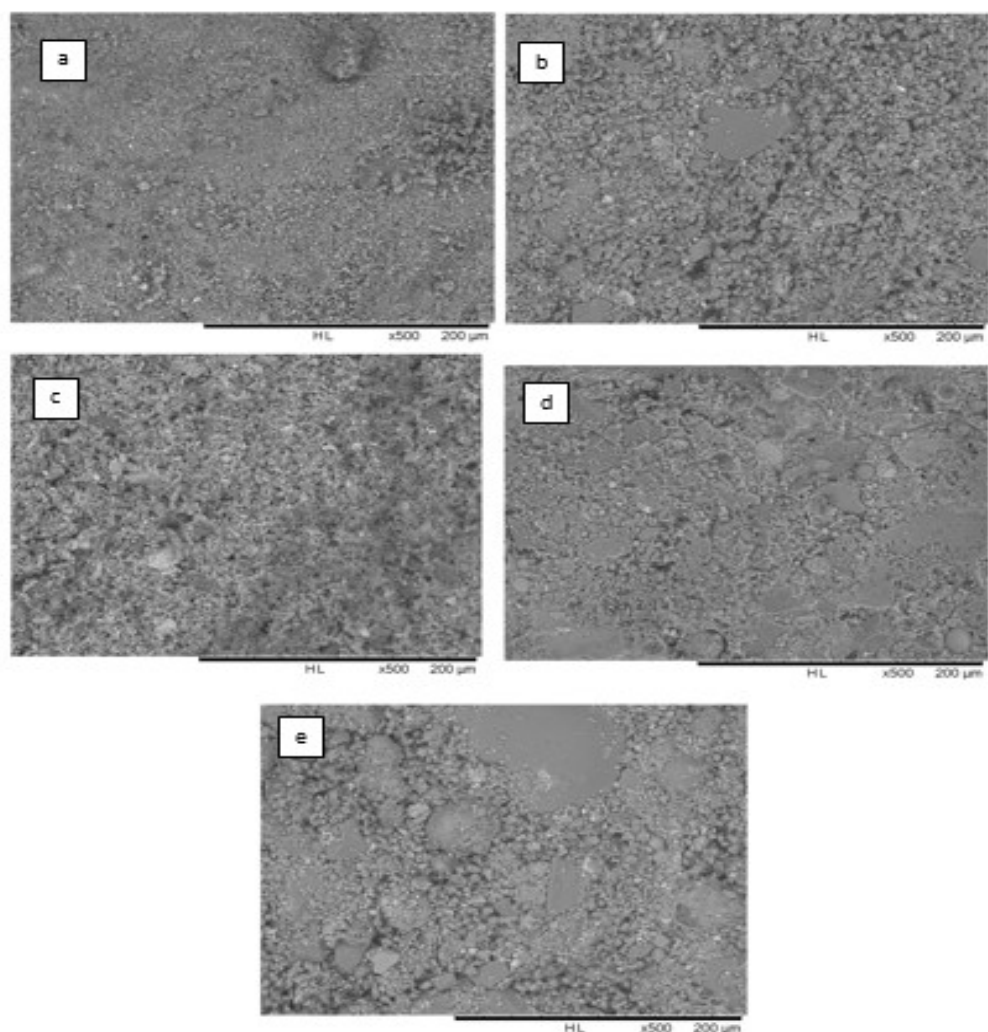
Como já citado, Rosário (2013) estudou a utilização de agregado graúdo sintético produzido a partir do resíduo da bauxita. Para o comportamento do índice de vazios a autora observou que a medida que houve o aumento na porcentagem do resíduo, o valor da propriedade estudada também aumentou. Já Ganesh Prabuh et al. (2014) também chegaram à conclusão que quanto maior a porcentagem de substituição da areia de fundição de alumínio pelo agregado miúdo, menor foi a densidade e maior a absorção.

#### 4.2.3 Análise morfológica das argamassas (MEV/EDS)

As análises de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectrometria de energia dispersiva de raios x (EDS) permitiram observar a morfologia das argamassas produzidas (sem e com o rejeito da bauxita), além de identificarem os componentes químicos presentes nas amostras. Foram realizadas análises entre as amostras Aref, A15RB, A30RB, A45RB e A60RB e foi realizada uma varredura em um nível de observação de 200  $\mu\text{m}$ .

A Figuras 4.11 (a), 4.11 (b), 4.11 (c), 4.11 (d) e 4.11 (e) mostram a morfologia das argamassas Aref, A15RB, A30RB, A45RB e A60RB, respectivamente.

Figura 4.11: MEV da amostra Aref (a), A15RB (b), A30RB (c), A45RB (d) e A60RB (e).



Fonte: BIOMMAUFMA, 2021.

Nota-se, pelas imagens da figura 4.11, que ambas as amostras apresentaram microcaracterísticas semelhantes, possuindo algumas áreas uniformes e outras com alguns fragmentos espalhados, no entanto, percebe-se que a argamassa de referência (figura 4.11 (a)) apresentou-se mais compacta e com menos poros perceptíveis. E é notório que a medida que a quantidade de RB foi aumentando, houve aumento da diversidade de poros e vazios capilares, afetando consequentemente, a resistência final dessas argamassas.

Assim, confirma-se os valores encontrados nas resistências e absorções das argamassas, uma vez que a Aref apresentou uma resistência à compressão maior e uma menor absorção dentre todas as amostras.

Já entre as amostras com substituição do resíduo, a amostra A30RB foi a que apresentou resultados quanto às características físico-mecânicas mais satisfatórios, o que

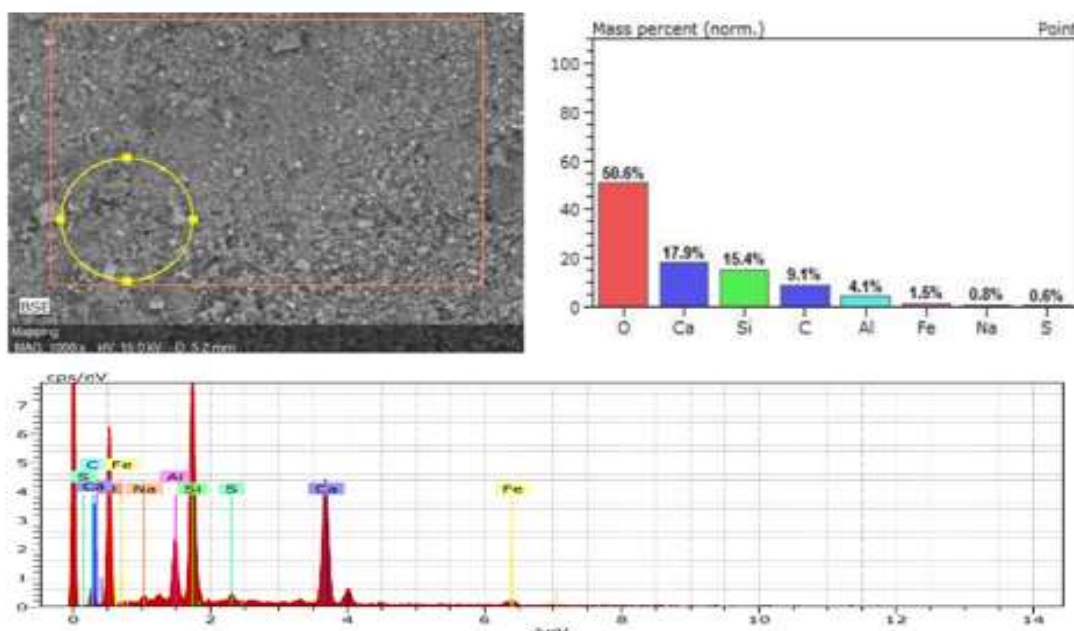
também pode ser comprovado pela figura 4.11 (c), onde sua microscopia apresenta uma região mais uniforme e com menores quantidades de vazios dentre as amostras com RB. As demais amostras apresentam uma maior quantidade de poros e aglomerados de materiais.

Isso ocorre devido ao fato de que a medida que se aumenta o resíduo da bauxita, que é caracterizado por apresentar partículas de tamanho e forma irregular, as argamassas acabam adquirindo características deste material.

É possível observar também a presença de pequenos aglomerados (bolotas) em algumas dessas imagens (4.11 (d) e 4.11 (e)), principalmente nas amostras em que as resistências foram menores, como A45RB e A60RB. Esses materiais aglomerados são resíduo da bauxita misturados com água. Como o RB é um material bastante absorvente, a tendência é que ele absorva a água mais rapidamente que o cimento, dessa forma, devido a dificuldades na moldagem, algumas dessas amostras apresentaram esse tipo de comportamento, afetando os resultados mecânicos finais.

Para a identificação dos elementos químicos presentes na amostra, foi realizada a espectrometria de energia dispersiva de raios x (EDS). A figura 4.12 apresenta os resultados encontrados para a Aref.

Figura 4.12: EDS da amostra Aref.

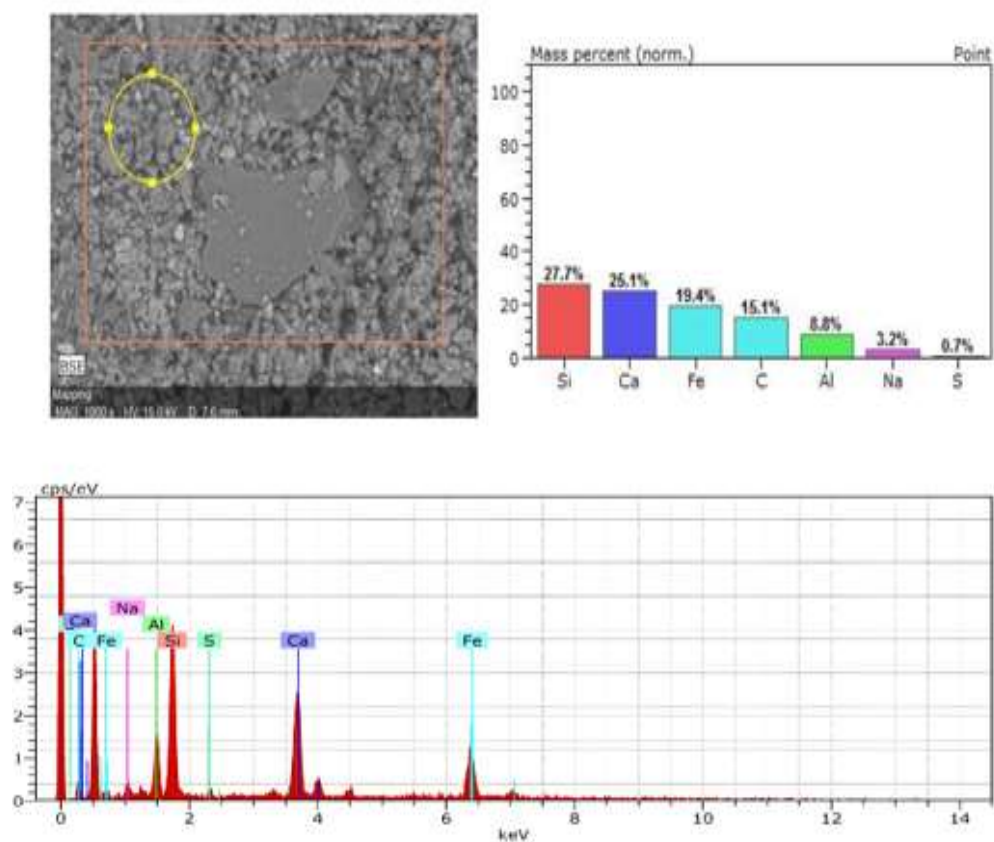


Fonte: BIOMMAUFMA, 2021.

Conforme visto na figura 4.12, é possível identificar na amostra Aref, sem resíduo de bauxita na composição, a presença de alguns elementos, tais como: o oxigênio com 50,6%,

cálcio com 17,9% e silício com 15,4%, entre outros (carbono, alumínio, sódio e enxofre). Destaca-se que ocorre a presença de uma pequena quantidade de ferro na composição no valor de 1,5%. Já para a composição A15RB (figura 4.13), ou seja, substituindo em 15% a areia pelo resíduo da bauxita, houve um aumento no teor de silício, cálcio, ferro, carbono, alumínio, sódio e enxofre em relação à Aref.

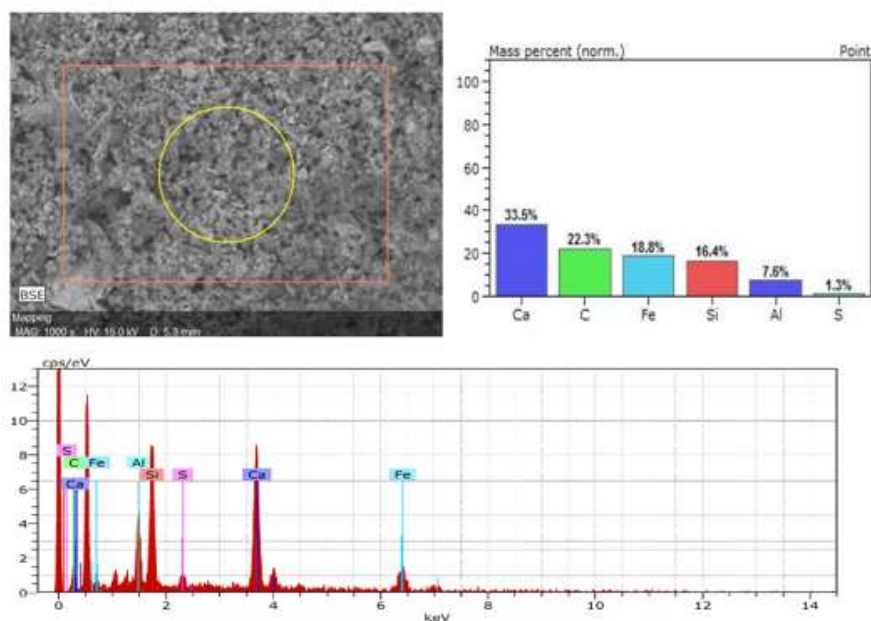
Figura 4.13: EDS da amostra A15RB.



Fonte: BIOMMAUFMA, 2021.

No que tange à amostra A30RB (figura 4.14), ocorreu aumento no teor de cálcio e carbono em relação à amostra A15RB, nos valores de 33,5% e 22,3%, respectivamente. Detectou-se também a presença do ferro, silício, alumínio e enxofre.

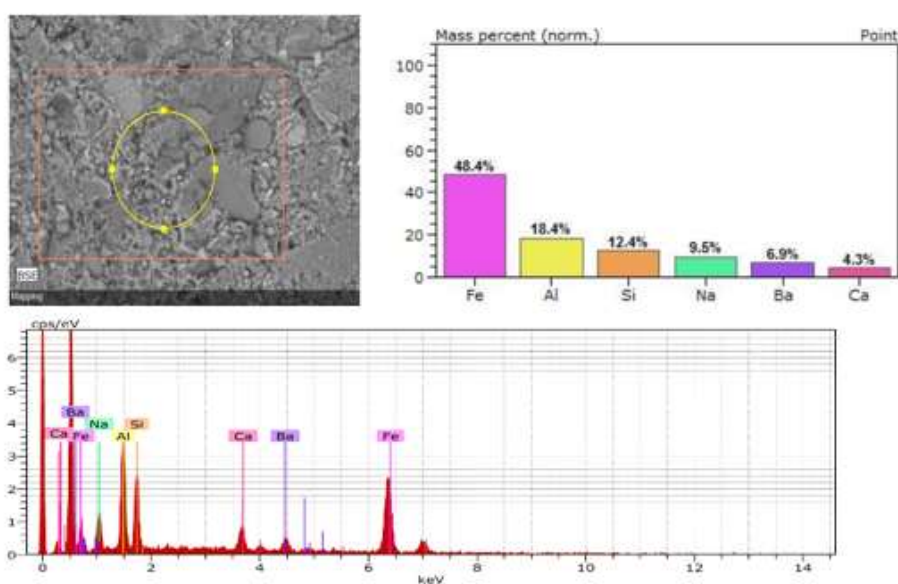
Figura 4.14: EDS da amostra A30RB.



Fonte: BIOMMAUFMA, 2021.

Para a amostra de A45RB, ou seja, substituindo em 45% a areia pelo resíduo de bauxita, conforme a figura 4.15, o ferro subiu consideravelmente, chegando a atingir um valor de 48,4%. Também houve aumento no quantitativo de silício e alumínio. Manteve-se a presença do cálcio e sódio, e houve o aparecimento de um novo elemento, o bário.

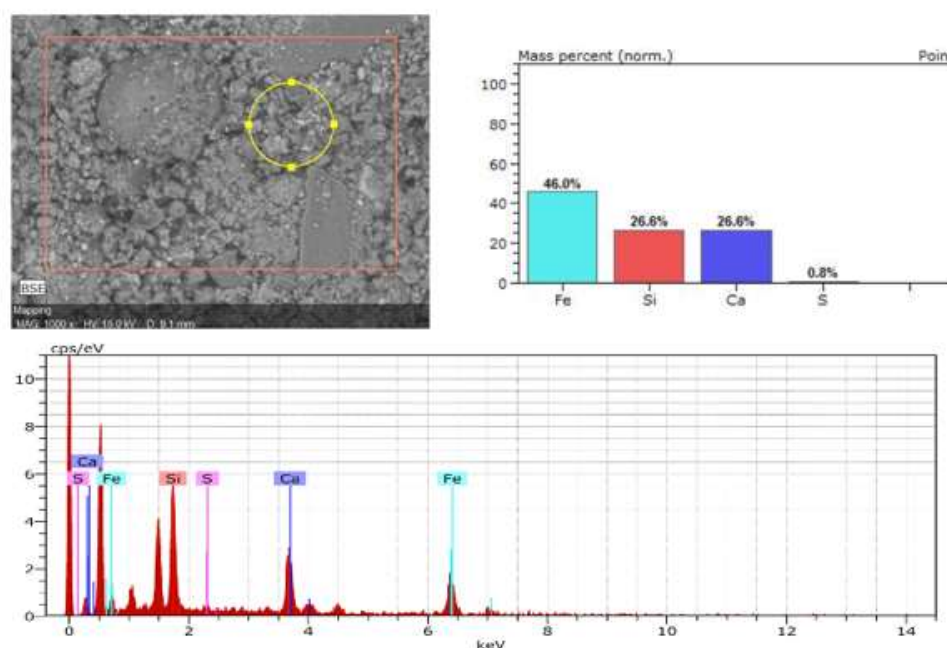
Figura 4.15: EDS da amostra A45RB.



Fonte: BIOMMAUFMA, 2021.

E por fim, na amostra A60RB conforme figura 4.16, houve um salto no valor do ferro em relação à argamassa de referência, alcançando um valor de 46%. Além da presença de outros elementos, como o silício, cálcio e enxofre.

Figura 4.16: EDS da amostra A45RB.



Fonte: BIOMMAUFMA, 2021.

Como já discutido anteriormente, este ensaio busca identificar quais elementos estão presentes em uma determinada área de uma determinada amostra das argamassas, fornecendo assim uma visão geral dos elementos constituintes.

Em suma, percebeu-se que na amostra de referência, há a presença de elementos de fundamental importância para o processo de hidratação e consequentemente, endurecimento do cimento com o objetivo de ganho de resistência. Entre eles, destacam-se o cálcio e o silício, responsáveis pela formação do silicato de cálcio hidratado (C-S-H), que é determinante para as propriedades mecânicas da pasta cimentícia.

Percebeu-se também que houve um aumento gradativo no teor de ferro em todas as amostras a medida em que a porcentagem de substituição aumentava, o que confirma a grande presença desse elemento no resíduo da bauxita.

Destaca-se ainda a composição da amostra A30RB, que apresentou os melhores resultados físico-mecânicos entre as argamassas com substituição. Ao analisar essa amostra,

percebeu-se que ela possui elementos essenciais para o ganho de resistência, como: o cálcio, silício, alumínio e ferro. Desta forma, através da hidratação das suas partículas, com a formação do silicato de cálcio hidratado, atrelado a provavelmente uma ótima compactação e um bom preenchimento de vazios, esta argamassa ganhou destaque quanto às suas características mecânicas frente à outras composições.

#### 4.2.4 Análise química (FRX)

Conforme dados obtidos pela fluorescência de raios-X nas amostras do vigésimo oitavo dia (quadro 4.1), verifica-se que o teor de óxido de alumínio cresce à medida que se adiciona o resíduo da bauxita nas amostras, sofrendo um aumento progressivo em todas as composições. O mesmo ocorre com óxido de ferro.

Nota-se ainda que com o acréscimo do resíduo da bauxita, há uma pequena redução com oscilação na quantidade de dióxido de silício e óxido de cálcio, o que justifica a redução na resistência à compressão, uma vez que são elementos de fundamental importância para o ganho de resistência do concreto ao longo do tempo.

Tais dados corroboram com o comportamento já esperado, pois estes elementos se fazem presentes na composição do resíduo da bauxita. Como já citado, o resíduo da bauxita estudado em questão possui esses componentes químicos presentes, pois retém todo o ferro, alumínio, titânio e silício presentes na bauxita (rocha de origem).

Já o cálcio encontrado no RB é adicionado durante o processo de produção do alumínio (processo Bayer), no tratamento cáustico, antes da digestão (Silva Filho et al., 2007). Observa-se um teor muito alto de óxido de alumínio residual devido a quantidade de alumina ainda contida no resíduo após o final do processo Bayer.

É importante salientar que estes resultados fornecidos pela análise química, confirmam os resultados encontrados pela espectrometria de energia dispersiva de raios x (EDS), uma vez que apresentam praticamente os mesmos elementos químicos na composição das argamassas.

Quadro 4.1: FRX das amostras estudadas aos 28 dias de cura.

Amostras	Cura com 28 dias				
	Aref (0%)	A15RB (15%)	A30RB (30%)	A45RB (45%)	A60RB (60%)
<b><math>Al_2O_3</math></b>	7,53	7,48	10,15	11,81	11,19
<b><math>SiO_2</math></b>	69,01	59,63	51,92	54,43	47,71
<b><math>Fe_2O_3</math></b>	2,92	4,92	9,94	9,48	13,32
<b><math>TiO_2</math></b>	0,31	0,47	0,84	1,15	1,57
<b><math>Ga_2O_2</math></b>	0,0000	0,0000	0,0034	0,0025	0,0034
<b>MnO</b>	0,044	0,052	0,036	0,041	0,031
<b><math>ZrO_2</math></b>	0,023	0,053	0,103	0,065	0,116
<b><math>Na_2O</math></b>	1,578	1,901	2,648	4,051	4,269
<b>CaO</b>	14	12,908	11,602	11,515	12,065
<b><math>SO_3</math></b>	0,73	0,682	0,614	0,521	0,608
<b><math>P_2O_5</math></b>	0,108	0,089	0,085	0,171	0,146
<b><math>V_2O_5</math></b>	0,029	0,028	0,037	0,039	0,042
<b><math>Cr_2O_3</math></b>	0,01	0,011	0,015	0,017	0,018

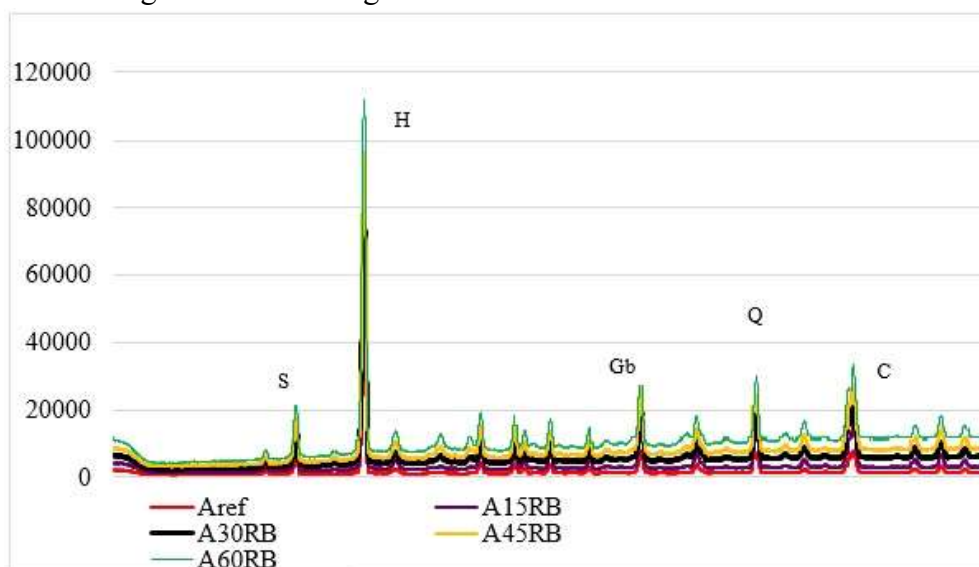
Fonte: Autor, 2022.

#### 4.2.5 Análise mineralógica (DRX)

Na figura 4.17, pode-se observar os difratogramas de cada amostra. Nele, identificou-se qualitativamente as fases cristalinas presentes nas amostras estudadas. Notou-se a presença da gibsita (Gb), quartzo (Q), calcita (C), hematita (H) e sodalita (S), em todas as amostras.

Quando se analisa os picos existentes no difratograma, constata-se que à medida que se substitui gradativamente a areia pelo resíduo da bauxita, os picos dessas fases sofrem oscilações. Dessa forma, em todas as amostras com resíduo da bauxita há a presença das fases cristalinas citadas. É interessante analisar a presença do quartzo, da sodalita e calcita que têm influência direta na resistência à compressão do material. Nota-se ainda que a adição do RB na argamassa com o cimento CP-IV não gerou a formação de novas fases cristalinas nas amostras.

Figura 4.17:Difratograma das amostras com 28 dias de cura.



Fonte: Laboratório de Engenharia Civil -UFMA, 2021.

#### 4.2.6 Análise ambiental (lixiviação)

Para a análise de lixiviação, buscou-se analisar a estabilidade química e o grau de imobilização de contaminantes quando em contato com solventes, como a água, e sua capacidade de transferência. Foram encontrados resultados para as amostras Aref, A15RB, A30RB, A45RV e A60RB em relação aos parâmetros inorgânicos estabelecidos pela NBR 10005 (ABNT, 2004).

Pelos resultados encontrados, a amostra A30RB foi a que apresentou o maior resultado para o elemento bário, com 2,3 mg/L. A amostra A15RB foi a que mostrou maior valor para fluoreto, com 1,0 mg/L e a amostra A60RB foi a que apresentou maior valor para o elemento cromo, com 0,126 mg/L. Porém, todos os parâmetros encontrados ficaram bem abaixo dos parâmetros inorgânicos estabelecidos pela NBR 10004 (ABNT, 2004), de acordo com quadro 4.2.

Quadro 4.2: Resultado dos parâmetros inorgânicos – lixiviação.

AMOSTRAS (mg/L)	Arsênio	Bário	Cádmio	Chumbo	Cromo	Fluoreto	Mercúrio	Prata	Selênio
<b>Norma</b>	<1,0	<70	<0,5	<1,0	<5,0	<150	<0,1	<5,0	<1,0
<b>AREF</b>	< 0,01	0,08	< 0,001	< 0,01	0,019	0,2	< 0,00005	< 0,005	<0,008
<b>A15RB</b>	< 0,01	0,022	< 0,001	< 0,01	0,016	1	< 0,00005	< 0,005	<0,008
<b>A30RB</b>	< 0,01	2,3	< 0,001	< 0,01	< 0,01	0,2	< 0,00005	< 0,005	<0,008
<b>A45RB</b>	< 0,01	1,6	< 0,001	< 0,01	0,114	0,7	< 0,00005	< 0,005	<0,008
<b>A60RB</b>	< 0,01	< 0,01	< 0,001	< 0,01	0,126	0,4	< 0,00005	< 0,005	<0,008

Fonte: Autor, 2022.

Desta forma, pelos dados obtidos, chega-se à conclusão que a todas as composições, tanto a argamassa de referência quanto as argamassas com RB não apresentam toxidez e são classificadas como resíduo de classe II, ou seja, não perigoso, diferentemente do resíduo da bauxita, que na maioria das vezes é classificado como resíduo perigoso. Mercury et al. (2010), por exemplo, classificam o resíduo de bauxita como resíduo Classe I - perigoso (alta corrosividade e reatividade) devido a sua alta alcalinidade e a grande presença de metais pesados. Estes resultados favoráveis para as argamassas podem estar associados ao fato de que ao se adicionar o resíduo da bauxita na argamassa cimentícia, ocorre a diminuição da concentração dos elementos.

#### 4.2.7 Resistência à tração na flexão de CP's prismáticos

Em relação aos valores da resistência média à tração na flexão de corpos de prova argamassados prismáticos (200 mm x 40 mm x 20 mm), pode-se observa-los na tabela 4.7 e figura 4.18 abaixo.

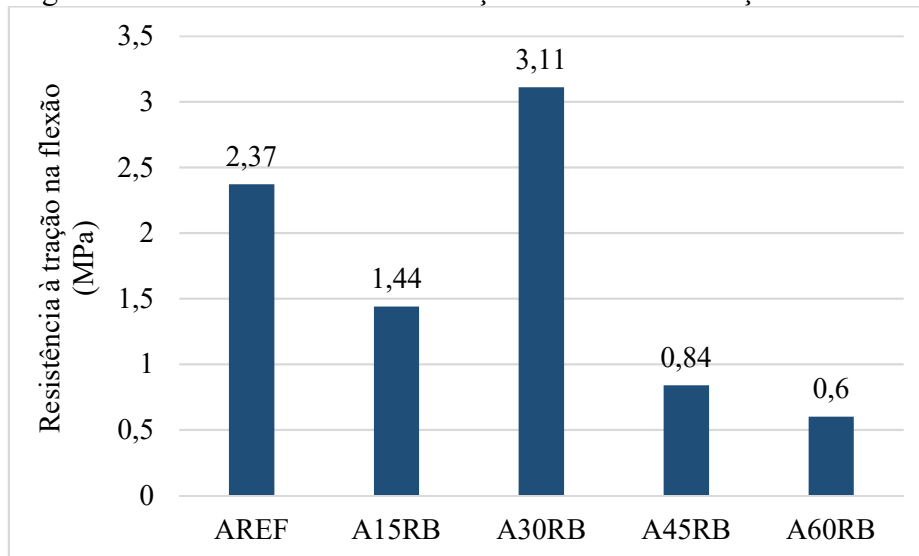
Tabela 4.7: Resistência média à tração na flexão.

Traço	Força máxima (N)	Tensão máxima (MPa)
AREF	252,40	2,37
A15RB	153,81	1,44
A30RB	331,80	3,11
A45RB	89,12	0,84
A60RB	63,88	0,60

Fonte: Autor, 2022.

Pela análise dos resultados obtidos, para a resistência média à tração na flexão aos 28 dias de cura, a amostra A30RB obteve o melhor resultado, chegando a um valor de 3,11 MPa. Em relação a argamassa de referência, a amostra A15RB obteve um decréscimo de 39,24%. Já a amostra A30RB apresentou um aumento de 31,22 %. Para as amostras de A45RB e A60RB, em relação à Aref, houve um decréscimo de 64,56% e 74,68%, respectivamente.

Figura 4.18: Resistência média à tração na flexão dos traços estudados.



Fonte: Autor, 2022.

Desta maneira, chega-se à conclusão que os valores de resistência à tração na flexão obtidos para os 28 dias de cura diferem dos resultados esperados. Como já discutido nesta pesquisa, o resíduo da bauxita é um material bastante poroso e com baixo valor de massa específica. Então, pelos resultados já discutidos, esperava-se que a medida em que fossem aumentados os percentuais de substituição, a resistência diminuiria em relação à argamassa de referência, e não o contrário, como ocorreu com A30RB.

Uma possível justificativa para tal divergência pode ser resultado da compactação manual atrelada ao uso de formas improvisadas de madeira. Houve bastante dificuldade em compactar essas argamassas, uma vez que eram extremamente secas e aplicadas em moldes prismáticos com dimensões extremamente pequenas. Porém, apesar de diferirem do esperado, os resultados mostraram que a amostra A30RB foi a que possuiu resultados mais satisfatórios, confirmando o fato de que nessa porcentagem a mistura entre os materiais tornou-se a mais homogênea entre as substituições, com resultados satisfatórios para as propriedades estudadas.

De acordo Rosário (2013), para a resistência à tração na flexão em seu estudo na idade de 28 dias, houve um decréscimo na resistência para amostras com % de substituição do resíduo

da bauxita. Em relação aos valores de referência, houve uma queda na ordem de 29,31% e 27,65% para os concretos com 50% e 100% de substituição de agregado sintético com RB.

### 4.3 Resultados referentes às telhas de concreto

Como já explicitado anteriormente, a etapa 3 correspondeu à fabricação de telhas de concreto com o resíduo da bauxita na porcentagem que obteve os melhores resultados físico-mecânicos entre as argamassas com resíduo na etapa II. Dessa forma, pelos resultados das análises realizadas e discutidas no item 4.2, observou-se que a porcentagem de 30% foi a que obteve os melhores resultados para a argamassa de concreto.

Desse modo, foi realizada a fabricação de telhas com a referida porcentagem (30% de substituição do RB por areia) com o objetivo de avaliar se as características apresentadas por esses artefatos de concreto apresentarão os limites exigidos pelas normas.

#### 4.3.1 Peso seco

No que tange ao peso seco, a tabela 4.8 apresenta os valores individuais em dN/m<sup>2</sup> e a média de 6 (seis) telhas ensaiadas.

Tabela 4.8: Peso seco das telhas de concreto 30%.

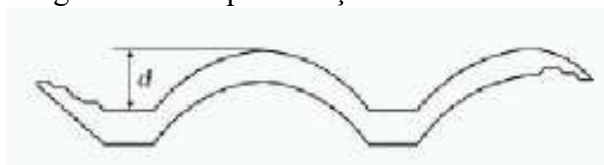
<b>Telhas</b>	<b>Massa seca - Ms (kg)</b>	<b>Peso seco em daN/m<sup>2</sup></b>	<b>Peso seco em daN/m<sup>2</sup> - média</b>
Telha 1	4,690	49,245	49,201
Telha 2	4,685	49,193	
Telha 3	4,680	49,140	
Telha 4	4,690	49,245	
Telha 5	4,683	49,172	
Telha 6	4,687	49,214	

Fonte: Autor, 2022.

É válido destacar que para o cálculo do peso seco em decanewton por m<sup>2</sup> para a referida telha, foram consideradas 10,5 peças de telhas por m<sup>2</sup> de acordo com o manual da empresa Contelha (fábrica responsável pela produção das telhas em questão).

A telha de estudo em questão é do tipo classe A, pois a distância (d) vertical (figura 4.19) medida entre a crista da onda mais alta e o canal mais baixo é de 50 mm.

Figura 4.19: Representação da distância "d".

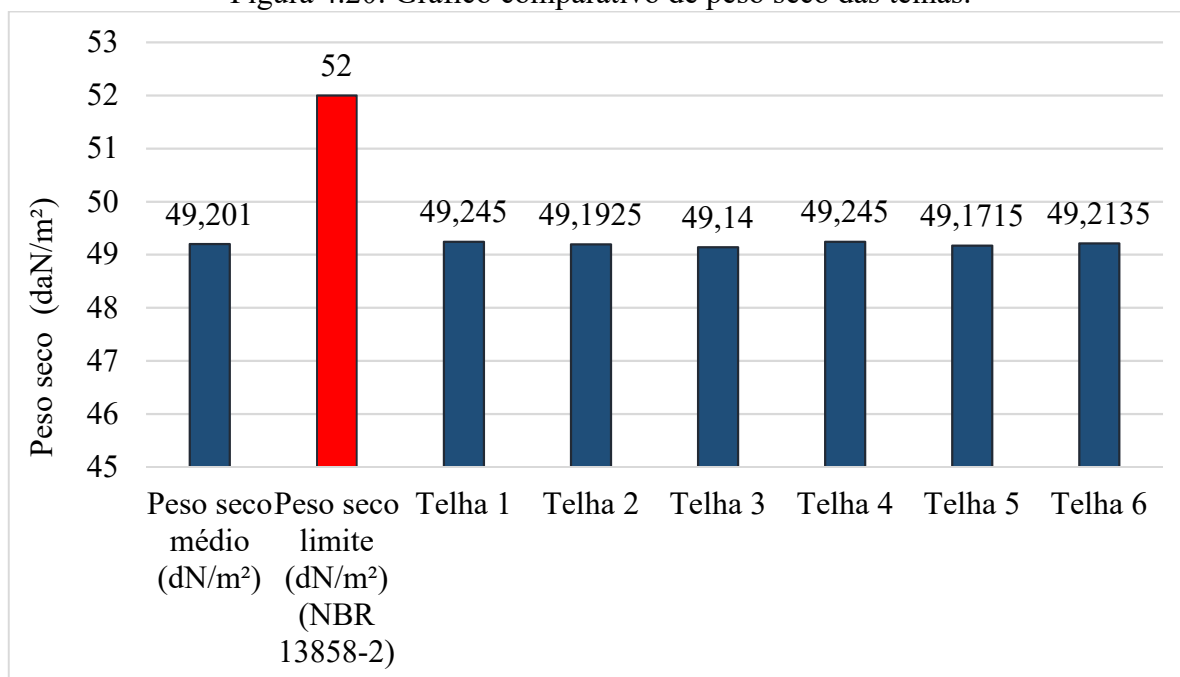


Fonte: NBR 13858-2, 2009.

Em conformidade com a NBR 13858-2 (ABNT, 2009), a expressão dos resultados individuais das amostras em daN/m<sup>2</sup> de área útil da telha em função da classe A, deve ser menor ou igual a 52 daN/m<sup>2</sup>. Pelos resultados obtidos na tabela 4.9, chega-se à conclusão que tanto os pesos individuais quanto o peso seco médio para as telhas corresponderam ao limite exigido pela norma, pois ambos apresentaram valores inferiores a 52 daN/m<sup>2</sup>.

Dessa forma, as telhas de concreto fabricadas com 30% de RB em substituição à areia estão tecnicamente viáveis quanto ao peso seco. A figura 4.20 apresenta um gráfico comparativo entre o peso seco médio, individual e o limite exigido pela norma.

Figura 4.20: Gráfico comparativo de peso seco das telhas.



Fonte: Autor, 2022.

### 4.3.2 Absorção de água

Em relação à propriedade de absorção das telhas de concreto, a tabela 4.9 apresenta os resultados, em porcentagem, para as 6 telhas ensaiadas, bem como a absorção média.

Tabela 4.9: Resultado de absorção para a telha de concreto 30%.

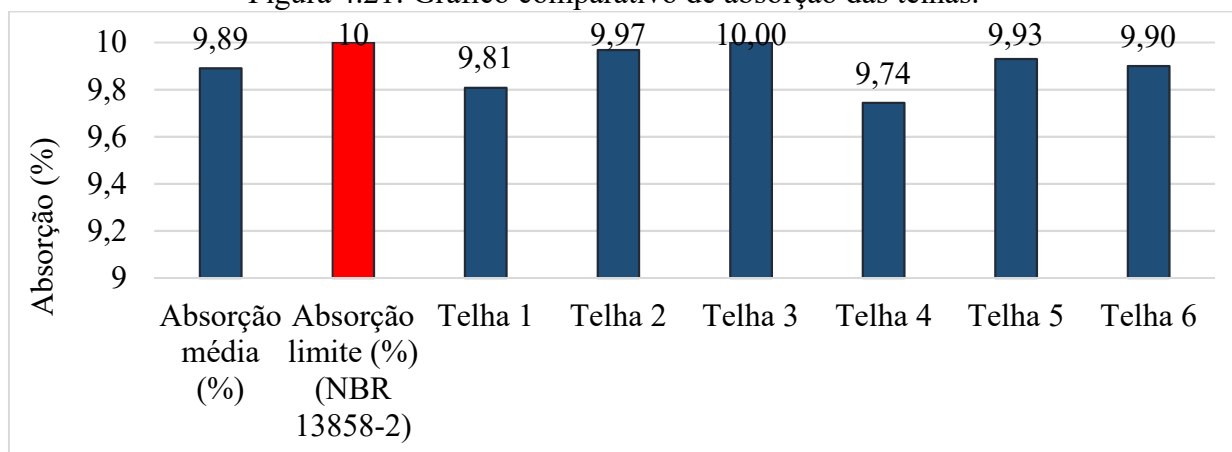
<b>Absorção da telha de concreto 30%</b>				
	<b>Massa úmida - Mu (g)</b>	<b>Massa seca - Ms (g)</b>	<b>Absorção (%)</b>	<b>Absorção média (%)</b>
Telha 1	5150	4690,00	9,81	9,89
Telha 2	5152	4685,00	9,97	
Telha 3	5148	4680,00	10,00	
Telha 4	5147	4690,00	9,74	
Telha 5	5148	4683,00	9,93	
Telha 6	5151	4687,00	9,90	

Fonte: Autor, 2022.

De acordo com a NBR 13858-2 (ABNT, 2009), a absorção de água de cada telha deve ser menor ou igual a 10%. Pelos resultados obtidos, observa-se que tanto as porcentagens individuais quanto a porcentagem média de absorção para as telhas corresponderam aos limites exigidos pela norma, pois ambos apresentaram valores inferiores ou igual a 10%.

Dessa forma, as telhas de concreto fabricadas com 30% de RB em substituição à areia estão tecnicamente viáveis quanto à absorção. Abaixo, tem-se um gráfico comparativo entre a porcentagem média e individual da absorção das telhas e a exigida pela norma (figura 4.21).

Figura 4.21: Gráfico comparativo de absorção das telhas.



Fonte: Autor, 2022.

É interessante fazer um comparativo entre a porcentagem de absorção em corpos de provas argamassados e em telhas de concreto. Foi discutido no item 4.2.2 que a absorção para o corpo de prova argamassado cilíndrico com a mesma porcentagem (30%) que as telhas aqui discutidas foram de 15,47%. Por isso a necessidade da fabricação do artefato de estudo em questão.

Salienta-se que apesar de terem sido fabricados com o mesmo traço, o método de compactação foi diferente. Enquanto que para os CP's cilíndricos a compactação foi manual, para as telhas de concreto, a produção foi realizada através do método de extrusão, com maquinário altamente qualificado.

De acordo com o proprietário da empresa responsável pela fabricação das telhas, a compactação mecânica delas ocorreu através de uma máquina que possui uma força de 6 toneladas. Logo, está explicado o motivo da diferença quanto a porcentagem de absorção entre os CP's cilíndricos e as telhas.

#### 4.3.3 Impermeabilidade

Após a realização do teste de impermeabilidade, foi observado (figura 4.22) que as telhas não apresentaram vazamentos ou até mesmo formação de gotas em sua face inferior. Dessa maneira, as telhas de concreto fabricadas com 30% de RB em substituição à areia estão tecnicamente viáveis quanto à impermeabilidade, pois de acordo com a NBR 13858-2 (ABNT, 2009) a telha não deve apresentar vazamentos ou formação de gotas em sua face inferior, sendo tolerado apenas o aparecimento de manchas de umidade.

Figura 4.22: Resultado do teste de impermeabilidade.



Fonte: Autor, 2022.

#### 4.3.4 Carga de ruptura à tração na flexão

No que diz respeito à resistência à tração na flexão das telhas, a tabela 4.10 e a figura 4.23 apresentam os resultados das cargas de ruptura, em newton, para as 12 telhas ensaiadas, sendo 6 referentes aos 28 dias de cura e 6 referentes aos 60 dias.

Tabela 4.10: Resultado da carga de ruptura à tração na flexão para a telha de concreto 30%.

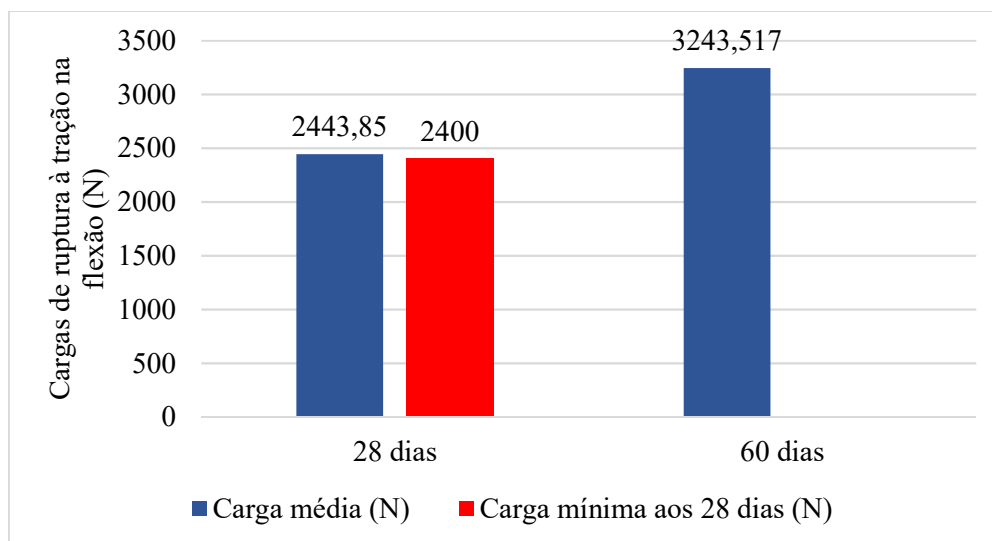
<b>Idade de cura</b>	<b>Telhas</b>	<b>Carga de ruptura à tração na flexão (N)</b>	<b>Carga média (N)</b>
28 dias	Telha 1	2430,000	2443,850
	Telha 2	2454,000	
	Telha 3	2453,000	
	Telha 4	2435,000	
	Telha 5	2442,500	
	Telha 6	2448,600	
60 dias	Telha 7	3250,200	3243,517
	Telha 8	3245,300	
	Telha 9	3235,600	
	Telha 10	3236,000	
	Telha 11	3249,000	
	Telha 12	3245,000	

Fonte: Autor, 2022.

De acordo com a NBR 13858-2 (ABNT, 2009), a carga de ruptura à flexão de cada telha pertencente ao perfil “A” aos 28 dias de idade deve ser de no mínimo 2400 N. Pelos resultados obtidos, observa-se que tanto os valores de carga individuais quanto o valor médio para as telhas corresponderam ao limite exigido pela norma, pois ambos apresentaram valores de no mínimo 2400 N.

Dessa forma, as telhas de concreto fabricadas com 30% de RB em substituição à areia estão tecnicamente viáveis quanto à carga de ruptura à flexão. Abaixo, tem-se um gráfico comparativo entre a carga média de tração à flexão das telhas e a exigida pela norma (figura 4.23).

Figura 4.23: Gráfico comparativo de cargas da ruptura à tração na flexão das telhas.



Fonte: Autor, 2022.

Pela figura 4.23, observa-se que aos 28 dias de idade, a carga média para a ruptura das telhas com substituição de 30% da areia pelo RB foi de 2443,85 N. Já para os 60 dias de idade, esse valor cresceu 32,72 %, chegando a 3243,517 N. Ambos os valores encontrados são extremamente satisfatórios para a pesquisa, uma vez que se apresentam dentro dos limites exigidos pela norma.

A resistência elevada pode ser explicada ao fato de que na porcentagem de 30%, a argamassa se tornou mais homogênea, com maior preenchimento de vazios, tornando o artefato mais compacto. A forma de compactação também contribuiu muito para os resultados, pois foi realizada a compactação mecanizada por extrusão, reduzindo consideravelmente os vazios que teriam caso fossem fabricados manualmente.

Percebeu-se que aos 60 dias a carga aumentou consideravelmente. Este fato pode ser explicado pela hidratação das partículas através do efeito de nucleação, ou seja, observou-se que de 28 até 60 dias, provavelmente as partículas de materiais dos artefatos acabaram possuindo uma maior hidratação, consequentemente causando aumento da resistência (LAWRENCE, 2005).

Pouco se tem discutido sobre a utilização do resíduo da bauxita como substituição de areia, principalmente quando relacionado a produção de telhas. Alguns estudos semelhantes já foram realizados e inclusive citados nesta pesquisa, como por exemplo, Fernandes (2017), que teve como objeto de estudo o desenvolvimento da telha de concreto ecoeficiente utilizando resíduo de mármore do tear de fio diamantado. Como resultado a nova telha de concreto

apresentou carga de ruptura à flexão entre 2524 N e 2528 N e absorção de água entre 8,3 e 8,2%, os quais atendem às especificações técnicas brasileiras para esta tipologia de material de construção.

No estudo de Schneider et al (2017), houve a análise da viabilidade técnica da utilização de telhas de concreto leve com adição de EPS como agregado miúdo. Nesse estudo, os pesquisadores verificaram que as telhas com 35% e 50% apresentaram falhas no processo de produção e que todas as amostras com adição de EPS não obtiveram resultados satisfatórios para resistência à flexão conforme o mínimo estabelecido pela NBR 13858-2 (ABNT, 2009). Porém, quando comparadas com as telhas cerâmicas que possuem resistência a flexão entre 1000 N e 1300 N, as telhas com adição de EPS apresentaram resultados superiores que variam entre 1237.07 N a 1987.42 N, o que evidencia um produto com potencialidade para novos estudos a fim de viabilizar tecnicamente sua produção.

E por fim, Lima et al (2013) que avaliaram a utilização de lama abrasiva gerada no beneficiamento de mármore e granito para confecção de telhas de concreto. Neste estudo, as telhas foram confeccionadas com 10% e 20% de incorporação de lama abrasiva em substituição à areia fina. Após a confecção das telhas, essas passaram por testes de absorção de água, permeabilidade e ruptura à flexão. A partir dos resultados obtidos pode-se concluir que o efeito resultante da incorporação da lama na massa para confecção das telhas de concreto foi favorável, atendendo aos limites estabelecidos pela norma.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 5.1 Conclusões

Esta pesquisa teve como objetivo geral avaliar e fornecer subsídios técnicos quanto ao uso do resíduo da bauxita na fabricação de telhas de concreto utilizando o resíduo *in natura* como substituto parcial da areia. De acordo com os resultados analisados, pode-se concluir que as telhas de concreto produzidas com 30% de substituição da areia pelo resíduo da bauxita obtiveram resultados tecnicamente satisfatórios quanto à resistência à tração por flexão, permeabilidade, absorção e peso seco, sugerindo seu uso como material de construção civil.

A análise da substituição do resíduo da bauxita pela areia nos teores de 15%, 30%, 45% e 60% em corpos de prova argamassados resultou em valores de resistência à compressão menores em relação à argamassa de referência. Porém, é válido salientar que amostra contendo 30% de RB apresentou resultados considerados satisfatórios, uma vez que a redução na resistência em relação a Aref não foi exorbitante e foi a que mais se aproximou da argamassa de referência.

Em relação à absorção de água total, as argamassas produzidas com RB apresentaram variações significativas quando comparadas à argamassa de referência. As amostras de 15% e 30% foram as que menos absorveram água, apresentando resultados muito próximos. Já as amostras de 45% e 60% foram as que mais absorveram água, mostrando que há uma tendência de aumento da absorção com o aumento do teor de RB.

Para o índice de vazios, em relação à argamassa de referência, as amostras também apresentaram variações significativas. Houve um crescimento considerável na porcentagem para as amostras de 15% e 30%, como também para as amostras de 45% e 60%, que apresentaram os maiores valores entre as amostras. Já a massa específica seguiu uma relação inversamente proporcional com o índice de vazios, o que era de se esperar. Dessa forma a medida que o índice de vazios aumentava, a massa específica diminuía.

No que tange a microscopia das amostras argamassadas, por meio da análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV) associada ao EDS, foi possível analisar a microestrutura das argamassas. A argamassa de referência apresentou-se mais compacta e aparentemente com uma quantidade menor de poros, já para as demais amostras, foi possível observar uma grande quantidade de poros e vazios capilares.

No que se refere às análises químicas, as amostras apresentaram elementos como ferro, cálcio, silício, alumínio, entre outros. Entre os compostos presentes, os mais expressivos foram os óxidos de alumínio, de silício e de ferro, apresentando também o óxido de cálcio. O que já era esperado, uma vez que todos esses elementos se fazem presentes na composição do resíduo da bauxita. Dessa forma, a medida que a porcentagem do RB aumentava, teores de óxidos de alumínio e ferro também aumentavam.

Os elementos encontrados pelos ensaios de EDS e FRX confirmam alguns dos minerais presentes nas argamassas. Pelo ensaio de difração de raio x foi possível identificar a presença da gibsita (Gb), quartzo (Q), calcita (C), hematita (H) e sodalita (S). É interessante analisar a presença do quartzo, da sodalita e calcita que têm influência direta na resistência à compressão do material. Não houve formação de novas fases cristalinas. Já no que tange a lixiviação, todas as argamassas foram classificadas como resíduos sólidos não perigosos.

Em relação à resistência à tração por flexão dos corpos de prova prismáticos, a amostra A30RB obteve o melhor resultado, chegando a um valor de 3,11 MPa. E ainda, apresentou um aumento de 31,22 % em relação a amostra de referência.

É interessante ressaltar o comportamento da amostra A30RB. Dentre as amostras com percentuais de substituição estudadas, ela foi a que obteve os melhores resultados físicos e mecânicos. Provavelmente este resultado se deu porque este percentual foi ideal para uma mistura bem homogênea, com boa compactação e ótima hidratação das partículas da mistura, resultando assim em resultados satisfatórios.

Apesar dos resultados encontrados para as amostras com RB serem um pouco inferiores à argamassa de referência, no que diz respeito à fabricação das telhas com porcentagem de substituição de 30% do resíduo da bauxita pela areia, todos os requisitos físicos técnicos estudados (peso seco, absorção, impermeabilidade e carga de ruptura à flexão) apresentaram resultados satisfatórios frente aos limites exigidos pela norma NBR 13858-2 (ABNT, 2009).

Conclui-se que o resíduo da bauxita, em função das análises realizadas, indicou o seu uso como proposta viável na forma de substituição do agregado miúdo *in natura* para a fabricação de telhas de concreto. Viabilizando assim uma alternativa exequível para a sua retirada dos locais de deposição, pois, apesar do descarte ser feito em local seguro, o volume do resíduo cresce vertiginosamente. Além de que, com a substituição pela areia, há uma maior probabilidade de redução dos impactos ambientais relacionados à atividade de exploração das jazidas de areias.

## 5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Levando em consideração que a quantidade de resíduo de bauxita produzido é enorme, é interessante dar continuidade nos estudos, principalmente quando o objetivo principal é o aproveitamento desse resíduo como material de construção civil. A seguir apresentam-se algumas sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros:

- Realizar a substituição do resíduo da bauxita pela areia para outros fins, como por exemplo, meios fios, blocos de concreto, bloquetes;
- Estudar o aproveitamento do resíduo da bauxita como substituto da areia em outras dosagens e analisar as propriedades no estado fresco;
- Realizar o referido estudo com o resíduo da bauxita calcinado;
- Adotar outros dias de cura para análise das propriedades mecânicas das argamassas, como: 30, 60 e 90 dias. Assim como outros dias de cura para analisar as propriedades das telhas: 50, 100 e 150 dias.
- Analisar o a substituição do resíduo da bauxita como substituição total da areia em argamassa;
- Estudar o aproveitamento do resíduo da bauxita como agregado miúdo na confecção de concretos e analisar suas propriedades no estado fresco (índice de consistência, densidade de massa), bem como, analisar as propriedades mecânicas e de durabilidade deste concreto;

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004. **Resíduos sólidos - classificação**. Rio de Janeiro, 2004.
- ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10007. **Amostragem de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro, 2004.
- ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10005. **Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro, 2004.
- ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11579. **Cimento Portland - determinação do índice de finura por meio da peneira 75  $\mu\text{m}$  (nº200)**. Rio de Janeiro, 2013.
- ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12142. **Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de provas prismáticos**. Rio de Janeiro, 2010.
- ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13858-2. **Telhas de concreto - Parte 2: Requisitos e métodos de ensaio**. Rio de Janeiro, 2009.
- ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16605. **Cimento Portland e outros materiais em pó – determinação da massa específica**. Rio de Janeiro, 2017.
- ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5736. **Cimento Portland pozolânico**. Rio de Janeiro, 2018.
- ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211. **Agregados para concreto - Especificação**. Rio de Janeiro, 2019.
- ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215. **Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2019.
- ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9776. **Agregados – Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman**. Rio de Janeiro, 1987.
- ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9778. **Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**. Rio de Janeiro, 2009.
- ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 248. **Agregados - Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 2003.
- ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 45. **Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios**. Rio de Janeiro, 2006.
- ANTUNES, E.G.P.; VILPERT, G.C. **Telha de concreto: adição de fibra derivada de bagaço de cana-de-açúcar**. Artigo de Conclusão de Curso (Engenharia Civil). Universidade do Extremo Sul Catarinense. Santa Catarina, 2015.

Associação Brasileira de Alumínio - ABAL. Relatório Bauxita. **Bauxita no Brasil: mineração responsável e competitividade.** 2017. Disponível em: <[http://www.abal.org.br/downloads/ABAL\\_Relatorio\\_Bauxita\\_2017\\_1.pdf](http://www.abal.org.br/downloads/ABAL_Relatorio_Bauxita_2017_1.pdf)>. Acesso em: 06 setembro de 2020.

BABISK, M.P. **Incorporação de resíduo de bauxita em cerâmica vermelha.** 2015, 216 f. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Estadual do Norte Fluminense. Campos dos Goytacazes, 2009.

BBC NEWS. **Como a exploração sem limites de areia põe em risco grão que transformou a civilização.** 2018. Disponível em: <<https://www.bbc.com/portuguese/internacional-45555528>>. Acesso em: dezembro de 2020.

BRANDÃO, L.F.; ALVES, C.E.; OLIVEIRA, J.F.; MACEDO, O.A.P.; DAMASCENO, F.A. **Propriedades físicas, mecânicas e térmicas de telhas de concreto fabricadas com adição de diferentes materiais isolantes.** REVENG, v.23, n 15, p. 406-417, 2015. Viçosa.

CAMARGO, O.A., MONIZ, A.C., JORGE, J.A., VALADARES, J.M.A.S. 2009. **Métodos de Análise Química, Mineralógica e Física de Solos do Instituto Agrônomo de Campinas.** Instituto Agrônomo. Campinas.

CARASEK, H.; ARAÚJO, R.C.; CASCUDO, O.; ANGELIM, R. **Parâmetros da areia que influenciam a consistência e a densidade de massa das argamassas de revestimento.** Matéria, v.21, n.3, p.714-732, 2016.

CARDOSO, J. G. R.; CARVALHO, P. S. L.; FONSECA, P. S. M.; SILVA, M. M.; ROCIO, M. A. R. **A indústria do alumínio: estrutura e tendências.** Insumos Básicos. BNDES Setorial 33, p. 43-88, 2012.

CASTALDI, P., SILVETTI, M., SANTONE, L., ENZO, S., MELIS, P., “**XRD, FTIR, and thermal analysis of bauxite ore-processing waste**”, Clays and Clay Mineral, v. 56, n 4, pp. 461-469, 2008.

CHAGAS, G.M.; RESENDE, E.C.; GUERREIRO, M. C. **Preparo de Material a partir de Resíduo de bauxita Impregnada com Fe (III) e Aplicação em Processos Oxidativos Avançados.** Revista Virtual de Química, v. 10, p. 37-49, 2018.

CHANDRA, S. **Waste materials used in concrete manufacturing.** Disponível em: <<http://books.google.com.br/books?id=b63emZxZJ9EC&printsec=frontcover#v=onepage&q=&f>>. Acesso em: 15 de novembro de 2020.

CONSTANTINO, V. R. L.; ARAKI, K.; SILVA, D. O.; OLIVEIRA, W. **Preparação de compostos de alumínio a partir da bauxita: considerações sobre alguns aspectos envolvidos em um experimento didático.** Revista Química Nova, São Paulo, vol.25, n.3, p.490-498, mai. 2002. Disponível em: <[https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-40422002000300024](https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422002000300024)> Acesso em: 07 outubro de 2020.

CYR, M.; LAWRENCE, P.; RINGOT, E. **Efficiency of mineral admixtures in mortars: Quantification of the physical and chemical effects of fine admixtures in relation with compressive strength.** Cement and Concrete Research 36, p.264 – 277, 2006.

DEGEN, M.K.; CARDOSO, T.C.; COSTA, R. P.; MASUERO, A.B.; MOLIN, D.C.C.D. **Estudo da lama vermelha como filer em matrizes cimentíceas**. 2019. 6º Encontro Nacional sobre aproveitamento de resíduos na construção civil. Belém, PA.

**Especial mineração da bauxita: como é feita a extração e qual a importância da atividade para o Brasil**. Revista Alumínio. 2019. Disponível em: <<https://revistaaluminio.com.br/especial-mineracao-de-bauxita-como-e-feita-a-extracao-e-qual-a-importancia-da-atividade-para-o-brasil/>>. Acesso em 15 de outubro de 2020.

FERNANDES, D.G. **Desenvolvimento de telha de concreto eco-suficiente utilizando resíduo de mármore do tear de fio diamantado**. 2017. 85 f. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos materiais). Universidade do Morte Fluminense, Campos do Goytacazes, 2017.

GANESH PRABHU, G.; HYUN, J.H.; KIM, Y.Y. **Effects of foundry sand as a fine aggregate in concrete production**. Construction and Building Materials 70, p. 514-521, 2014.

GARCIA, M.C.S. **Modificação do resíduo da bauxita gerado no processo bayer por tratamento térmico**. Dissertação de mestrado (Engenharia de Materiais). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, SP. 2012.

Google Maps. Disponível em: < <https://www.google.com/maps/place/Porto+Alumar/@-2.7206138,44.309907,3833m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0x7f6802aa7d6291b0:0x55b465e8eb605a3e!8m2!3d-2.6797165!4d-44.3623787?hl=pt-BR>> Acesso em: 15 de novembro de 2021.

HABASHI, F. **A short history of hydrometallurgy**. Hydrometallurgy, Canada, vol.79, p. 15-22, julho.2005. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304386X05001623>> Acesso em: 10 de novembro de 2020.

HAN, S. W.; KIM, D. K.; HWANG, G. ; BAE, J. H. **Development of pellet-type adsorbents for removal of heavy metal ions from aqueous solutions using red mud**. J. Ind. Eng. Chem., v. 8, pp. 120-125, 2002.

HILDELBRANDO, E. A.; SOUZA, J.A.S.; NEVES, R. F. **Aplicação do rejeito do processo bayer (resíduo de bauxita) como matéria-prima na indústria de cerâmica estrutural**. Congresso brasileiro de cerâmica. Florianópolis, 2006.

HOPPEN, C., PORTELLA, K.F. Joukoski, A., BARON, O., FRANCK, R., SALES, A. Andreoli, C.V., PAULON, V.A. **Co-disposição de lodo centrifugado de Estação de Tratamento de Água (ETA) em matriz de concreto: método alternativo de preservação ambiental**. Cerâmica 51, p. 85-95, 2005.

HUANG, W.; WANG, S.; ZHU, Z.; LI, L.; YAO, X.; RUDOLPH, V.; HAGHSERESHT, F. **Phosphate removal from wastewater using red mud**. Journal of Hazardous Materials, v.158, pp.35-42, 2008.

HYDRO. **Bauxita e Alumina**. 2012. Disponível em: < <https://www.hydro.com/pt-BR/produtos-e-servicos/bauxita-e-alumina/alumina/>>. Acesso em: 09 setembro de 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE CONCRETO - IBRACON (2009). Disponível em: < <http://www.site.ibracon.org.br/>>. Acesso em: dez., 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE CONCRETO - IBRACON (2009). Disponível em: < <http://www.site.ibracon.org.br/>>. Acesso em: janeiro de 2020.

INTITUTO TECNOLÓGICO EM ENSAIO E SEGURANÇA FUNCIONAL. 2018. Disponível em: <<http://unisinus.br/itt/ittfuse/equipamentos/microscopio-eletronico-de-varredura-mev>>. Acesso em: dezembro de 2020.

ISAIA, G. C. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. v. 1, cap. 1, 2007.

JESUS, C.P.C. **Caracterização da residuo de bauxita e sua aplicabilidade na adsorção do corante têxtil reativo azul 19**. Dissertação de mestrado (Engenharia Civil). Universidade Estadual Paulista. Bauru, SP. 2011.

KOMNITSAS, K., BARTZAS, G., PASPALIARIS, I., “**Efficiency of limestone and red mud barriers: laboratory column studies**”, Minerals engineering, n. 17, pp. 183-194, 2004.

LABORATÓRIO DE CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA. 2020. Disponível em: < <http://www.lct.poli.usp.br/infraestrutura>>. Acesso em: dezembro de 2021.

LAWRENCE, P.; CYR, M.; RINGOT, E. Mineral admixtues in mortars effect of type, amount and fineness of fine constituents on compressive strenght. Cement and Concrete Research 35, p. 1092-1105, 2005.

LEONARDOU, S. A. et al. **Titanium leaching from red mud by diluted sulfuric acid at atmospheric pressure**. Journal of Hazardous Materials, Grece, v. 157, p. 579-586, 2008. Disponível em: < <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S030438940800068X>> Acesso em: 10 de novembro de 2020.

LI, L. Y. **A study of iron mineral transformation to reduce red mud tailings**. Waste Management, Canadá, v. 21, pp. 525-534, 2001. Disponível em: < <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/11478619/>> Acesso em: 10 de novembro de 2020.

LIMA, M.R.P.; COSTA, V.S.da; BARVOSA, J.F. **Avaliação da utilização da resíduo de bauxita abrasiva gerada no beneficiamento de mármore e granito para a confecção de telhas de concreto**. Revista Eletrônica de Materiais e Processos. Vitória, ES, v.8, n 01, p. 30-35, 2013.

LUZ, A. B.(Ed.); LINS, F. A. F.(Ed). **Rochas & minerais Industriais: usos e especificações**. 2.Ed. Rio de Janeiro: CETEM (CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL), 2008. 990p. Disponível em: < <http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/522>>. Acesso em: 06 setembro de 2020.

MACEDO, A.N; COSTA, D.H.P.; TRINDADE, S.R.S.; SOUZA, J.A.S.; CARNEIRO, R.J.F.M. **Comportamento de blocos cerâmicos estruturais a partir da mistura de resíduo de bauxita e argila**. Ambiente construído, v.11, p. 25-36, 2008. Porto Alegre.

MANFROI, E. P.; CHERIAF, M.; ROCHA, J. C. **Avaliação da lama vermelha como material pozolânico em substituição ao cimento para produção de argamassas**. 19º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais – CBECiMat. Campos do Jordão, São Paulo 2010.

MANFROI, E.P. **Avaliação do resíduo de bauxita como material pozolânico em substituição ao cimento para a produção de argamassa**. 2009, 152 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2009.

MAULEN, I.; MARINHO, C.; ETEROVIC, R. **Sustentabilidade – Cidades e comunidades sustentáveis**. Artigo. Programa de Pós-Graduação em Administração e Economia. Pontifícia Universidade Católica de São Paulo. São Paulo, 2019.

MELO, Valéria Alves Rodrigues de. **Utilização do resíduo gerado na exploração do itabirito em substituição ao agregado miúdo natural para preparação de argamassa de cimento Portland**. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais. Universidade Estadual de Minas Geras. Belo Horizonte, 2012.

MERCURY, J.M.R.; GALDINO, L.G.; VASCONCELOS, N.S.L.S.; PAIVA, A.E.M.; CABRAL, A.A.; ANGÉLICA, R.S. **Estudo do comportamento térmico e propriedades físico-mecânicas do resíduo de bauxita**. Revista Matéria, v.15, n 3, p. 445-460, 2010.

MESQUITA, J.L. **Mineração de areia: a maior e mais perigosa indústria**. 2019. Disponível em: < <https://marsemfim.com.br/mineracao-de-areia-destrutiva-industria/> >. Acesso em: dezembro de 2020.

NAVARRO, G.R.B.; CONCEIÇÃO, F.T.; ANTUNES, M.L.P. **Caracterização da Resíduo de bauxita Brasileira (Resíduo do Refino da Bauxita) e Avaliação de suas Propriedades para Futuras Aplicações**. International Workshop advances in cleaner production. 2011.

NOGUEIRA, G.R.F. **A extração de areia em cursos d'água e seus impactos: proposição de uma matriz de interação**. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Ambiental e Sanitária). Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora, 2016.

ONU NEWS. 2018. Disponível em: <<https://news.un.org/pt/story/2019/05/1671251>>. Acesso em: dezembro de 2020.

ONU NEWS. **PNUMA. Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente**. 2019. Disponível em: <<https://news.un.org/pt/story/2019/05/1671251>>. Acesso em 10 de dezembro de 2020>.

PEDROSO, F. L. **Concreto: material construtivo mais consumido no mundo**. Revista Concreto & Construções. 37. ed. São Paulo, 2009 Disponível em: < [http://ibracon.org.br/publicacoes/revistas\\_ibracon/rev\\_construcao/pdf/revista\\_concreto\\_53.pdf](http://ibracon.org.br/publicacoes/revistas_ibracon/rev_construcao/pdf/revista_concreto_53.pdf) > Acesso em: nov., 2020.

PERFECTA, TELHA DE CONCRETO. Disponível em: <[http://www.perfectatelhas.com.br/especificacoes\\_tecnicas.html](http://www.perfectatelhas.com.br/especificacoes_tecnicas.html)>. Acesso em: dezembro de 2020.

PILAR, Ronaldo. Avaliação da Atividade Pozolânica da Cinza Moída em Pastas de Cimento Portland. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2012.

PINHEIRO, E.R.; FERNANDEZ, O.J.C.; COSTA, J.C.; VALENTE, E.M.; CARVALHO. 2017. **Variações granulométricas, mineralógicas e alcalinas em resíduos inertizados da Hydro Alunorte**. Holos, vol. 6, ano 33. Belém, Pará.

PINHEIRO, L. M. et al., **Fundamentos do concreto e projeto de edifícios**. Cap. 1. São Carlos, 2007. Disponível em: <[http://coral.ufsm.br/decc/ECC1006/Downloads/Apost\\_EESC\\_USP\\_Libanio.pdf](http://coral.ufsm.br/decc/ECC1006/Downloads/Apost_EESC_USP_Libanio.pdf)>. Acesso em: nov, 2020.

POWER, G.; GRAFE, M.; KLAUBER, C. **Bauxite residues issues: Current management, Disposal and Storage practices**. Hydrometallurgy, v. 108, p. 33-45, 2011.

QUARESMA, L.F.. **Desenvolvimento de estudo para elaboração do plano duodecenal de geologia, mineração e transformação mineral**. Setembro de 2009. Disponível em: <[http://www.jmendo.com.br/wpcontent/uploads/2011/08/P11\\_RT22\\_Perfil\\_da\\_Mineração\\_de\\_Bauxita.pdf](http://www.jmendo.com.br/wpcontent/uploads/2011/08/P11_RT22_Perfil_da_Mineração_de_Bauxita.pdf)>. Acesso em: 06 setembro de 2020.

RENFORTH, P.; MAYES, W. M.; JARVIS, A.P.; MANNING D.A; Burke, I.T, GRUIZ K. **Contaminant mobility and carbono sequestration downstream of the Ajka (Hungary) red mud spill: The effects of gypsum dosing**. *Science of the Total Environment*. v.1, p.421–422, 2012.

RIBEIRO, D. V.; SILVA, A. M. S.; LABRINCHA, J. A.; MORELLI, M. R. **Estudo das reações álcalis-sílicas associadas ao uso da residuo de bauxita em argamassas colantes e de revestimento**. Revista Cerâmica, São Paulo, vol.58, n.345, p.90-98, mar. 2012. Disponível em: <[https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0366-69132012000100015](https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0366-69132012000100015)> Acesso em: 07 novembro de 2020.

RMP. Red Mud Project. Disponível em: <<https://redmud.org/red-mud/disposal/>> Acesso em: 15 de novembro de 2020.

ROSÁRIO, Kátia Alrelhia do. **Concreto com utilização de agregado graúdo sintético produzido a partir da residuo de bauxita: estudos de dosagens, propriedade e microestrutura**. 2013, 113 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universiddae Federal do Pará. Belém, 2013.

SANTOS, D. H. dos; DALMEIDA, A. P.; FIGUEIREDO, W. B.; VALENTE, A. L.; SOUZA, J. A. S.; **Utilização do rejeito do processo Bayer como matéria-prima na produção de agregados leves**. Anais do XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química - COBEQ 2014 [Blucher Chemical Engineering Proceedings, v.1, n.2, p. 13336-13343]. São Paulo, 2015.

SANTOS, M.M.A. **Remediação de águas subterrâneas contaminadas com cromo (vi) por meio de uso de turfas e lama vermelha**. Dissertação. Programa de Pós-Graduação do Instituto de Ciências Ambientais, Químicas e Farmacêuticas. Universidade Federal de São Paulo. São Paulo, 2012.

SANTOS, W.M.T.; ARAUJO, G.T.; DOUSA, J.K.C. **Avaliação química da residuo de bauxita da indústria de alumínio para a fabricação de bloquetes intertravados**. 57º Congresso brasileiro de química. 2017.

SAVASTANO JUNIOR, H.; PIMENTEL, L.L. **Viabilidade do aproveitamento de resíduos de fibra vegetal para fins de obtenção de material de construção**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. Campina Grande, PB, v.4, n.1, p.103-110, 2000.

SCHNEIDER, K.W.S.; MULLER, H.M.B. **Análise de viabilidade técnica da utilização de telhas de concreto leve com adição de EPS como agregado miúdo em Sinop – MT**. Construindo. Belo Horizonte, v.10, n 02, p. 76-103, 2018.

SEBRAE. Resíduos sólidos. Disponível em: <<https://www.sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/artigos/o-que-sao-residuos-e-o-que-fazer-com-eles,ca5a438af1c92410VgnVCM100000b272010aRCRD>> Acesso em: dezembro de 2020.

SHINOMIYA, L.D. **Planejamento de cenários para uso de resíduos industriais: aplicação para residuo de bauxita**. 2015, 196 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos (São Paulo), 2015.

SILVA FILHO, E. B.; ALVES, M. C.; DA MOTTA, M. **Resíduo de bauxita da Indústria de Beneficiamento de Alumina: produção, características, disposição e aplicações alternativas**. Revista Matéria, v. 12, n. 2, p. 322-338, 2007.

SOUZA, J.A.S. **Utilização de residuo do processo Bayer como matéria prima na produção de agregado**. 2010. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Doutorado em Recursos Naturais da Amazônia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2010.

TAVARES, Célia Regina Granhen et al. **Caracterização de blocos cerâmicos acústicos produzidos com incorporação de lodo de lavanderia têxtil**. 2015. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/esa/a/t43w8MHC6mQnqtNrXmtNPGs/?lang=pt>> Acesso em: 04 de janeiro de 2022.

TORANZO, B. **Reformas e construções**. Disponível em: <<https://emono.com.br/vantagens-desvantagens-telha-de-concreto/>>. Acesso em: dezembro de 2020.

USGS. United States Geological Survey. **Bauxite and Alumina**. Disponível em: <<https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2020/mcs2020-bauxite-alumina.pdf>> Acesso em: 10 set 2020.

VALCARENGHI, C.; PIOVESAN, A.Z. **Análise das propriedades físicas e mecânicas nas telhas de concreto fabricadas na cidade de Herval d'Oeste**. Unoesc & Ciência - ACET, v.2, n 1, p. 19-30, 2011. Joaçaba.

VILLAR, L. F. S. **Estudo do adensamento de resíduos de mineração e processamento de bauxita**. 2002. Tese. (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

Votorantim cimentos. 2018. Disponível em: <<https://www.mapadaobra.com.br/capacidade/telha-ceramica-concreto/1>>. Acesso em: dezembro de 2020.

WANG, S. **Novel applications of red mud as coagulant, adsorbent and catalyst for environmentally benign processes**. Chemosphere, Australia, vol.72, p. 1621-1635, maio.2008. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653508006292>> Acesso em: 10 de novembro de 2020.

YANG, J; XIAO; B. **Development of unsintered construction materials red mud wastes produced in the sintering alumina process**. Construction and Building Materials, China, vol.22, p. 2299-2307, 2008. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061807002425>> Acesso em: 10 de novembro de 2020.

ZIEGEL. **História da telha de concreto**. Disponível em: <<https://ziegel.com.br/historia-da-telha-de-concreto/>>. Acesso em: dezembro de 2020.