



Marcella Camilly Dias Ribeiro

### **AGREGADO SINTÉTICO DE RESÍDUO DE BAUXITA PARA PRODUÇÃO DE CONCRETO**

### **DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

Instituto de Tecnologia  
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil

Dissertação Orientada pelo Professor Dr. Marcelo de Souza Picanço

Belém – Pará – Brasil

2022

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



**Marcella Camilly Dias Ribeiro**

## **Agregado sintético de resíduo de Bauxita para produção de concreto.**

### **Dissertação de Mestrado**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço

Belém  
Agosto de 2022

## CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Marcella Camilly Dias Ribeiro.

TÍTULO: Agregado sintético de resíduo de bauxita para produção de concreto.

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.

## **Marcella Camilly Dias Ribeiro.**

Av. Augusto Correa, n. 1  
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)

D541a Dias Ribeiro, Marcella Camilly.

Agregado Sintético de Resíduo de bauxita para concreto /  
Marcella Camilly Dias Ribeiro. — 2022.  
104 f. : il. color.

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

# 1. Agregado Sintético. 2. Concreto Estruturais. 3. Propriedades Mecânicas. 4. Caracterização. 5. Substituição. I. Título

CDD 624.18342

## AGREGADO SINTÉTICO DE RESÍDUO DE BAUXITA PARA PRODUÇÃO DE CONCRETO

AUTORA:

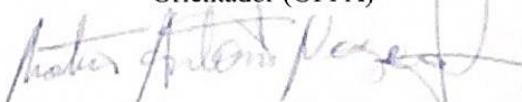
**MARCELLA CAMILLY DIAS RIBEIRO**

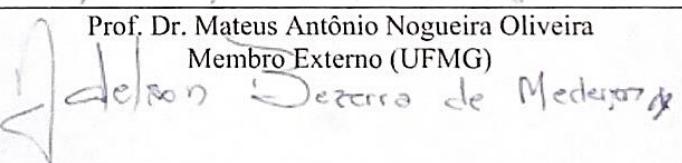
DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL DO INSTITUTO DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ, COMO REQUISITO PARA OBTEÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL NA ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL.

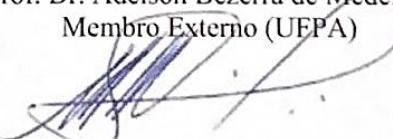
APROVADO EM: 04 / 08 / 2022.

BANCA EXAMINADORA:

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

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

  
Prof. Dr. Adelson Bezerra de Medeiros  
Membro Externo (UFPA)

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

  
Prof. Dra. Luciana de Nazaré Pinheiro Cordeiro  
Membro Interno (UFPA)

Visto:

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



**Marcella Camilly Dias Ribeiro**

**Agregado sintético de resíduo de Bauxita para produção de concreto.**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre.

**Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço**  
Orientador  
PPGEC – PROPESP – UFPA

**Prof. Dr. Alcebíades Negrão Macêdo**  
Examinador Interno  
PPGEC – UFPA

**Prof.ª. Dra. Luciana de Nazaré Pinheiro Cordeiro**  
Examinadora Interna  
PPGEC – UFPA

**Prof. Dr. Mateus Antônio Nogueira Oliveira**  
Examinador Externo  
Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG

**Prof. Dr. Adelson Bezerra de Medeiros**  
Examinador Externo  
PPGEC - UFPA

**Ms. Marcelo Montini**  
Examinador Externo  
Universidade Federal de São Carlos - UFSCar

Belém, 04 de agosto de 2022.

Esta dissertação é dedicada à minha filha Isis  
Por todo amor incondicional que recebo.

## Agradecimentos

A Deus, que me designou para realização deste sonho, sempre me direcionando e dando seus sinais de que este era o caminho pelo qual eu deveria percorrer, mesmo nas situações mais difíceis, quando pensei que não fosse capaz ele sempre me mostrou do contrário.

A todos os professores, técnicos e funcionários do LEC e PPGEC da UFPA, que me edificaram, fornecendo conhecimentos que nortearam este trabalho. Ao meu orientador, professor Marcelo Picanço, pela confiança, atenção, por conduzir todo conhecimento e experiência, pelas palavras de incentivo nesta trajetória. Ao meu tutor professor Marcelo Farias, por toda paciência, dedicação, que não mensurou esforços na disposição e em transmitir os conhecimentos primordiais à pesquisa.

Aos laboratórios parceiros, nos quais foram realizados os ensaios: Central de Extração da Faculdade de Química, Usina de Materiais da Faculdade de Engenharia Química da UFPA e todos os profissionais envolvidos do Laboratório de Engenharia Química (LEQ).

A diretoria da HYDRO ALUNORTE, através do convênio de cooperação técnica e científica entre a HYDRO e a UFPA que colaboraram no fornecimento dos resíduos que foram a matéria-prima deste estudo.

A minha família, todas minhas conquistas e que sempre estão ao meu lado me apoiando. Minha mãe Joseana por ser o pilar da nossa família, ao meu tio Deyvid pelo incentivo no caminho das pedras e aos meus irmãos Joyce e Marcelo por todo apoio, que sempre foram fundamentais.

Aos meus queridos amigos que encontrei ao longo desta pesquisa, os quais me ajudaram sempre que precisei principalmente nos momentos mais difíceis: Renan Castro, Luciano Farias, Vinícius Machado, Robson Fernandes e Adriana Garcia vocês foram imprescindíveis. Todos os colegas que cursaram as disciplinas e dividiram comigo grupos de estudos e apresentações. Aos amigos da faculdade e da vida, que estiveram presentes e me apoiando. A todos que direta ou indiretamente estiveram envolvidos neste trabalho.

Meus sinceros agradecimentos.

*“Saber não é suficiente; devemos aplicar.  
Estar disposto não é suficiente; devemos fazer.”*  
*(Leonardo da Vinci)*

## Resumo

RIBEIRO, M. C. D. **Agregado sintético de resíduo de Bauxita para produção de concreto.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Pará. Belém, 2022.

O crescimento no mercado do alumínio acarreta consigo grandes volumes de resíduos, impulsionando a realização de estudos que viabilizem o aproveitamento destes rejeitos em diversas áreas distintas. A não destinação adequada de resíduos, a escassez de jazidas e a maior demanda de recursos naturais tornaram-se um obstáculo para a sociedade. Estudos para a reutilização dando as aplicabilidades do aproveitamento destes resíduos interesse global do setor de alumínio em buscar uma utilização do resíduo de bauxita e os benefícios ambientais ligados a substituição do seixo e brita e uma provável descoberta de novos materiais a serem utilizados na construção civil vêm se intensificando. Neste contexto, esta pesquisa é um projeto de estudo viabilizado pela empresa HYDRO ALUNORTE em parceria Laboratório de Engenharia Civil (LEC) juntamente com o Laboratório de Engenharia Química (LEQ) da Universidade Federal do Pará dentro do convênio de cooperação técnica e científica entre Hydro e UFPA. O objetivo dela é apresentar uma proposta alternativa de utilização do agregado sintético de resíduo de bauxita em concretos estruturais, de modo a caracterizar a possibilidade da utilização dos agregados sintéticos de resíduo de bauxita na construção civil visto o elevado consumo de recursos naturais e um potencial para o reaproveitamento destes como subprodutos para produção novos materiais. A primeira investigação estudou suas características físicas dos agregados sintéticos, os ensaios seguiram como parâmetros as normas utilizadas para caracterização dos agregados graúdos como: composição granulométrica, índice de forma, absorção de água, perda ao choque e abrasão Los Angeles, comparando com os resultados dos mesmos ensaios do agregado graúdo natural, nesta pesquisa se utilizou o seixo rolado. A segunda investigação persistiu na substituição de 100% do agregado graúdo natural pelo agregado graúdo sintético na confecção de concretos estruturais, para isto foi necessário o estudo de dosagem de concretos, utilizando o método IPT/EUSP que consiste em vários acréscimos no teor de argamassa até encontrar o teor ideal como parâmetro o Slump Test. Ao se encontrar o teor de argamassa ideal, definiu-se os traços normais, pobres e ricos para montagem dos diagramas de dosagens, através destes foi possível se obter os traços definitivos dos concretos, tanto o referência quanto o dos agregados sintéticos de resíduo de bauxita, com o intuito de se atingir a resistência de 25 MPa aos 28 dias, posteriormente a realização dos ensaios mecânicos e suas respectivas resistências que são: resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade. Na resistência à compressão dos concretos com ASRB's produziu um acréscimo de resistência de 11,63% em relação ao concreto de referência, além de resistir 19,92% acima de perda a abrasão que o agregado convencional. Ainda que o aproveitamento do resíduo ocorra em pequena escala, a sua utilização é viável, principalmente como matéria-prima na produção de agregados sintéticos, uma vez que sua incorporação diminuirá o consumo da matéria-prima requerida para a produção de concretos, resultando uma solução alternativa e sustentável para os setores do alumínio e da construção civil.

### Palavras-chave:

Agregado Sintético; Caracterização; Substituição; Propriedades Mecânicas; Concreto.

## Abstract

The growth in the aluminum market brings with it large volumes of waste, prompting the realization of studies that make possible the use of these tailings in several different areas. The non-appropriate destination of waste, the scarcity of deposits and the greater demand for natural resources have become an obstacle for society. Studies for reuse giving the applicability of the use of these residues global interest of the aluminum sector in seeking a use of bauxite residue and the environmental benefits linked to the replacement of pebble and gravel and a probable discovery of new materials to be used in civil construction come intensifying. In this context, this research is a study project made possible by the company HYDRO ALUNORTE in partnership with the Civil Engineering Laboratory (LEC) together with the Chemical Engineering Laboratory (LEQ) of the Federal University of Pará within the technical and scientific cooperation agreement between Hydro and UFPA. Its objective is to present an alternative proposal for the use of synthetic aggregate of bauxite residue in structural concrete, in order to characterize the possibility of using synthetic aggregates of bauxite residue in civil construction, given the high consumption of natural resources and a potential for the reuse of these as by-products for the production of new materials. The first investigation studied the physical characteristics of synthetic aggregates, the tests followed as parameters the norms used for the characterization of coarse aggregates such as: granulometric composition, shape index, water absorption, loss to shock and abrasion Los Angeles, comparing with the results of the same tests of the natural coarse aggregate, in this research the rolled pebble was used. The second investigation persisted in replacing 100% of the natural coarse aggregate by the synthetic coarse aggregate in the manufacture of structural concrete, for this it was necessary to study the concrete dosage, using the IPT/EUSP method, which consists of several increases in the mortar content until find the ideal content as a parameter for the Slump Test. When finding the ideal mortar content, the normal, poor and rich traces were defined for the assembly of the dosage diagrams, through these it was possible to obtain the definitive traces of the concrete, both the reference and the synthetic aggregates of bauxite residue. , in order to reach a strength of 25 MPa at 28 days, after performing the mechanical tests and their respective strengths, which are: compressive strength, tensile strength and modulus of elasticity. In the compressive strength of the concretes with ASRB's , it produced a strength increase of 11,63% in relation to the reference concrete, in addition to resisting 19,92% more loss to abrasion than the conventional aggregate. Although the use of the residue occurs on a small scale, its use is viable, mainly as a raw material in the production of synthetic aggregates, since its incorporation will reduce the consumption of the raw material required for the production of concrete, resulting in a solution alternative and sustainable for the aluminum and civil construction sectors.

## Keywords:

Synthetic aggregate; Characterizations; Substitution; Mechanical properties; Concrete.

## Sumário

Capítulo	Página
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
1.2 OBJETIVOS .....	20
1.2.1 Objetivo Geral .....	20
1.2.2 Objetivos Específicos .....	20
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA .....</b>	<b>21</b>
2.1 AGREGADOS SINTÉTICOS .....	21
2.1.2 Processo de Sinterização .....	25
2.1.3 Reações de Formação de Mulita.....	26
2.1.4 Fase Vítreia.....	27
2.2 AGREGADOS PARA CONCRETO .....	28
2.2.1 Porosidade e Permeabilidade.....	32
2.2.2 Resistência do Concreto .....	33
2.3 RESÍDUO DE BAUXITA .....	35
2.3.1 Localização minério e resíduo .....	36
2.3.2 Aplicações e estudos do Agregado Sintético de Resíduo de Bauxita .....	39
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>49</b>
3.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL .....	49
3.2 MATERIAIS UTILIZADOS.....	51
3.2.1 Cimento Portland.....	51
3.2.2 Água .....	52
3.2.3 Agregado Miúdo.....	52
3.2.4 Agregado Graúdo .....	53
3.2.5 Agregado Sintético Resíduo de Bauxita.....	55
3.3 MÉTODOS UTILIZADOS .....	56
<b>3.3.1 Caracterização Física .....</b>	<b>56</b>
<b>3.3.2.1 Granulometria .....</b>	<b>56</b>
<b>3.3.2.2 Índice de Forma .....</b>	<b>57</b>
<b>3.3.2.3 Densidade e absorção de água .....</b>	<b>58</b>
<b>3.3.2.4. Massa unitária e Indice de vazios.....</b>	<b>59</b>

<b>3.3.2.5 Abrasão Los Angeles .....</b>	<b>61</b>
<b>3.3.2.6 Perda ao Choque.....</b>	<b>62</b>
3.4 PRODUÇÃO DO CONCRETO.....	63
3.4.1 Metodologia de Dosagem.....	63
3.4.2 Diagrama de Dosagem.....	64
3.5. ENSAIOS MECÂNICOS DO CONCRETO .....	70
3.5.1 Resistência à compressão axial.....	70
3.5.2 Resistência à tração diametral .....	71
3.5.3 Módulo de Elasticidade .....	72
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>73</b>
4.1 GRANULOMETRIA E CARACTERIZAÇÃO .....	73
4.2 ÍNDICE DE FORMA .....	75
4.3 ABSORÇÃO DE ÁGUA.....	76
4.4 ABRASÃO LOS ANGELES.....	77
4.5 PERDA AO CHOQUE.....	78
4.6 CURVA DE DOSAGEM.....	79
4.7 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	84
4.8 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DIAMETRAL .....	85
4.9 MÓDULO DE ELASTICIDADE.....	87
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>89</b>
5.1 CONCLUSÕES .....	89
5.2 SUGESTÕES .....	91
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>93</b>

## Lista de Figuras

<b>Figura</b>	<b>Página</b>
Figura 2.1 – Agregado sintético de argila calcinada com diferentes dimensões.....	21
Figura 2.2 - Esquematização das etapas para formação do agregado. ....	22
Figura 2.3 – Agregado sintético de resíduo de bauxita. ....	23
Figura 2.4 - Esquema dos estágios clássicos da sinterização (a) corpo verde, com grãos aproximados pelo processo de conformação, (b) início da formação de pescoço e aproximação dos grãos, (c) redução do tamanho de poros e aumento da densificação. ....	26
Figura 2.5 – (a) Comprimento da partícula; (b) Largura da partícula maior que a abertura da malha; (c) Sequência de peneiras no ensaio de peneiramento. ....	29
Figura 2.6 – Classificação da forma da partícula segundo suas dimensões. ....	30
Figura 2.7 – Distribuição granulométrica e o volume de vazios. ....	30
Figura 2.8 – (a) Contínua, (b) descontínua e (c) uniforme. ....	31
Figura 2.9 – Forma das partículas e o índice de vazios. ....	32
Figura 2.10 – Bauxita: matéria-prima do alumínio. ....	36
Figura 2.11 - Vista de satélite da Alunorte e do rio Pará (1) área da refinaria, (2) depósito de RB 1, (3) depósito de RB 2, (4) descarte de água licenciado para Rio Pará e (5) estação de tratamento de efluentes industriais. ....	37
Figura 2.12 - Instalações de armazenamento de resíduos de bauxita dividido em baías, onde é depositado, cultivado e secado. ....	38
Figura 2.13 - Arranjo de filtro de prensa de resíduo simples e resíduo filtrado de prensa..	38
Figura 2.14 - Resíduos de empilhamento seco dos filtros de prensa. ....	39
Figura 2.15 – Ensaio de compressão axial simples. ....	40
Figura 2.16 – Aparência dos agregados após a queima. ....	41
Figura 2.17 – Índice da atividade pozolânica do resíduo de bauxita com cimento aos 28 dias. ....	42
Figura 2.18 – Resíduo de bauxita, areia, argila e carvão vegetal. ....	44
Figura 2.19 – Corpos de Prova com composições de 30% e 50% de RB. ....	44
Figura 2.20 – Ensaio de compressão uniaxial e após o rompimento. ....	45
Figura 2.21 – Agregado Sintético. ....	45
Figura 2.22 – DRX das amostras LV- 40, LV- 45, LV-50, LV- 60 após sinterização. ....	46
Figura 2.23 – (a) Formação de pelotas das misturas na betoneira; (b) Forno tipo mufla após queima do agregado. ....	46
Figura 2.24 - Agregados artificiais ativados por álcalis fabricados por resíduo de bauxita e cinzas volantes: desempenho e microestrutura. ....	47
Figura 2.25 – (a) Amostras de concreto de resíduo de bauxita, (b) amostras de concreto de controle. ....	48
Figura 2.26 - Comparação de resultados de ensaios de resistência à compressão. ....	48
Figura 3.1 –Fluxograma do desenvolvimento da pesquisa. ....	50
Figura 3.2 - Curva granulométrica do agregado miúdo e limites da NBR NM 7211. ....	53
Figura 3.3 – Seixo utilizado na pesquisa. ....	53
Figura 3.4 - Curva granulométrica do agregado graúdo e limites da NBR NM 7211.....	54
Figura 3.5 – Fluxograma do processo de produção do agregado sintético. ....	55
Figura 3.6 – (a) ASRB-70, (b) ASRB-80 e (c) ASRB-90. ....	56
Figura 3.7 – Peneirador eletromecânico. ....	57
Figura 3.8 – Distribuição granulométrica ASRB-90. ....	57
Figura 3.9 – Ensaio índice de forma dos ASRB's. ....	58

Figura 3.10 – Ensaio de absorção de água ASRB-90.....	59
Figura 3.11 – Ensaio de massa unitária ASRB-70. ....	60
Figura 3.12 – Tambor de Abrasão <i>Los Angeles</i> .....	61
Figura 3.13 – Antes do ensaio, após o desgaste à Abrasão do ASRB-90. ....	61
Figura 3.14 - Equipamento Treton. ....	62
Figura 3.15 – Preparação do ASRB-80 para o ensaio de perda ao choque. ....	63
Figura 3.16 – Materiais para dosagem. ....	65
Figura 3.17 – Abatimento troco de cone, <i>Slump Test</i> .....	65
Figura 3.18 – (a) Análise comparativa do traço com teor de argamassa preliminar e (b) final.....	66
Figura 3.19 – Moldes dos corpos-de-prova. ....	67
Figura 3.20 – Tanque de cura. ....	67
Figura 3.21 – Ensaio de compressão axial ASRB-80.....	70
Figura 3.22 – Ensaio de Tração ASRB-70. ....	71
Figura 3.23 – Ensaio de módulo de elasticidade ASRB-90 .....	72
Figura 4.1 – Curvas granulométricas ASRB's e zonas NBR 7211. ....	73
Figura 4.2 – Resultado desgaste abrasão dos agregados. ....	78
Figura 4.3 – Resultados de resistência à compressão para curva de dosagem. ....	81
Figura 4.4 – Curva de dosagem Referência.....	82
Figura 4.5 – Curva de dosagem ASRB-70. ....	82
Figura 4.6 – Curva de dosagem ASRB-80. ....	83
Figura 4.7 – Curva de dosagem ASRB-90. ....	83
Figura 4.8 - Exsudação de água <i>Slump Test</i> ASRB-90. ....	84
Figura 4.9 – Resultado das rupturas aos 7 e 28 dias dos corpos-de-prova. ....	85
Figura 4.10 – Corpos-de-provas ASRB-70 após ruptura. ....	86
Figura 4.11 – Resistência à compressão axial e resistência à tração por compressão diametral. ....	87
Figura 4.12 – Tensão x Deformação módulo de elasticidade.....	88

## Lista de Tabelas

<b>Tabela</b>	<b>Página</b>
Tabela 2.1 – Estudos desenvolvidos com agregados sintéticos e resíduo de bauxita.	40
Tabela 2.2 – Proporções dos componentes em cada mistura.	41
Tabela 2.3 – Composição percentual das matérias-primas.	43
Tabela 2.4 - Teor de material em cada amostra.	47
Tabela 3.1 – Resumo dos ensaios realizados, finalidade e referências normativas.	51
Tabela 3.2 – Caracterização cimento CP IV-32 RS.	52
Tabela 3.3 – Composição granulométrica agregado miúdo (Areia).	52
Tabela 3.4 – Distribuição granulométrica Seixo.	54
Tabela 3.5 – Composição, massa específica, temperatura e tempo de sinterização das amostras de agregado.	55
Tabela 3.6 - Traços normais em função do teor de argamassa.	66
Tabela 3.7 – Quantidade de corpos de prova em relação aos dias de cura.	68
Tabela 3.8 – Traços normais, ricos e pobres para montagem das curvas.	68
Tabela 3.9 – Traços unitários definidos para resistência de 25MPa aos 28 dias.	69
Tabela 4.1 – Composição granulométrica e caracterização do ASRB-70.	74
Tabela 4.2 – Composição granulometria e caracterização do ASRB-80.	74
Tabela 4.3 – Composição granulométrica e caracterização do ASRB-90.	75
Tabela 4.4 – Resultados Índice de forma dos agregados.	76
Tabela 4.5 – Resultados médios de absorção de água dos agregados.	77
Tabela 4.6 – Resultados do ensaio Abrasão “ <i>Los Angeles</i> ”.	77
Tabela 4.7 – Resultados de perda ao choque dos agregados.	78
Tabela 4.8 – Traços normais para curva de dosagem.	79
Tabela 4.9 – Traços ricos para curva de dosagem.	79
Tabela 4.10 – Traços pobres para a curva de dosagem.	80
Tabela 4.11 – Resultados resistência à compressão axial.	85
Tabela 4.12 – Resultados ensaio de resistência à tração diametral.	86
Tabela 4.13 – Correlações entre a resistência à tração e a resistência à compressão.	86
Tabela 4.14 – Resultados médios de módulo de elasticidade.	88

## Lista de Abreviaturas e Siglas

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<i>ABNT</i>	Associação Brasileira de Normas Técnicas
<i>a/c</i>	Relação água/cimento
<i>ABAL</i>	Associação Brasileira de Alumínio
<i>ALUNORTE</i>	Alumina do Norte do Brasil S.A.
<i>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	Óxido de Alumínio – Alumina
<i>ASRB</i>	Agregado Sintético de Resíduo de Bauxita
<i>CAA</i>	Concreto Auto Adensável
<i>Fck</i>	Resistência característica do concreto à compressão
<i>Fcj</i>	Resistência do concreto à compressão em j dias de idade
<i>GPa</i>	Giga Pascal
<i>IAI</i>	Instituto Internacional do Alumínio
<i>LEQ</i>	Laboratório de Engenharia Química
<i>LEC</i>	Laboratório de Engenharia Civil
<i>MPa</i>	Mega Pascal
<i>NBR</i>	Norma Brasileira Regulamentada
<i>RB</i>	Resíduo da bauxita
<i>SiO<sub>2</sub></i>	Dióxido de Silício – Sílica

## 1 INTRODUÇÃO

Em decorrência ao cenário de desenvolvimento visando o progresso em que se encontra os setores das engenharias, é imprescindível a busca por tecnologias inovadoras e possibilidades de matérias-primas alternativas. Dentro da construção civil em específico é vasto a necessidade de aplicação de novas ciências que tornem os seus métodos mais eficientes e avançados, com uma facilidade maior de se construir, de modo a se ter maior agilidade, eficiência e economia. Desta forma podem-se tornar possíveis as aplicabilidades voltadas para o desenvolvimento de novos materiais e procedimentos utilizados no cotidiano da indústria da construção civil.

Atualmente ocorreu um crescimento de empresas e indústrias no ramo de extração do alumínio e da alumina, gerando assim um aumento da produção de resíduos sólidos e, por sua parte aumentando o número de obras de contenção. Todavia, essas obras, como a de barragens, são enigmáticas e de custo elevado, motivando às empresas a buscarem formas de reuso e de uma adequada destinação do resíduo por elas produzido (LAGE, 2018).

Diante a estas situações, o descarte inadequado dos rejeitos do setor da alumina e do alumínio e sua alta produção tem agravado consideravelmente os problemas no meio ambiente. Tal cenário remete maior atenção tanto do Estado quanto das empresas privadas no que se refere ao aproveitamento dos resíduos do alumínio de uma forma geral. As novas metodologias e tecnologias voltadas à reciclagem e/ou reaproveitamento desses insumos são soluções de extrema importância em relação as futuras gerações.

O setor da alumina e alumínio tornou-se extremamente competitivo em questões relacionadas a diminuição de custos e melhorias em seus processos, buscando o aproveitamento de materiais que até então eram descartados na fase de beneficiamento, podendo esses se tornarem uma solução interessante para o uso no desenvolvimento de novas tecnologias e novos produtos (MENDES, 2016).

Os resíduos do setor de alumina e alumínio costumam ser estocados em razão de suas propriedades físico-químicas pouco estudadas e de sua abundância, o que torna sua valorização desafiadora. O Brasil é um dos principais países produtores de minérios do mundo. Em 2020, apesar da pandemia, o Brasil teve um crescimento de 36,2% comparado com o ano de 2019, atingindo R\$ 208,9 bilhões (IBRAM, 2020a), que representa uma participação de 4,0% no PIB brasileiro. As substâncias minerais com maior destaque no

setor de mineração brasileiro são: ferro, calcário, bauxita, fosfato, manganês e nióbio (IBRAM, 2020b).

Os resíduos são materiais remanescentes do processo de beneficiamento e concentração de minérios em instalações industriais, cujas características granulométricas dependem do processo industrial de beneficiamento e do tipo de minério bruto a ser extraído, podendo variar de granulometrias grosseiras até muito finas (CAPPÉLI, 2017).

O Brasil possui a quarta maior reserva de bauxita do mundo: em 2018, o País produziu 32 milhões de toneladas do material, sendo que boa parte desse volume é industrializada pelo próprio país, gerando tributos, empregos e agregando valor à cadeia nacional. De acordo com os dados da Associação Brasileira do Alumínio, o estado do Pará concentra 91% da produção de Bauxita para fins de uso metálico no Brasil. (ABAL 2017).

Estas se encontram distribuídas principalmente na região norte, seguidas pela região sudeste e sul. Cerca de 100% da produção de bauxita no Brasil é destinada à refinaria de alumina e posterior produção do alumínio. O restante é destinado à indústria de refratários e químicos (ANTUNES *et al.*, 2013).

Para o reaproveitamento do resíduo da bauxita, como de qualquer outro tipo de materiais, tem-se a necessidade da determinação de suas propriedades para avaliação de onde o componente seria melhor aplicado e/ou aproveitado. O conhecimento das características físicas, químicas e mecânicas são de vital importância para a determinação do objetivo principal do estudo que será elaborado visando utilizações alternativas dos materiais (COSTA, 2018).

A reutilização do resíduo da bauxita ainda é desafiadora a indústria do alumínio, uma possível alternativa para solucionar os problemas causados pelo grande volume produzido e estocado do substrato da bauxita é o avanço de tecnologias que tendam a sua reutilização. Explorar suas características e suas propriedades, viabiliza e conhecer o potencial deste resíduo para diferentes aplicabilidades. Em estudos recentes mostram que sua composição possui vários elementos de interesse para outros âmbitos.

A produção global anual de alumínio foi de pouco mais de 64 milhões de toneladas em 2020, e deve crescer para 88 milhões de toneladas até 2050. O alumínio é o 3º elemento mais abundante depois do oxigênio e do silício na crosta terrestre, mas não ocorre naturalmente como metal. Minérios ricos em alumínio (principalmente bauxita) são refinados para produzir alumina ( $Al_2O_3$ ), que é então reduzido eletroliticamente a

alumínio metálico primário usando o processo *Hall Héroult*. A indústria continua buscando, com crescente sucesso, opções técnica e economicamente viáveis para a extração e aproveitamento do valor dos resíduos com o estado futuro ideal de produção zero de resíduos (IAI, 2022).

Na área da construção civil o resíduo apresenta potencial para a aplicação em cimento do tipo Portland e como matéria prima de materiais cerâmicos na construção de tijolos estruturais e telhas por possuir em sua composição elementos que agregam requisito da matéria prima deste setor (SHINOMIYA *et al.*, 2018).

No âmbito das atividades que causam impacto ambientais negativos associados a construção civil, a extração de agregados naturais, recursos não renováveis, causa impactos em diversas esferas. De acordo com Pinheiro *et al.* (2019) destaca impactos socioambientais relativos à extração de seixo e areia em Porto Grande, no Amapá. Os autores concluíram que a atividade tem gerado impactos que afetam a área lavrada e seu redor, provocando alteração sobre a água, o ar, o solo, o subsolo e a paisagem como um todo, interferindo em seu aproveitamento para utilização futura, os quais impactam diretamente na qualidade de vida da população.

Em decorrência da grande demanda por agregados, pesquisa sobre a utilização de agregados sintéticos em substituição aos agregados naturais são de suma importância, não apenas na redução da extração dos agregados naturais, mas também na destinação de resíduos da alumina e alumínio.

Do ponto de vista global, os agregados são considerados, nos livros clássicos de materiais de construção, como um bem praticamente inesgotável, apesar de sua natureza não renovável. Porém, em diversas localidades do mundo, o esgotamento de jazidas de agregados é observado localmente (BAUER, 2019).

Entretanto, há regiões no país onde os centros urbanos estão distantes das jazidas de rochas britáveis, como é o caso da região norte. Em substituição à rocha britada, a construção civil e pesada utiliza o seixo rolado ou o cascalho. Muitas vezes até existe locais com afloramentos de rocha, mas por questões ambientais ou leis municipais, não podem ser exploradas, obrigando assim o consumo de jazidas mais afastadas (FIBER, 2015).

Os agregados têm demanda praticamente inelástica, ou seja, responde pouco a variações no preço. A demanda é subordinada aos ciclos econômicos, de modo a ser uma

correlação direta entre consumo e PIB. Em 2020, a produção brasileira de agregados atingiu 605 milhões de toneladas, 13% acima de 2019 (ANEpac, 2020).

A construção civil é um dos maiores consumidores de recursos naturais de qualquer economia, o que pode ser uma das causas de uma problemática já presente na cadeia, a escassez de matéria-prima (FUCALE *et al.*, 2014).

Devido a essas circunstâncias, com a grande quantidade de extração e consumo de agregados e de iniciativas sustentáveis na produção dos recursos minerais, constata-se a relevância de algumas intervenções como o uso de materiais inovadores com especificações técnicas adequadas que tornem mais eficientes e prósperos os processos de fabricação, com a necessidade de se construir com mais eficiência e economia, visando o bem-estar do meio ambiente (CARLETE, CASTRO e SILVA, 2015).

Devido ao grande consumo de concreto no mundo, a busca por materiais alternativos descartados por outras atividades permite que diversos estudos sejam realizados na busca por materiais que possam substituir os atuais componentes do concreto de forma eficiente sustentável, reduzindo custos e minimizando os impactos ambientais (MENDES, 2016).

De acordo Souza (2010) e Rossi (2009), afirmam que o resíduo da bauxita apresenta potencial para utilização na produção de agregado sintético, na medida em que substituiria os agregados convencionais usados para a produção de concretos, como por exemplo, o seixo natural e pedra britada. Além da questão econômica e ambiental, o concreto produzido por esses dois autores, com o uso deste agregado, apresentou resistências à tração e à compressão superiores àqueles produzidos com agregados naturais. Também apresentou menor desgaste na análise da abrasão hidráulica, fatos estes justificados pela resistência mecânica dos agregados produzidos com tal resíduo.

A utilização de material calcinado como agregado sintético vem sendo alvo de diversos estudos, pois além de ser mais uma alternativa para a indústria da construção civil, tem um papel fundamental no que diz respeito à diminuição dos impactos ambientais causados nos leitos dos rios, provocado pela extração predatória do seixo rolado, que promove assoreamento de suas margens (CABRAL *et al.*, 2008).

A substituição dos materiais convencionais por agregados sintéticos de resíduos de mineração, tal como, pode suceder em economia na aquisição da matéria-prima. A adesão de rejeitos e resíduos provenientes da exploração mineral ocasiona benefícios de ordem

econômica, social e ambiental. O conhecimento das propriedades de agregados provenientes do resíduo da bauxita em substituição ainda é pouco explorado, desta forma, é necessário estudos para complementar, alguns destes estudos podem ser acerca da dosagem de concretos com a inclusão deste material e sua influência nas diferentes propriedades mecânicas.

Portanto, o uso de agregado sintético pode fazer uma diferença significativa no esforço de melhorar a sustentabilidade da indústria da construção, tornando-a econômica e ecológica. Sendo assim, o presente estudo teve em vista ações de reutilização, tecnologia de materiais e formação de metodologias construtivas, sendo estes aplicáveis à indústria da construção civil. Tem como objetivo avaliar caracterização do agregado sintético proveniente do resíduo da bauxita (ASRB) para produção de concreto. Para isso, foram utilizadas diferentes técnicas: composição granulométrica, índice de forma, perda ao choque, absorção de água, resistência ao desgaste, dosagem do concreto e ensaios mecânicos, para identificar a potencialidade e discutir possíveis aplicações deste agregado sintético proveniente do resíduo da bauxita.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é avaliar o efeito da substituição total de agregados naturais por agregados sintéticos no comportamento de concretos estruturais e suas respectivas propriedades mecânicas.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Realizar a caracterização física do agregado sintético de resíduo de bauxita;
- Realizar um estudo de dosagem e a investigação da substituição total de agregados naturais por agregados sintéticos;
- Estudar a proporção ótima de dosagem de concreto com os agregados sintéticos graúdos;
- Avaliar as propriedades mecânicas, resistência à compressão aos 7 e 28 dias, resistência à tração diametral aos 28 dias e módulo de elasticidade, dos concretos referência e com agregados sintéticos.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA

### 2.1 AGREGADOS SINTÉTICOS

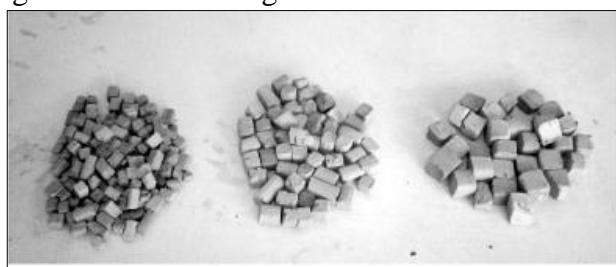
O agregado sintético é um material polivalente utilizado em diversas aplicações, como na construção civil, onde pode ser empregado na produção de blocos leves, concreto pré-moldado, bem como em aterro estrutural de fundações. (RASHAD, 2018).

No processo de produção de produtos sinterizados como agregados sintéticos, revestimentos cerâmicos, porcelanatos, telhas e blocos é utilizado como matéria-prima principalmente argilas e areias, e existe a possibilidade de incorporação de resíduos sólidos, como lodo de esgoto calcinado, pó de mármore, dentre outros resíduos, além do vidro de embalagens e janelas, conhecido como vidro soda-cal (ISLAM *et al.*, 2016).

A incorporação de resíduos tem como intuito reintroduzir os mesmos na escala produtiva, e aprimorar o controle de produção dos produtos sinterizados, como reduzir a temperatura de sinterização, a absorção de água e porosidade, aumento da massa específica e resistência à compressão (NJINDAM *et al.*, 2018).

As características dos agregados sintéticos artificiais como resistência satisfatória, são normalmente obtidas por meio da queima destes materiais em altas temperaturas. Na Figura 2.1 mostra os agregados desenvolvido pelos autores. Vale ressaltar ainda que a qualidade do produto acabado depende fundamentalmente de três fatores: matéria prima utilizada, temperatura de queima e do processo de conformação da massa cerâmica (CABRAL *et al.*, 2008).

Figura 2.1 – Agregado sintético de argila calcinada com diferentes dimensões.



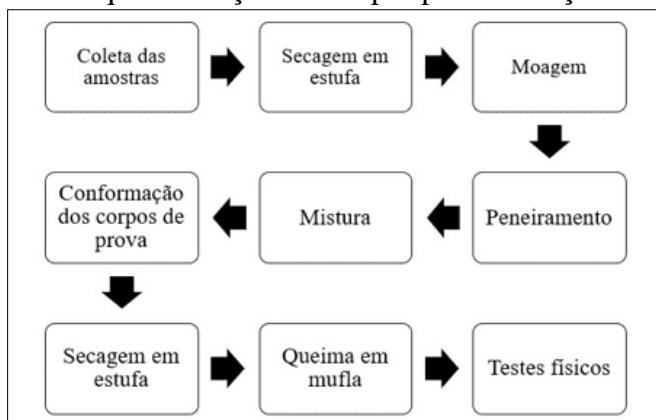
Fonte: CABRAL *et al.*, 2008.

Estudos apresentaram várias aplicações de sucesso de agregado sintético como um material de preenchimento geotécnico na década de 1980, incluindo a reabilitação de um terminal portuário fluvial e a construção de uma ponte. Devido à sua granulometria e natureza leve, o agregado sintético é fácil de transportar, preencher e manusear.

Desenvolvidos durante o processo de sinterização, os poros podem ser totalmente fechados dentro de uma determinada partícula ou expostos à sua superfície externa, sendo que a superfície da partícula do agregado sintético é mais resistente que o interior devido à sinterização da argila expandida em um material do tipo cerâmico (GAO, 2021).

A produção dos agregados sintéticos é feita através do aquecimento da matéria prima, triturada ou moída, e na maioria das vezes pelotizada, fazendo-se o uso geralmente de um forno rotativo. Desse modo, o material bem umedecido é transportado em uma esteira, sob queimadores, de modo que o calor atinge gradualmente toda a espessura da camada (SOUZA, 2010). Na Figura 2.2 é demonstrado o processo de produção do agregado.

Figura 2.2 - Esquematização das etapas para formação do agregado.



Fonte: Souza *et al.*, 2018.

Os agregados sintéticos são produzidos através de argilas ou subproduto de resíduos, que normalmente geram um produto com peso específico inferior ao da pedra britada e com elevada absorção de água. Os agregados leves podem ser obtidos pelo processo de queima em forno rotativo e apresentam granulometria variada, formato arredondado regular e estrutura interna formada por uma massa esponjosa, envolto por uma camada com baixa permeabilidade, que diminui significativamente a absorção de água. Sua sinterização é feita entre 1100 e 1350° C, e sua matéria-prima podem ser divididas em três grupos: matéria-prima natural, como vermiculita, argila, ardósia, folhelhos, os resíduos diversos ou mistura de resíduos e matérias primas naturais com a incorporação de aditivos. Essas matérias primas em geral contêm de 7 a 8 % de  $Fe_2O_3$ , no máximo 25%  $Al_2O_3$  e cerca de 1% de carbonatos, além de apresentar sulfatos e matéria orgânica, e um pH superior a 5 (ROSSIGNOLO, 2006).

O agregado sintético é formado a partir de sílico-aluminatos submetidos a um processo de sinterização em elevadas temperaturas, geralmente processados em fornos rotativos, resultando em um aumento da porosidade dos grãos e características singulares, como: leveza, capacidade de absorção de água e isolamento, ambos térmicos e acústico. A sua baixa densidade torna esse material apropriado para uso em construção como aterros sobre solos com baixa rigidez e como material de enchimento em estruturas de retenção, visando à redução de pressões ativas (ROCES-ALONSO *et al.*, 2021). Na Figura 2.3 é apresentado o agregado sintético de resíduo de bauxita desenvolvido neste projeto de estudo.

Figura 2.3 – Agregado sintético de resíduo de bauxita.



Fonte: Autora, 2022.

Por se tratar de um produto manufaturado, muitas de suas características, como a porosidade e densidade, podem ser adequadamente modificadas no processo de fabricação a fim de obter as características de grão desejadas. Em relação à sua leveza, o parâmetro mais importante é a porosidade do núcleo. Os poros podem ser divididos entre acessíveis e aqueles fechados, os quais não podem ser preenchidos com água, mesmo que o grão fique submerso por longos períodos (ROCES-ALONSO *et al.*, 2021; GAO, 2021). Na Figura 2.4 se tem a imagem dos agregados sintéticos.

Atualmente pesquisas mostram que a resistência do agregado é condicionada pelas características de cada grão; portanto, existem vários estudos sobre a resistência à ruptura dos grãos sob compressão uniaxial em diferentes materiais. Além do material que forma o grão, a quebra é influenciada por outros fatores, como o teor de água, tamanho dos grãos, a forma e a composição química, a qual depende em grande parte da composição da argila

original e dos outros materiais adicionados durante o processo de fabricação (ROCES-ALONSO *et al.*, 2021).

Atualmente, existem muitas publicações relacionadas à utilização do agregado sintético na construção civil. Essas publicações se concentram no uso do agregado sintético como substituto parcial ou total aos agregados de peso normal, o que proporciona uma maior trabalhabilidade ao material resultante (RASHAD, 2018).

A argila é um material muito fino, constituído de grãos lamelares de dimensões inferiores a dois micrômetros, formada em porções muito variáveis, de silicato de alumínio e óxidos de silício, ferro, magnésio e outros elementos (BAUER, 2019). Os estudos relacionados à utilização de agregados sintéticos de argila calcinada vêm sendo desenvolvidas na região amazônica, objetivando solucionar as dificuldades de obtenção de agregado rochoso, baseandose na formação geológica predominante sedimentar, desfavorável ao aproveitamento da rocha como brita, bem como o assoreamento das margens dos cursos d'água provocado pela extração do seixo rolado do leito dos rios (CABRAL, 2008).

O agregado de argila expandida apresenta grande versatilidade. A literatura mostra que o agregado vem sendo utilizado em estudos para a produção de concretos leve, uma vez que a utilização do agregado sintético traz benefícios ao tornar a construção mais segura, econômica e com menor impacto ao meio ambiente. Outros autores também estudaram a influência dos tamanhos dos agregados na trabalhabilidade e na resistência dos concretos (NAHHAB, 2019).

As misturas de argilas e areias são frequentemente utilizadas na fabricação de componentes cerâmicos utilizados na construção civil. Esses componentes são, de modo geral, materiais heterogêneos e porosos, podem ser sinterizados em temperaturas que variam entre 750 e 1250 °C, a depender do tipo de componente e matéria-prima. Para uma dada composição, as propriedades mecânicas são controladas pelas características micro estruturais, isto é, distribuição de fase, tamanho de grãos e distribuição de tamanho de poros. A fratura frágil dos materiais cerâmicos geralmente se inicia a partir de falhas dele. Ao se fabricar produtos de argila como agregados, tijolos, telhas e pisos, a distribuição de tamanho de partículas e o arranjo das partículas durante o processo de sinterização, mudam a porosidade da microestrutura do produto sinterizado e, consequentemente, sua densidade final (ZERBO *et al.*, 2018).

## 2.1.2 Processo de Sinterização

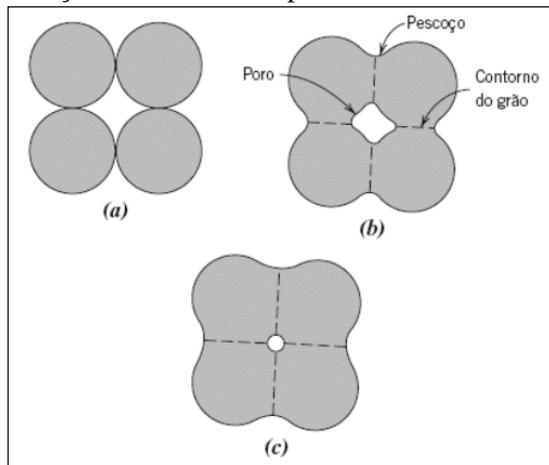
De forma simplificada, a sintetização pode ser definida como a eliminação dos espaços vazios entre as partículas do pó, retração da peça, crescimento dos grãos e formação de ligações fortes entre as partículas adjacentes (CHINELATTO *et al.*, 2012; SILVA 2011).

Na sintetização é feita uma mistura de matéria-prima e combustíveis, em seguida esse material é submetido a altas temperaturas, que causa a formação de gases expandido o mesmo (GOMES NETO, 1998).

SETZ e SILVA (2019), a sinterização frequentemente é dividida em três estágios ou fases, de acordo com as mudanças físicas que ocorrem nos contornos de grão junto com a eliminação da porosidade. Essa consideração, entretanto, é simplificada e serve apenas para ilustrar os fenômenos e os mecanismos envolvidos, como será descrito a seguir e simplificado na Figura 2.4:

- I. No primeiro estágio, ou estágio inicial, ocorre o rearranjo das partículas e o início da formação de pescoço nos pontos de contato entre cada partícula. Os leves movimentos e rotações das partículas adjacentes causam um aumento no número de pontos de contato entre elas. Nesse primeiro estágio, o número de poros ainda é grande e eles se encontram interligados.
- II. No segundo estágio, ou estágio intermediário de sinterização, o tamanho dos pescoços entre as partículas aumenta em relação a porosidade, e os centros de massa das partículas iniciais aproximam-se. O estágio intermediário continua até que os poros sejam isolados. A maioria das ligações promovidas pela sinterização ocorre nesse estágio.
- III. No terceiro estágio, ou estágio final da sinterização, envolve essencialmente remoção da porosidade final, que ocorre por difusão das vacâncias ao lado do contorno do grão, devido a isso os poros podem permanecer próximos ao contorno de grão.

Figura 2.4 - Esquema dos estágios clássicos da sinterização (a) corpo verde, com grãos aproximados pelo processo de conformação, (b) início da formação de pescoço e aproximação dos grãos, (c) redução do tamanho de poros e aumento da densificação.



Fonte: Adaptado CALLISTER e RETHWISCH, (2016).

Os agregados produzidos pelo processo de sinterização apresentam alta rugosidade, formas angulares e superfície porosa, o qual proporciona boa aderência à pasta de cimento, mas apresenta altos valores de absorção de água, aumentando a quantidade de água da mistura para a obtenção de uma melhor trabalhabilidade. Outra desvantagem desse processo é a penetração da pasta de cimento nos poros externos, que pode variar de 30 a 100 kg de cimento por m<sup>3</sup>, o que faz aumentar o consumo de cimento e a massa específica do concreto. Os agregados produzidos em fornos rotativos normalmente apresentam forma esférica e uma fina camada externa com baixa porosidade, possibilitando uma boa trabalhabilidade com baixa relação água/cimento. Todavia, um malefício é que esse tipo de agregado apresenta maior facilidade de segregação do que o produzido por sinterização, devido ao seu formato esférico (ROSSIGNOLO, 2003).

### 2.1.3 Reações de Formação de Mulita

Mulita é uma das principais matérias primas da indústria cerâmica, com excelentes propriedades térmicas e mecânicas. Ela é formada quando sílica (SiO<sub>2</sub>) e alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) se combinam em temperaturas acima de 1400°C para formar uma fase cristalina cuja composição estequiométrica apresenta a seguinte fórmula (3Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.2SiO<sub>2</sub>), sendo por tanto um silicato-aluminoso, com 71,8% de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e 28,2% em composição em massa SiO<sub>2</sub> (SCHNEIDER, 2008; DENG *et al.*, 2001).

A mulita secundária (de morfologia acicular), é a grande responsável pela melhoria nas propriedades mecânicas do material cerâmico que juntamente com a fase amorfa irão determinar as características mecânicas do mesmo (SOUZA, 2010).

A mulita é um alumino silicato de fórmula química ( $3\text{Al}_2\text{O}_3\text{SiO}_2$ ), sendo composta de 71,8% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e 28,2% de  $\text{SiO}_2$ . Possui a coloração branca e ponto de fusão de 1850°C. A equação (2.1) apresenta a reação de formação da mulita (HIDELBRANDO *et al.*, 1999).



A reação é responsável pela formação da mulita secundária, a qual é responsável pela melhoria das propriedades mecânicas do material cerâmico. A mulita secundária é formada em uma reação exotérmica que, para a caulinita, ocorre a 1250°C. Porém, como o resíduo de bauxita e a argila apresentam impurezas, como Na, K e Fe, a formação da mulita pode ocorrer entre 1050 e 1250°C (SOUZA, 2010).

Para a produção de agregados de baixa densidade, a mistura deve conter quantidades suficientes de substâncias capazes de produzir gases em combustão espontânea. Além disto, os gases devem possuir muita expansão para a ocupação de poros, resultando em um material com a massa específica aparente desejada. O gás deve ser liberado em uma quantidade adequada, baseado na velocidade própria dos componentes voláteis, em uma temperatura e momento que coincidam com as condições ótimas da fase vítreia do material (SOUZA, 2010).

#### 2.1.4 Fase Vítreia

Para que ocorra o total preenchimento dos poros e retenção dos gases formados, o material na sinterização deve ter um teor de vidro suficiente em baixa viscosidade na temperatura de formação. No resíduo de bauxita, a presença de NaOH é responsável pela maioria da fase vítreia formada por meio das reações de vitrificação, conforme apresenta a equação (2.2). (BRINDLEY e NAKAHIRA, 1958; SOUZA, 2010).



A reação responsável pela ocupação do vazio da estrutura, gerando a redução na porosidade do material e como consequência o aumento da resistência mecânica. Esse modelo de sinterização possui como mecanismo principal a transferência de massa em

função da difusão no estado sólido, sendo a temperatura um fator preponderante para essa difusão (SOUZA, 2010).

É possível identificar e classificar os minerais presentes no resíduo de bauxita entre aqueles que são provenientes do próprio minério, tais como a gibbsita, hematita, goetita, anatásio, quartzo, caulinita; e em uma segunda categoria aqueles formados durante o processo Bayer, como a sodalita e cancrinita. Para a argila, segundo a literatura, a constituição é dada por minerais de hematita e quartzo (SOUZA, 2010).

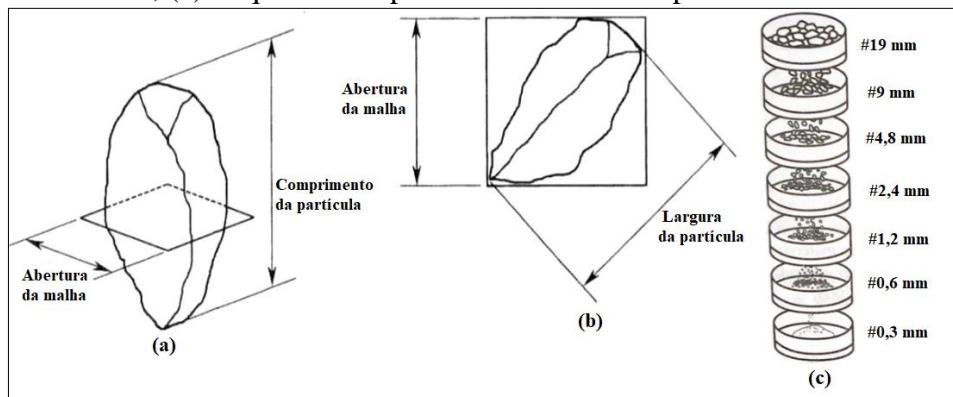
As transformações polimórficas do quartzo são acompanhadas de alterações volumétricas, seja durante aquecimento ou resfriamento, com a consequente tendência de provocar trincas nas peças. Uma delas é a brusca retração a 573 °C de quartzo- $\alpha$  em quartzo- $\beta$ . Caso haja alguma fase líquida presente, o quartzo- $\beta$  pode transformar-se de maneira lenta em tridimita (acima de 876 °C) ou em cristobalita (acima de 1470 °C) durante o aquecimento. Essas fases, entretanto, permanecem inalteradas durante o resfriamento (SETZ e SILVA, 2019).

## 2.2 AGREGADOS PARA CONCRETO

A composição granulométrica de um agregado é composta por uma mistura de grãos de diferentes tamanhos que constitui o material, sendo os valores são expressos em porcentagem. A composição granulométrica do agregado irá influenciar nas futuras propriedades dos concretos e argamassas que serão produzidos com este agregado. Conforme a densidade do material que constitui as partículas, os agregados são classificados em leves, médios e pesados (BAUER, 2019).

A escolha da graduação dos agregados graúdos depende dos requisitos para o concreto pronto. Uma graduação contínua é recomendada caso haja necessidade de maior resistência mecânica, por outro lado, uma maior permeabilidade é conquistada com o uso de graduação uniforme (SANDOVAL *et al.*, 2019). Na Figura 2.5 demonstra a graduação dos agregados através do ensaio de peneiramento.

Figura 2.5 – (a) Comprimento da partícula; (b) Largura da partícula maior que a abertura da malha; (c) Sequência de peneiras no ensaio de peneiramento.



Fonte: Adaptado de KWAN *et al.*, 1999; BAUER, 2019.

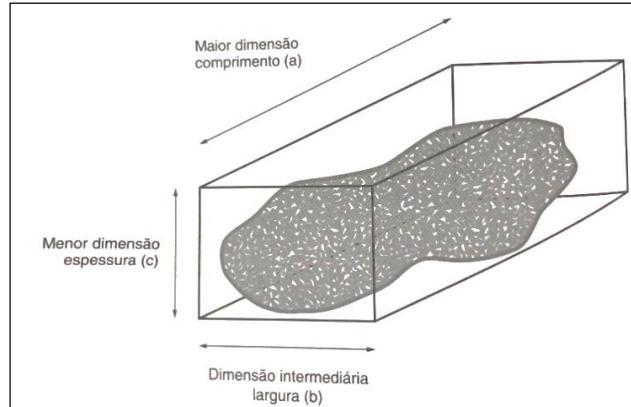
Existem 3 cenários possíveis para a graduação: contínua (bem graduada) onde há boa distribuição de agregados de cada tamanho; descontínua, onde há alguma faixa granulométrica que não é preenchida; uniforme, onde a faixa granulométrica é tão estreita que todos os grãos são praticamente do mesmo tamanho (BIZÃO, 2021).

Yu *et al.* (2019), afirma que o aumento no tamanho do agregado, contribui positivamente para a resistência a compressão, porém, quando o tamanho do agregado é maior que 7 mm, este não tem influência significativa na resistência à compressão.

Concretos feitos com agregados de graduação uniforme têm resistência mecânica menor. Concretos com graduação mista tem resistência mecânica maior, pois existe a tendência da faixa granulométrica maior, com boa distribuição, proporcionar um aumento na área de contato, aumentando as ligações entre a pasta de cimento e o agregado. (NEPTUNE, 2008).

A granulometria dos agregados está relacionada diretamente com o módulo de finura e, consequentemente, com o empacotamento dos grãos e a área superficial disponível para contato com os compostos do cimento durante as reações de hidratação, influenciando a trabalhabilidade da mistura no estado fresco, cujas altas taxas de consumo de água são causadas por materiais bem finos; e a resistência mecânica no estado endurecido (DAY, 2006; LI, 2011). Na Figura 2.6 mostra as dimensões comprimento, largura e espessura do agregado.

Figura 2.6 – Classificação da forma da partícula segundo suas dimensões.

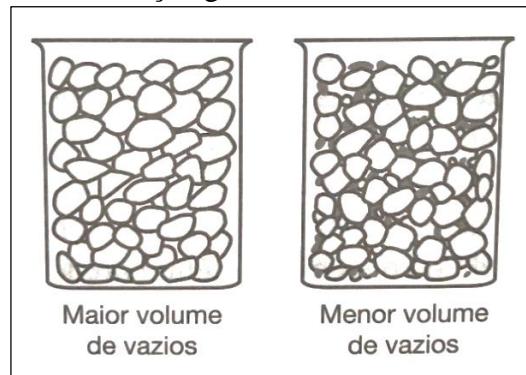


Fonte: Adaptado de ERDOGAN e FOWLER, 2005; BAUER, 2019.

As distribuições granulométricas podem ser de um único tamanho (uniformes ou monodispersas) ou de tamanhos variados (contínuas ou polidispersas), afetando o empacotamento do conjunto granular dentro de determinado volume e, consequentemente, o seu volume de vazios (LARRARD, 1999; OLIVEIRA *et al.*, 2000; PCA, 2003).

Distribuições granulométricas uniformes resultarão em um volume maior de vazios, e se comparado às distribuições granulométricas contínuas (LARRARD, 1999; OLIVEIRA *et al.*, 2000), como pode ser notado Na Figura 2.7, a distribuição granulométrica e o volume de vazios respectivamente.

Figura 2.7 – Distribuição granulométrica e o volume de vazios.



Fonte: Adaptado de PCA, 2003; BAUER, 2019.

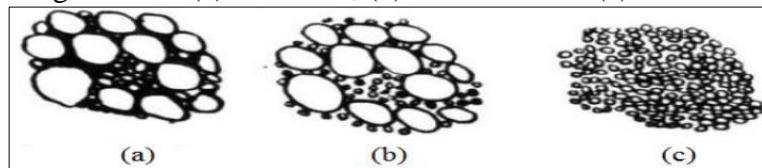
As especificações para uso de agregados em concreto adotam geralmente curvas granulométricas contínuas. O motivo principal é a redução do volume de vazios, conferindo maior resistência a cargas ou reduzindo o consumo dos ligantes, geralmente mais caros que os agregados (BAUER, 2019).

Por outro lado, curvas granulométricas contínuas podem não ser a mais fáceis de serem moldadas com concreto, porque partículas com tamanho imediatamente inferior àquelas maiores atrapalham a movimentação das partículas (OLIVEIRA *et al.*, 2000).

Dentro do estudo da granulometria se observa que não há distribuição de grão ideal, e sim, uma junção de estudos físicos e econômicos, pois areias muito finas necessitam de um aumento expressivo de consumo de água o que leva a um aumento também no cimento pela relação água/cimento e consequentemente um maior custo, já areias muito grossas tornam os concretos muito ásperos e com baixa trabalhabilidade. No equilíbrio da granulometria se produz concretos mais econômicos, trabalháveis e misturas mais fechadas que diminuíram o volume de vazios e reduziram os espaços por onde atacariam os agentes agressivos (PASSUELA, 2011; REIS, 2014).

De acordo com Mehta e Monteiro (2014), agregados com granulometria contínua apresentam maior trabalhabilidade e menor consumo; aqueles com granulometria descontínua possuem maior resistência e os que são constituídos por granulometria uniforme necessitam de maior consumo de água. Na Figura 2.8 observam-se as diferentes formas granulométricas.

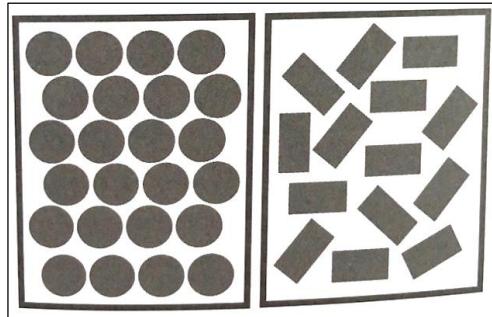
Figura 2.8 – (a) Contínua, (b) descontínua e (c) uniforme.



Fonte: MEHTA e MONTEIRO, 2014.

A forma das partículas afeta o empacotamento dos agregados (OLIVEIRA *et al.*, 2000; MENDES, 2008). Para partículas de dimensões similares (monodispersas), quanto maior a esfericidade (arredondamento) das partículas lamelares ou alongadas prejudicam o empacotamento do conjunto granular, criando vazios e tornando os concretos menos econômicos, em razão do maior volume de pasta de cimento necessário para preencher os vazios deixados pelos agregados, como é demonstrado na Figura 2.9 as formas das partículas e o índice de vazios delas (BAUER, 2019).

Figura 2.9 – Forma das partículas e o índice de vazios.



Fonte: Adaptado de Oliveira *et al.*, 2000; BAUER 2019.

## 2.2.1 Porosidade e Permeabilidade

A porosidade é uma característica de fundamental importância no julgamento global da qualidade do concreto, visto ser responsável diretamente, tanto por sua resistência mecânica como por sua durabilidade (RECENA, 2014). Apesar de terem conceitos distintos, a permeabilidade e a porosidade estão estreitamente relacionadas (CUI *et al.*, 2017; SANDOVAL *et al.*, 2019).

Os agregados até mesmo os mais densos, possuem alguma porosidade. Com a escassez de fontes de agregados naturais, é comum a incorporação de agregados reciclados, principalmente aqueles obtidos pela reciclagem de resíduos de construção e demolição. Esses agregados, inclusive de outros tipos, são mais porosos que os naturais. Assim, torna-se fundamental, em qualquer processo de controle de qualidade dos agregados, o controle de sua porosidade. Cada partícula do agregado tem uma porosidade, devendo um conjunto de partículas apresentar uma distribuição de valores (BAUER, 2019).

O aumento da porosidade residual afeta de forma negativa tanto a resistência mecânica quanto as propriedades elásticas do material. Por exemplo, a resistência à flexão é diminuída com o aumento da fração volumétrica da porosidade por dois motivos: primeiro, porque os poros reduzem a área da seção transversal onde a força é distribuída e, segundo, porque eles atuam como concentradores de tensão (NUNES, 2017).

Uma porosidade volumétrica de 10% reduz em até 50% a resistência à flexão, em relação ao valor medido no material sem poros. Por outro lado, a resistência a choques térmicos é aumentada com o aumento de porosidade (CALLISTER, 2018). A resistência mecânica de materiais cerâmicos depende principalmente de sua densidade, porosidade e distribuição do tamanho de poros (KAZMI *et al.*, 2016).

Além de influenciarem nas propriedades dos materiais cimentícios no estado fresco, os agregados também influenciam nas propriedades dos materiais cimentícios no estado endurecido. O agregado natural (pouco poroso), por ser mais rígido que a pasta de cimento, é fundamental para reduzir a retração, aumenta o módulo de elástico e reduzir a fluência dos materiais cimentícios (NEVILLE, 2016; BROOKS, 2013).

Quanto maior o volume de agregados natural nos materiais cimentícios, menor será a retração, maior o módulo elástico e menor a fluência dos materiais cimentícios. A seleção do tipo de agregado natural é fundamental para se definir essas características. Concretos de elevada resistência requerem também agregados selecionados, de resistência elevada, pois podem limitar a resistência do material (BAUER, 2019).

Por outro lado, os agregados porosos (leves, reciclados) reduzem a resistência mecânica e o módulo elástico dos materiais cimentícios, assim como aumentam a retração, quando usados em substituição aos agregados naturais (não porosos) (BAUER, 2019).

## 2.2.2 Resistência do Concreto

A resistência do concreto normalmente é considerada sua propriedade mais importante, embora, em muitas situações práticas, outras características, como a durabilidade e a permeabilidade, possam ser mais relevantes. No entanto, a resistência costuma fornecer uma ideia geral da qualidade do concreto, visto que está diretamente relacionada à estrutura da pasta de cimento hidratada. Além do mais, a resistência é, quase invariavelmente, um elemento fundamental no projeto estrutural, e é especificada para fins de controle (NEVILLE, 2016).

A resistência mecânica é uma propriedade muito importante do concreto e traduz-se na resistência à compressão, à tração, à flexão e ao cisalhamento. É a resistência que permite que elementos estruturais de concreto suportem altas cargas em serviço sem entrar em colapso. O processo de endurecimento de concretos à base de cimento Portland é muito longo e pode perdurar por anos. O aumento da idade permite que ele ganhe resistência, isto é, aumente sua capacidade de resistência mecânica. Com 28 dias, o concreto adquire de 75 a 90% de sua resistência final e é com base neste valor, obtido por meio de ensaios, que os elementos de concreto são projetados (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

De acordo com Chandra (2002), afirma que a resistência mecânica depende das características das matérias-primas, bem como do processo de produção utilizado.

Agregados produzidos com uma distribuição uniforme de pequenos poros apresentam maiores resistências que agregados com poucos poros de grandes diâmetros.

Os agregados sintéticos leves possuem elevada absorção de água e baixa densidade aparente, comparados com a pedra britada, o que facilita a aderência à pasta cimentícia e ao processo de cura interna quando se produz concreto (DOMAGATA, 2016; ROSSIGNOLO, 2007).

De acordo com Bogas (2013), a argila expandida pode reduzir em 30% a 50% o peso de uma estrutura, e a resistência mecânica a compressão pode ainda alcançar até 45 MPa, obtendo peso específico de 1700 kg/m<sup>3</sup>, comparados com a brita que oscila de 2600 a 2700 kg/m<sup>3</sup>.

Os concretos produzidos com agregados originários de rochas têm massa específica variando entre 2200 kg/m<sup>3</sup> e 2600 kg/m<sup>3</sup>. Concreto com menor massa específica pode resultar em vantagens significativas quanto a elementos estruturais com menor seção transversal e uma correspondente redução das dimensões da fundação. Outra característica importante a ser observada no agregado leve é a boa aderência entre este e a pasta hidratada de cimento que o envolve. Esta aderência ocorre pela textura áspera da superfície do agregado, resultando em um intertravamento mecânico entre o agregado e a pasta (ZHANG 1992; NEVILLE 2016).

A variação da relação água/cimento influencia, diretamente, na resistência mecânica do concreto no estado endurecido. O aumento pode significar maior quantidade de água na mistura, causando diminuição da resistência mecânica. Sua redução, ao contrário, pode permitir a obtenção de concretos com maior resistência mecânica quando diminui a quantidade de água adicionada. Entretanto, a trabalhabilidade da mistura fica prejudicada. Deste modo é possível ver a importância de uma relação água/cimento que permita que propriedades como a trabalhabilidade e a resistência mecânica sejam atendidas de forma suficiente (RAMACHANDRAN e BEAUDOIN, 2000).

Existe uma interligação nessas propriedades e elas têm influência no desempenho do concreto, principalmente quando se interfere diretamente na resistência a abrasão, na estabilidade química e na aderência entre a pasta de cimento e o agregado. Somado a isso temos a porosidade do agregado que contribui muito na porosidade global do concreto, pois o agregado representa cerca de ¾ do volume do concreto. A porosidade superficial da partícula interfere na aderência entre a pasta de cimento e o agregado, isto é, interfere

também na resistência mecânica. Para partículas com superfícies polidas podem ocorrer pouca aderência entre o agregado e a pasta de cimento (SOUZA, 2010).

Conforme Liu *et al.* (2016), menciona que a adição do resíduo de bauxita no concreto produz um incremento de resistência na tração e a compressão, diminuindo a segregação e a exsudação do concreto, reações que causam redução da capacidade resistiva do concreto a esforços de compressão.

### 2.3 Resíduo de Bauxita

A indústria do alumínio tem grande interesse no desenvolvimento de processos industriais que possam consumir satisfatoriamente o resíduo do Processo Bayer, eliminando a preocupação com a reduzindo a sua pegada ambiental e custos com o gerenciamento do resíduo até a sua disposição final (armazenamento do resíduo) (SILVA FILHO *et al.*, 2007).

A bauxita é a fonte natural do alumínio, o terceiro elemento em abundância na crosta terrestre, depois do oxigênio e do silício. Constatou-se sua maior ocorrência na forma combinada com outros elementos, principalmente o oxigênio, com o qual forma alumina. Ela é encontrada sobretudo em regiões tropicais e subtropicais do planeta, por ação do intemperismo sobre alumino silicatos. Especialistas avaliam que as reservas mundiais conhecidas de bauxita agregam em torno de 70 bilhões de toneladas. Com base nas atuais taxas de consumo e níveis de aproveitamento, a estimativa é que a reserva seja suficiente para atender à demanda dos mercados globais pelos próximos 250 a 300 anos. As reservas brasileiras de bauxita, além da ótima qualidade (mais de 40% de  $Al_2O_3$ ) também estão entre as maiores do mundo. (SAMPAIO, *et al.*, 2005; ABAL, 2017).

É um mineral heterogêneo, com uma coloração avermelhada, composto principalmente de um ou mais hidróxidos de alumínio, e várias misturas de sílica, óxido de ferro, dióxido de titânio, silicato de alumínio e outras impurezas em quantidades menores (CARDOSO *et al.*, 2012).

Quanto às propriedades químicas, existem três grupos de bauxita: a gibbsítica, a boehmítica e a diaspórica. A bauxita gibbsítica é determinada pela presença majoritária do mineral gibbsita ( $Al(OH)_3$ ), um óxido hidratado com cerca de 65% de  $Al_2O_3$ . A bauxita boehmítica é aquela em que o óxido hidratado é a boehmita ( $\gamma Al(OOH)$ ) e a bauxita diaspórica é a composta pelo óxido hidratado denominado diáspero ou diaspório ( $\alpha-Al(OOH)$ ), nas duas se encontram concentrações de  $Al_2O_3$  superiores a 80% (CARDOSO

*et al.*, 2012). A bauxita é apresentada na Figura 2.10.

Figura 2.10 – Bauxita: matéria-prima do alumínio.



Fonte: Norsk Hydro ASA (2019).

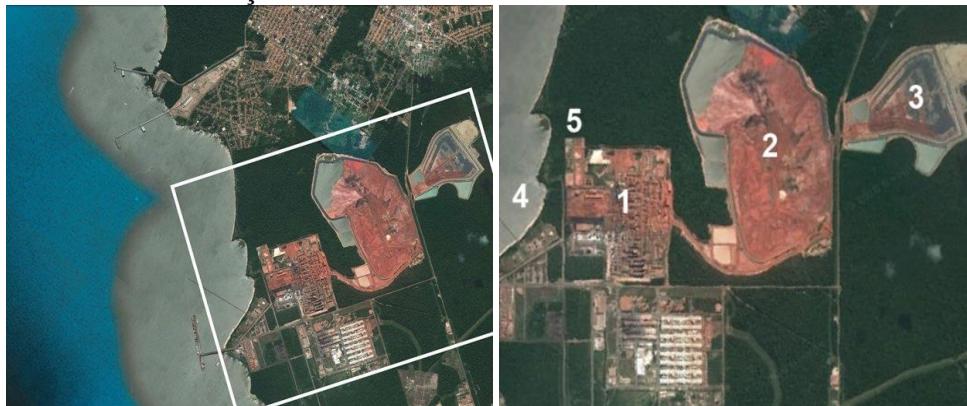
O resíduo da bauxita é um material residual e como qualquer outro detrito industrial apresenta variações, que são atribuídas à matéria-prima, ao processo industrial e ao tempo de disposição. Esse aspecto impõe ao resíduo de bauxita um leque de características e comportamentos diferenciados, podendo em uma mesma refinaria o resíduo não apresentar características homogêneas (MANFROI, 2009).

### 2.3.1 Localização e disposição do resíduo

A mineração de bauxita em Paragominas fica a 64 quilômetros da área urbana, no nordeste do Pará, a 350 km da capital Belém. Controlada pela empresa norueguesa Hydro, iniciou suas operações em 2007 e transporta 100% de sua bauxita por um mineroduto de 244 quilômetros de extensão. Esse mineroduto, com capacidade de 15 milhões de toneladas por ano, é pioneiro no mundo para transporte de bauxita. Por ele, o minério vai para o município de Barcarena no Pará, para alimentar a refinaria de alumina da Hydro Alunorte (ABAL, 2017).

A alumina é a matéria-prima do alumínio e é produzida a partir do minério de bauxita, através do processo denominado Bayer. O processo de produção de alumina gera um resíduo, que é lavado, filtrado e armazenado nos depósitos de resíduos sólidos da refinaria. Na refinaria a fase de digestão, na separação da bauxita é utilizado o hidróxido de alumínio, após a calcinação do hidróxido é que se obtém a alumina. (ALUNORTE, 2022). Na Figura 2.11 é apresenta uma vista de satélite da referina ALUNORTE e os seus repectivos depósito dos rejeitos.

Figura 2.11 - Vista de satélite da Alunorte e do rio Pará (1) área da refinaria, (2) depósito de RB 1, (3) depósito de RB 2, (4) descarte de água licenciado para Rio Pará e (5) estação de tratamento de efluentes industriais.



Fonte: Hydro Alunorte (2021).

Atualmente com as limitações das áreas de lagoas exigiram abordagens de maior densidade de sólidos e requerem uma grande área de terra, à medida que as taxas de produção da refinaria aumentaram, juntamente com a necessidade de melhor utilização da terra, novas soluções de maior densidade de sólidos foram amplamente adotadas. O 'empilhamento' tornou-se progressivamente o método de deposição dominante. O conceito de empilhamento de resíduos foi praticado pela primeira vez em meados da década de 1960, quando o *Thickened Tailings Disposal*<sup>1</sup> foi desenvolvido e praticado pela primeira vez. Seu objetivo é aumentar a concentração de resíduos sólidos a um nível crítico no qual a tensão de escoamento da pasta começa a aumentar exponencialmente. (IAI,2022)

As maiores concentrações de sólidos permitem que mais licor de processo seja devolvido à refinaria, diminuindo o consumo de soda cáustica da refinaria como descarga com resíduo. Onde o resíduo é continuamente descarregado em uma pilha a partir de um único ponto, ficou conhecido como 'empilhamento úmido' e foi adotado em climas úmidos e de baixa temperatura. Usando este método, um volume muito maior de resíduo pode ser armazenados na mesma área, portanto, menos área total de terra. As maiores concentrações de sólidos permitem mais licor de processo a ser devolvido à refinaria, reduzindo consumo de soda cáustica da refinaria como descarga com resíduo. (IAI, 2022). Na Figura 2.12 é ilustrado as divisão das baías.

<sup>1</sup> Descarte de Rejeitos Espessados - Tipo de subfluxo de espessante de pasta geralmente usado para empilhamento superficial de rejeitos é chamado de “rejeitos espessados”. Os rejeitos espessados são uma suspensão de sólidos que são relativamente não sedimentáveis e não segregantes e que possuem uma concentração e viscosidade mais altas do que os rejeitos convencionais.

Figura 2.12 - Instalações de armazenamento de resíduos de bauxita dividido em baías, onde é depositado, cultivado e seco.

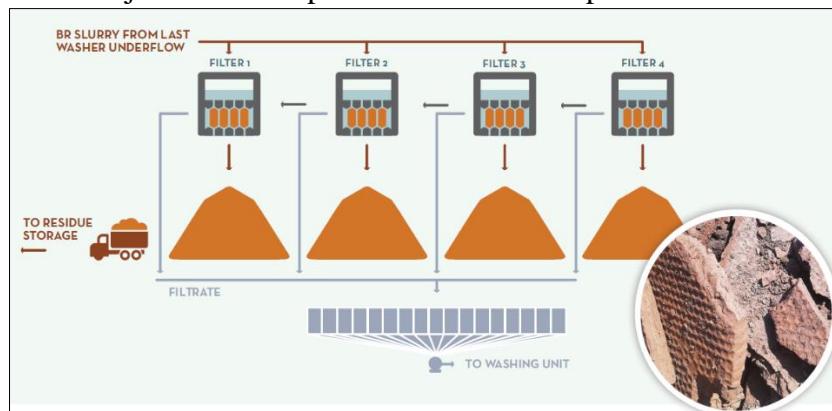


Fonte: International Aluminium Institute (2022).

O resíduo de bauxita pode ser filtrado a vácuo ou prensado para formar um bolo que se comporta como um sólido (> 60% de sólidos). Água ou vapor podem ser usados como lavagem da torta de filtro para reduzir a alcalinidade antes de serem transportados, armazenados ou usados. Filtros de placa e moldura têm sido usados para esse fim desde a década de 1930, e filtros rotativos a vácuo desde a década de 1960. As melhorias nos equipamentos, principalmente na filtração por prensa, resultaram em resíduos com maior teor de sólidos (mais de 70%) e mais fáceis de manusear.

Os filtros de prensa são usados há mais de uma década em algumas refinarias fora da China, e agora são amplamente utilizados em refinarias chinesas, onde a maioria dos resíduos é agora armazenado a seco. A Figura 2.13 mostra um arranjo de filtro prensa simplificado para espessamento do resíduo de bauxita, e a Figura 2.14 mostra o resíduo sendo armazenado a seco após a filtração prensada.

Figura 2.13 - Arranjo de filtro de prensa de resíduo simples e resíduo filtrado de prensa.



Fonte: International Aluminium Institute (2022).

Figura 2.14 - Resíduos de empilhamento seco dos filtros de prensa.



Fonte: International Aluminium Institute (2022).

Apenas uma pequena proporção do resíduo de bauxita produzido encontra seu caminho fora das áreas de resíduos das refinarias, de modo que a esmagadora maioria é armazenada em Instalações de Armazenamento de Resíduos de Bauxita. Os processos utilizados para manuseio e armazenamento do resíduo de bauxita são determinados por fatores como idade da refinaria, disponibilidade de terra, proximidade com o mar, topografia local, clima, logística, natureza do resíduo e regulamentações (IAI, 2022).

### 2.3.2 Aplicações e estudos de Agregado Sintético e Resíduo de Bauxita

Durante muito tempo o resíduo da bauxita, foi considerado inoperante para a indústria do alumínio. No entanto, os riscos e custos associados à disposição do resíduo propiciou pesquisadores a buscarem alternativas para utilização do resíduo de forma econômica e ambientalmente oportuno (CHAVES, 1962).

O agregado sintético é conhecido na literatura como agregado de argila expandida, do inglês “*Light Expanded Clay Aggregate*” (LECA), e vem sendo usado no Brasil desde a década de 1980 em projetos de engenharia civil incluindo aplicações geotécnicas, devido à sua diversidade na massa específica (densidade), alta resistência ao cisalhamento e características de drenagem favoráveis (GAO, 2021), proporcionando diversas aplicações na construção civil. Atualmente, existem geralmente dois métodos para a preparação de agregados sintéticos: sinterização e pelotização a frio (ERHAN, 2021).

Na Tabela 2.1 é possível analisar alguns estudos desenvolvidos com aplicações e produções de agregados sintéticos e pesquisas que utilizaram o resíduo da bauxita na indústria da construção civil.

Tabela 2.1 – Estudos desenvolvidos com agregados sintéticos e resíduo de bauxita.

Autores	Local de Origem	Aplicação	Teores de Utilização.
Rosário (2013)	Belém, PA	Concreto	50 e 100%
Albuquerque (2007)	Belém, PA	Concreto	—
Rossi (2009)	Belém, PA	Concreto	100%
Manfroi (2009)	Florianópolis, SC	Argamassas	5%, 10% e 15%
Santos (2011)	Belém, PA	Concreto	----
Reis (2014)	Belém, PA	Agregado sintético	----
Souza (2010)	Belém, PA	Concreto	100%
Ferreira (2019)	São Luís, MA	Concreto	30%, 50% e 60%
Souza <i>et al.</i> , (2018)	Belém, PA	Agregado sintético	----
Tang <i>et al.</i> , (2018)	Callaghan, Austrália	CAA	12,5, 25 e 50%
Kaige <i>et. al.</i> , (2021)	Harbin, China	Agregados artificiais	100, 80, 60, 40 e 20%

Fonte: Autora, 2022.

Em estudo realizado por Souza (2010), trataram da produção de agregado sintético do resíduo de bauxita para confecção de concreto. Para este fim, foi produzido agregado graúdo sintético em diferentes teores de resíduo de bauxita (95 – 55%), sílica (40 – 05%) e argila (5%).

Conforme a Figura 2.15, se tem a imagem obtida do corpo de prova no rompimento de resistência a compressão axial simples. O autor conclui que é possível relacionar o aumento da resistência com várias circunstâncias, no teor de sílica, temperatura de sintetização com a massa específica do agregado sintetizado, influenciando diretamente na resistência mecânica do agregado e consequentemente no concreto produzido.

Figura 2.15 – Ensaio de compressão axial simples.



Fonte: Souza (2010).

Albuquerque *et al.*, (2007), constatou em estudo as propriedades mecânicas de concretos dosados com agregados provenientes de resíduo de bauxita. Na Figura 2.16, se tem a imagem obtida dos agregados nomeados produzidos com uma mistura de RB, sílica

ativa, metacaulim, areia fina e areia grossa.

Ainda segundo Albuquerque *et al.* (2007), foi acrescentado nas misturas 10% em peso de óleo e aproximadamente 25% a 30% em peso de água, e o processo de moldagem dos agregados foi realizado com formas metálicas. Os dados cessaram que a praticabilidade destes agregados para a confecção de concretos, visto que na apresentação dos resultados as propriedades mecânicas foram pertinentes.

Figura 2.16 – Aparência dos agregados após a queima.



Fonte: Albuquerque *et al.* (2007).

Em estudo Rossi (2009), produziu concretos para reparo com agregados de RB sob abrasão hidráulica, conforme a Tabela 2.2 foram aplicadas quatro combinações de matéria-prima, todas com valor fixo de 70% de resíduo de bauxita e os 30% restantes de sílica ativa, metacaulim, areia fina e areia grossa.

Na fabricação dos agregados foram manuseando formas cúbicas metálicas, e após esta etapa, com os materiais ainda maleáveis, iniciou-se o processo de arredondamento de forma manual, com a finalidade das formas do agregado sintético se semelhante a do agregado natural, seixo rolado. Após a moldagem os agregados foram sinterizados a 1200°C por três horas (ROSSI, 2009).

Tabela 2.2 – Proporções dos componentes em cada mistura.

MISTURA	RBSA	RBMC	RBAF	RBAG
70%			Resíduo de Bauxita	
30%	Sílica Ativa	Metacaulim	Areia Fina	Areia Grossa

Fonte: Adaptado de Rossi (2009).

Ainda conforme o autor, iniciou-se a produção dos concretos com posterior execução dos ensaios mecânicos e medidas das propriedades cerâmicas. Neste trabalho, os concretos apresentaram valores de resistência elevados. Verificou ainda, que nos ensaios de compressão axial e diametral, as rupturas do concreto produzido com seixo rolado,

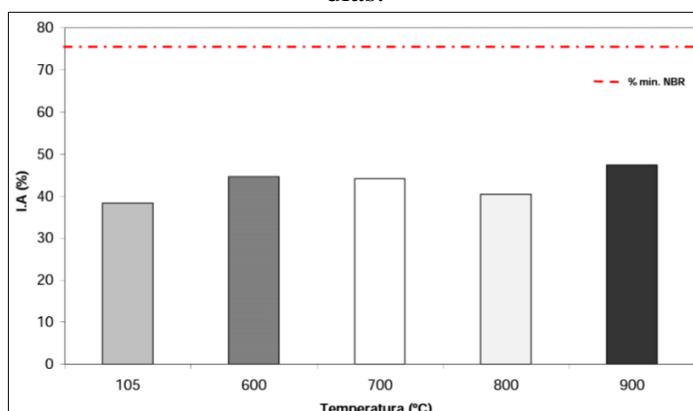
ocorreram no próprio agregado, enquanto naqueles produzidos com o agregado de RB, a ruptura ocorreu na pasta de cimento, afirmado assim, que o agregado produzido possui elevada resistência mecânica.

Em estudo Manfroi (2009), analisou a propriedade pozolânica do resíduo de bauxita. O trabalho realizou a caracterização do resíduo através dos ensaios de fluorescência de raios-X, difração de raios-X, análise térmica diferencial (ATD), granulometria à laser e massa específica.

Os ensaios de avaliação de atividade pozolânica através do consumo de hidróxido de cálcio, utilizando-se da análise térmica foram um diferencial executados em amostras do resíduo seco e calcinado nas temperaturas de 600°C, 700°C, 800°C e 900°C no tempo de uma hora. Na avaliação dos compostos hidratados em pastas produzidas com 5,10 e 15% de resíduo de bauxita em substituição ao cimento realizou-se os ensaios de difração de raios-X e análise térmica diferencial (MANFROI, 2009).

A Figura 2.17 apresenta os resultados da avaliação da atividade pozolânica. A formação de compostos hidratados e calor de hidratação em pastas mostraram que o resíduo de bauxita no estudo apresentou certa atividade pozolânica e conclui que é possível substituir parcialmente o cimento para produção de argamassas (MANFROI, 2009).

Figura 2.17 – Índice da atividade pozolânica do resíduo de bauxita com cimento aos 28 dias.



Fonte: Manfroi (2009).

Em estudo Santos (2011), propôs a utilização do resíduo de bauxita para produção de agregados leves, na Tabela 2.3 são apresentadas as composições de argila, sílica e biomassa em cinco composições diferentes. O autor exibiu através das análises pertinentes a esses materiais, que é possível produzir agregados com uma resistência mecânica e massa específica apropriada para produção de concretos.

Estes materiais podem ser comparados aos agregados naturais empregues na indústria da construção civil, desta forma podendo substituir agregados como o seixo rolado e a brita com a vantagem de não ser extraído da natureza, tendo em vista a contribuição na preservação ambiental e consumindo o passivo armazenado pela indústria da mineração do alumínio.

Tabela 2.3 – Composição percentual das matérias-primas.

AMOSTRAS	Resíduo de Bauxita (%)	SÍLICA (%)	ARGILA (%)	BIOMASSA (%)
M-10	55	25	10	10
M-15	50	25	10	15
M-20	45	25	10	20
M-25	40	25	10	25
M-30	35	25	10	30

Fonte: Santos (2011).

Na produção dos agregados sintéticos, em pesquisa desenvolvida por Rosário (2013), foi analisado a aplicação de agregado graúdo sintético de resíduo de bauxita em concreto, desenvolvendo um estudo de dosagem, propriedades e microestruturas.

A pesquisa foi realizada utilizando o resíduo de bauxita produzindo o agregado graúdo sintético em uma possível viabilidade de produção de um concreto com intuito de ser utilizado como insumo na indústria de construção civil. A produção dos agregados graúdos sintéticos foi desenvolvida a partir das seguintes proporções de matéria-prima, resíduo de bauxita em 60%, 20% de areia, 10% de argila e 10% biomassa, conforme a Figura 2.18. (ROSÁRIO, 2013).

Os estudos de Rosário (2013) apontam que os agregados sintéticos não apresentaram segregação ou exsudação em contato com o concreto fresco. Porém, resultados finais como de massa específica, resistência à tração por compressão diametral, resistência à compressão e resistência à tração na flexão do concreto apresentam valores satisfatórios, mas inferior aos concretos referência que utilizam seixo rolado como agregado. Quanto à resistência apresentado por idade, tanto entre sete dias como em 28 dias, os valores de resistência foram praticamente os mesmos.

A utilização de agregados sintéticos produzidos a partir do resíduo de bauxita em concretos, mesmo apresentando resultados inferiores, Viegas *et.al.*, (2019) afirmam que com o controle certo da temperatura e do teor de sílica para a sinterização, é possível produzir diferentes tipos de agregados, com resultados diversos de massa específica, alterando assim as medições de resistência.

Outro fator positivo está ligado a resistência à compressão dos corpos de prova de concreto. Os valores obtidos estão diretamente ligados ao agregado sintético, pois quanto mais denso o agregado maior é a resistência à compressão do concreto. Santos *et.al.*, (2014) afirmam que isso se dá devido a relação entre porosidade e resistência do próprio agregado quando aplicado ao concreto, diretamente ligado aos valores de massa específica.

Figura 2.18 – Resíduo de bauxita, areia, argila e carvão vegetal.



Fonte: Rosário (2013).

O concreto e os agregados foram analisados quanto a medidas das propriedades mecânicas e cerâmicas, e da análise de microestrutura da zona de transição pasta/agregado nos concretos produzidos. A autora apontou que os resultados foram pertinentes, sendo necessário estudos aprofundados sobre o agregado sintético, entretanto, no geral concluiu que existe um potencial para aplicação na construção civil.

Em estudo Ferreira (2019), avaliou a resistência à compressão dos concretos com substituições parciais de resíduo de bauxita como agregado miúdo, após o estudo das características químicas do resíduo e sua distribuição granulométrica em percentuais de 30%, 50% e 60%, conforme a Figura 2.19.

Figura 2.19 – Corpos de Prova com composições de 30% e 50% de RB.



Fonte: Ferreira (2019).

Os dados apresentaram que o percentual de 30% de substituição do agregado miúdo teve o melhor desempenho de resistência mecânica à compressão, o cimento utilizado foi o CP-II-E-40 e cura submersa. Na Figura 2.20 o corpo de prova no ensaio de resistência a compressão axial na idade 7 dias. Os resultados de análise de FRX, pontuaram a

diminuição de sulfato com aumento de teor de resíduo de bauxita no concreto (FERREIRA, 2019).

Figura 2.20 – Ensaio de compressão uniaxial e após o rompimento.



Fonte: Ferreira (2019).

No estudo de Reis (2014), investigou as características físico-químicas e mineralógicas dos agregados sintetizados a partir da mistura do resíduo da bauxita, argila, areia e carvão vegetal em quatro composições. Na Figura 2.21 o agregado sintético produzido pelo autor.

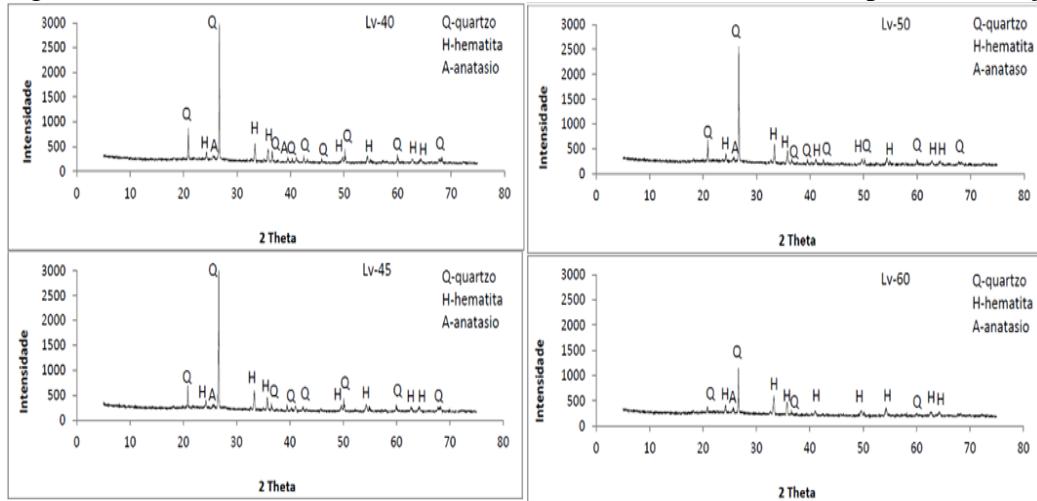
Figura 2.21 – Agregado Sintético.



Fonte: Reis (2014).

As matérias primas foram pré-tratadas e analisadas por fluorescência de raios-X, difração de raios-X, análise térmica e granulométrica. As amostras foram calcinadas a 1200 °C por quatro horas, após a calcinação foram submetidas as análises por difratometria de raios-X, fluorescência de raios-X, análise térmica diferencial e microscopia eletrônica de varredura para caracterização e testes físicos. Os agregados sintéticos produzidos e as suas análises após a sinterização estão representadas na Figura 2.22, foram identificadas as fases cristalinas de quartzo e hematita.

Figura 2.22 – DRX das amostras LV- 40, LV- 45, LV-50, LV- 60 após sinterização.

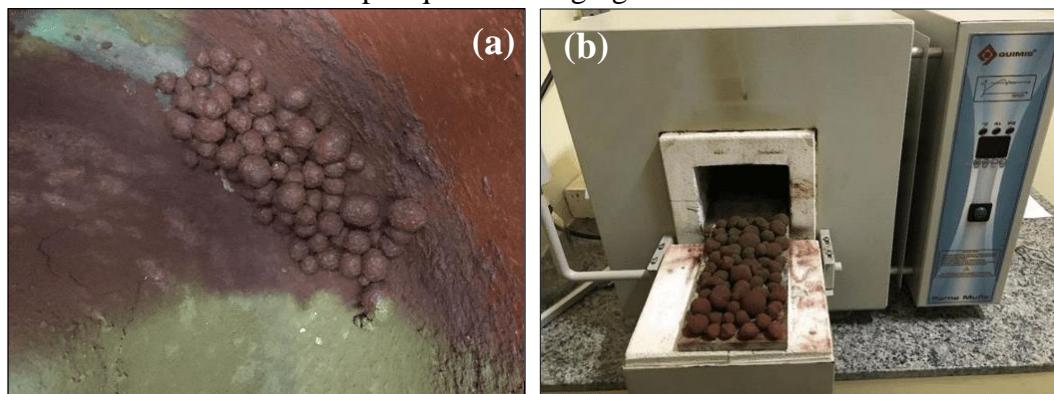


Fonte: Reis (2014).

Em pesquisa realizada por Souza *et al.*, (2018), foi produzido os agregados sintéticos em oito misturas com variadas proporções de resíduo de bauxita, argila, carvão vegetal e cinza volante, conforme apresentados na Tabela 2.4 e na Figura 2.23. Os agregados foram queimados em forno a 900° C, após a calcinação foi realizado a execução dos ensaios de porosidade aparente, massa específica e absorção de água.

Durante o estudo foi observado que a temperatura de calcinação é um fator determinante que interfere diretamente na porosidade do agregado e sua resistência, os autores concluíram que a diferença de 400°C fez com que o agregado não atingisse a porosidade e a resistência desejada.

Figura 2.23 – (a) Formação de pelotas das misturas na betoneira; (b) Forno tipo mufla após queima do agregado.



Fonte: SOUZA *et al.*, (2018).

Tabela 2.4 - Teor de material em cada amostra.

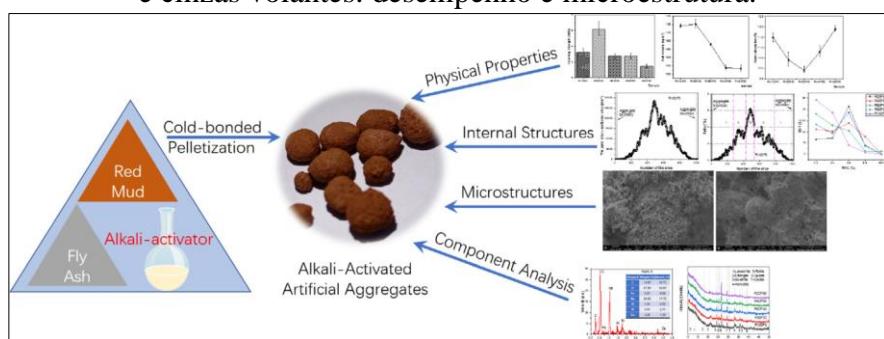
Amostras	RB (%)	Cinza (%)	Argila (%)	Carvão (%)
Amostra 1	82	8	-	10
Amostra 2	74	16	-	10
Amostra 3	66	24	-	10
Amostra 4	58	32	-	10
Amostra 5	77	8	5	10
Amostra 6	69	16	5	10
Amostra 7	61	24	5	10
Amostra 8	53	32	5	10

Fonte: SOUZA *et al.*, (2018).

Em estudos desenvolvidos por Tian *et al.* (2021), realizou a produção de agregados artificiais e analisou o desempenho e microestrutura. Os agregados foram sintetizados com resíduo de bauxita, cinza volante e uma solução de silicato de sódio. A base principal de resíduo de bauxita foi proposto para substituir os agregados naturais, conforme a Figura 2.24.

Os autores concluíram que é viável sintetizar agregados artificiais com alto volume de RB usando tecnologia de ativação alcalina. As resistências dos agregados sintetizados ficaram na faixa de 1,46-6,18 MPa, com uma macroestrutura estável formada pelos produtos de reação ativados por álcalis e as partículas de matéria-prima não reagidas, fornecendo uma fonte de areia de construção e o reaproveitamento de resíduo de bauxita em grandes quantidades. Entre os agregados produzidos, as propriedades mecânicas dos agregados de composição com 80% de resíduo e 20% de cinza foram ótimas (6,18 MPa). Com base nos resultados dos testes de absorção de água de 1 hora e na densidade, todos os agregados produzidos foram classificados como agregados leves.

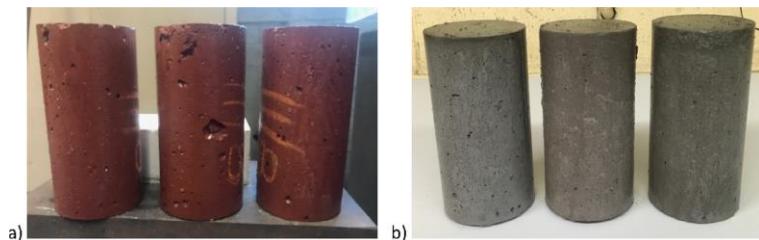
Figura 2.24 - Agregados artificiais ativados por álcalis fabricados por resíduo de bauxita e cinzas volantes: desempenho e microestrutura.



Fonte: Tian *et al.* (2021).

Tang *et. al.* (2018), investigou a influência do resíduo da bauxita nas propriedades frescas e endurecidas e no comportamento micro estrutural do concreto auto-adensável. O resíduo de bauxita teve um impacto ligeiramente negativo nas propriedades frescas do concreto, com um aumento da necessidade aditivos superplasticificante no concreto de RB para atender aos requisitos do CAA. Além disso, o resíduo da bauxita não afetou negativamente as resistências mecânicas do concreto. Na Figura 2.25 é expostos os CAA realizados no estudo.

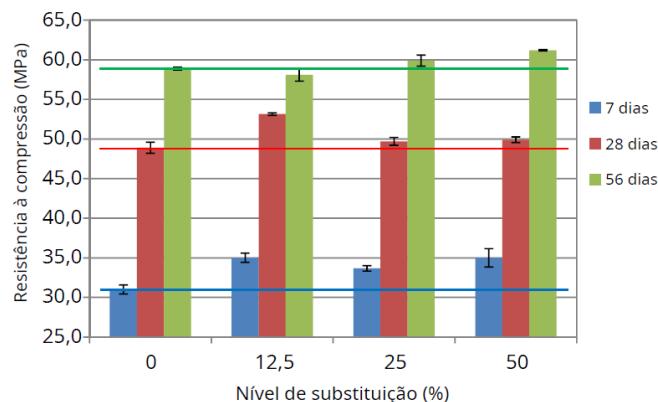
Figura 2.25 – (a) Amostras de concreto de resíduo de bauxita, (b) amostras de concreto de controle.



Fonte: Tang *et. al.* (2018).

Aparentemente, um aumento no teor de resíduo de bauxita levaria a pequenos aumentos na resistência à compressão e módulo de elasticidade, e uma ligeira diminuição na resistência à tração. Conforme os resultados, os autores determinaram que a adição de resíduo de bauxita não afetou negativamente o desempenho geral do concreto. Na Figura 2.26 demonstra a resistência com passar dos dias. Embora fosse necessário mais superplasticificante, o concreto com 50% de RB teve o melhor desempenho em termos de propriedades mecânicas que portanto, tornou-se uma mistura recomendada para futuros estudos e uso.

Figura 2.26 - Comparaçao de resultados de ensaios de resistência à compressão.



Fonte: Tang *et. al.* (2018).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são evidenciados os materiais, bem como os equipamentos utilizados, enfatizando os métodos empregados na caracterização dos materiais e a metodologia para dosagem dos concretos com agregado sintético, com intuito de obter uma destinação comercial ao agregado sintético de resíduo de bauxita, e, por consequência, contribuir para melhoria do meio ambiente.

A pesquisa é caracterizada como experimental que faz parte de um projeto maior, onde este agregado sintético de resíduo foi preparado, tendo como objeto de estudo o uso e a aplicação do ASRB, obtido através do resíduo de bauxita, é utilizado na composição de concretos com traços pré-definidos, com intuito de avaliar as propriedades mecânicas dos concretos com ASRB, enquanto material alternativo. Tendo como referência comparativa o concreto convencional com agregado natural seixo utilizado no cotidiano e comercializado na construção civil.

As variáveis e as formas de controle foram definidas em conformidade com as normas técnicas da ABNT, realizando um estudo comparável dos resultados da caracterização física do agregado natural e do agregado sintético, e dos resultados de resistência mecânica dos concretos com ASRB e concreto de referência.

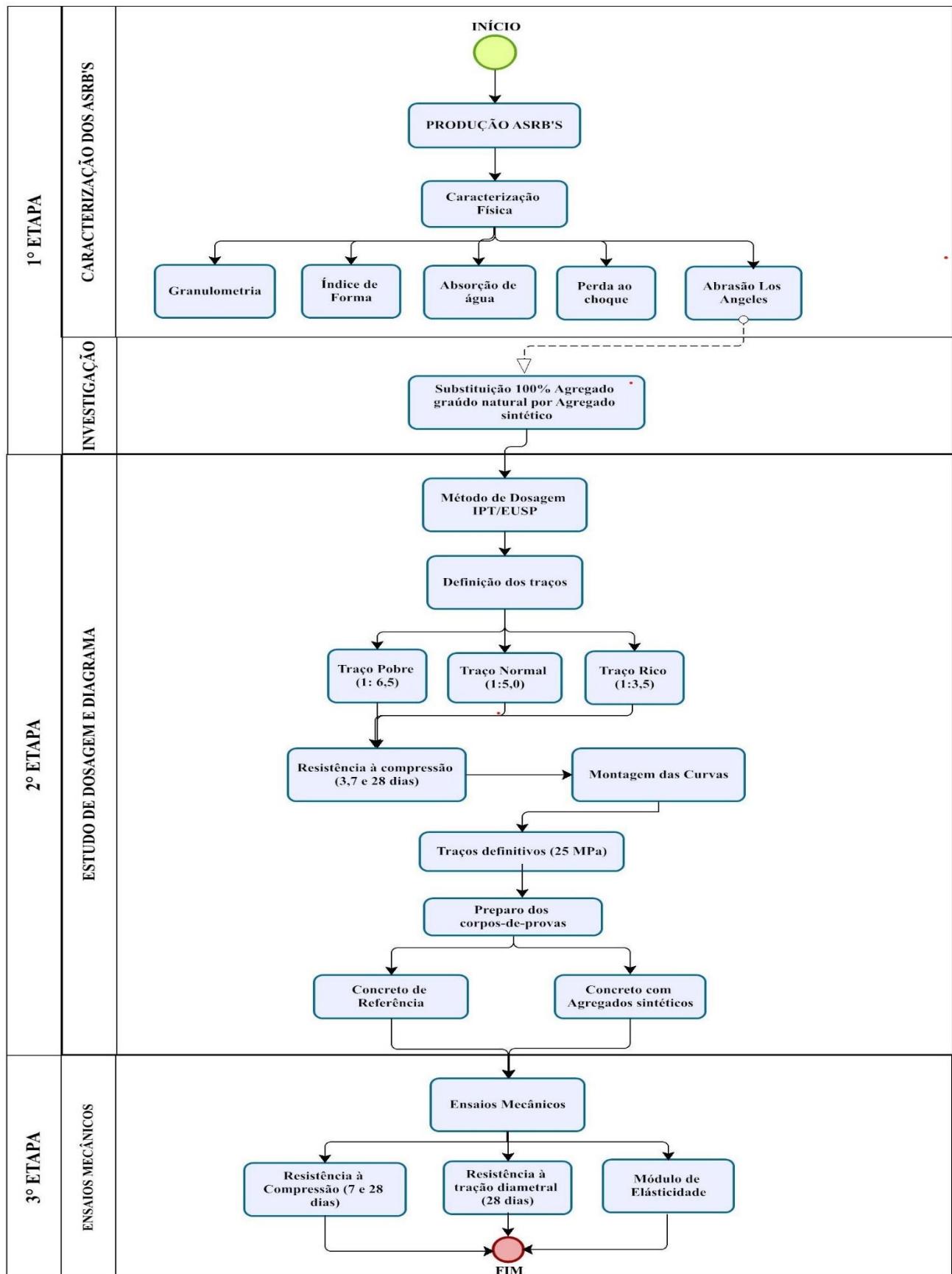
#### 3.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

O estudo para análise da viabilidade técnica do ASRB foi divido em três etapas:

- 1<sup>a</sup> ETAPA: Refere-se à caracterização dos materiais utilizados, a caracterização física dos ASRB's, fornecendo dados que servirão de base para a pesquisa, além de serem evidenciadas as investigações adotadas na pesquisa;
- 2<sup>a</sup> ETAPA: Diz respeito à produção dos concretos, onde foi definido através de um estudo de dosagem dos traços e a análise da substituição de 100% do agregado graúdo natural por ASRB;
- 3<sup>a</sup> ETAPA: São apresentados os desempenhos mecânicos dos concretos. A partir da realização dos citados ensaios será possível comparar o desempenho dos corpos-de-prova referência e com o ASRB.

A metodologia experimental, esquematizada na Figura 3.1, foi elaborada para facilitar a visualização e compreensão das etapas, ensaios e passos adotados na pesquisa.

Figura 3.1 –Fluxograma do desenvolvimento da pesquisa.



Fonte: Autora, 2022.

O ASRB foi submetido a diversos ensaios de caracterização, assim como os ensaios mecânicos dos concretos confeccionado com o ASRB e o de referência. A Tabela 3.1 evidencia o resumo de suas finalidades e normas, quando existentes.

Tabela 3.1 – Resumo dos ensaios realizados, finalidade e referências normativas.

Análise Física		
Ensaio	Finalidade	Norma/Métodos
Granulometria	Composição granulométrica	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Indice de Forma	Análise da forma	NBR 7809 (ABNT, 2019)
Absorção de água	Análise da densidade e absorção	NBR 16917 (ABNT, 2021)
Perda ao Choque	Análise da perda ao choque	NBR 5564 (ABNT, 2021)
Abrasão Los Angeles	Análise da perda de massa	NBR 16974 (ABNT, 2021)
Análise Mecânica		
Ensaio	Finalidade	Norma/Métodos
Resistência à compressão axial	Análise da resistência mecânica dos concretos	NBR 5739 (ABNT, 2018)
Resistência à tração diametral	Análise da resistência mecânica dos concretos	NBR 7222 (ABNT, 2011)
Ensaio de Módulo de Elasticidade	Análise da resistência elástica dos concretos	NBR 8522-1 (ABNT, 2021)

Fonte: Autora, 2022.

## 3.2 MATERIAIS UTILIZADOS

### 3.2.1 Cimento Portland

Nesta pesquisa o aglomerante utilizado é o cimento Portland IV-32 RS, de acordo com a NBR 16697 (ABNT, 2018), com massa específica de 3,10g/cm<sup>3</sup>.

Este cimento foi escolhido por contém o maior teor de materiais pozolânicos, numa variação de 15 a 50% de material pozolânico, de modo a atender aos requisitos de resistência a sulfatos; facilitando o entendimento da atuação do ASRB no concreto.

Para efeito de caracterização foi realizado o ensaio de massa específica NBR 16605 (2017), ensaio de tempo de pega, conforme a NBR 16607 (2018) e índice de finura, de

acordo com NBR 11579 (2012), conforme descritos na Tabela 3.2. As características relacionadas ao cimento CP IV-32-RS foram realizadas no laboratório, para fins de confirmar sua utilização no presente estudo.

Tabela 3.2 – Caracterização cimento CP IV-32 RS.

Cimento	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	Tempo de Pega		Índice de Finura (%)
		Inicio ≥ 60 (min)	Fim ≤ 600 (min)	
CP IV RS	2,89	177	331	3,33

Fonte: Autora, 2022.

### 3.2.2 Água

A água utilizada para moldagem dos corpos-de-prova e para a produção de concretos e cura deles no presente estudo, é proveniente do sistema de abastecimento da cidade de Belém-Pa.

### 3.2.3 Agregado Miúdo

Utilizou-se areia natural quartzosa proveniente dos leitos dos rios próximos à cidade de Belém para a confecção dos concretos. Esta areia passou pelo processo de secagem, com o auxílio de estufa e foi armazenada em tonéis. Para efeito de caracterização foi determinada sua massa unitária, distribuição granulométrica NBR NM 248 (ABNT, 2003) e massa específica segundo a NBR 16917 (2021) conforme apresentado na Tabela 3.3.

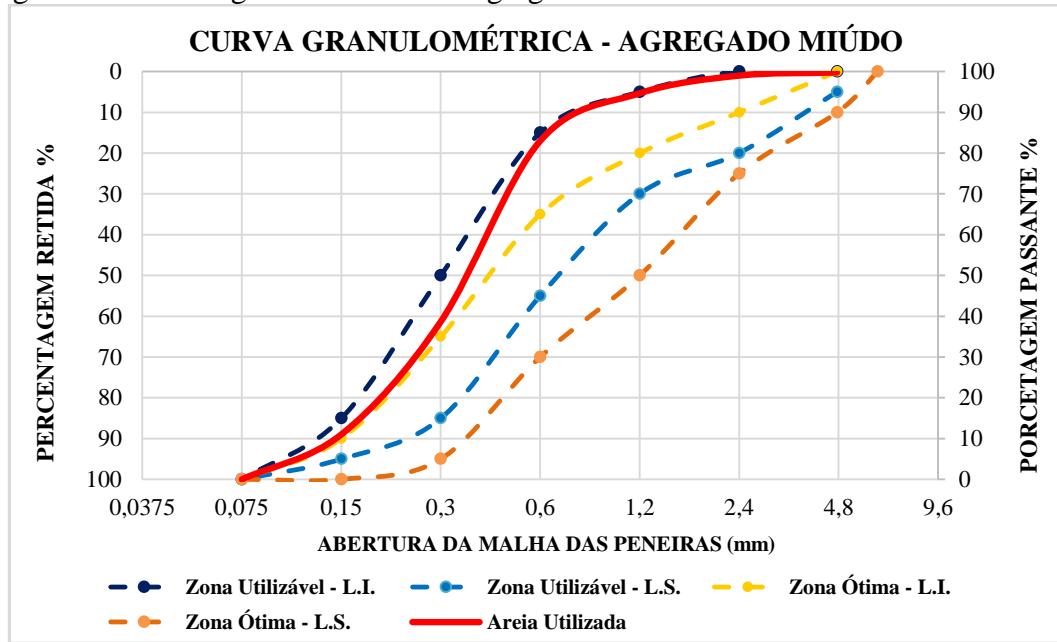
Tabela 3.3 – Composição granulométrica agregado miúdo (Areia).

Agregado Miúdo (Areia)				
Abertura das Peneiras (mm)	Massa Retida (g)	% Retida	% Retida Acumulada	Norma de Ensaio
<b>4,75</b>	0,70	0,23	0,23	
<b>2,36</b>	2,30	0,77	1,00	
<b>1,18</b>	13,00	4,33	5,33	
<b>0,6</b>	35,00	11,67	17,00	ABNT NBR NM 248 (2003)
<b>0,3</b>	133,00	44,33	61,33	
<b>0,15</b>	83,00	27,67	89,00	
Fundo	33,00	11,00	100,00	
	300	100		
Massa Específica		2,25 g/cm <sup>3</sup>	ABNT NBR 16917 (2021)	
Massa Unitária		1,68 g/cm <sup>3</sup>	ABNT NBR 16972 (2021)	
Módulo de Finura		1,74	ABNT NBR NM 248 (2003)	
Dimensão Máxima		1,18 mm	ABNT NBR NM 248 (2003)	

Fonte: Autora, 2022.

A curva granulométrica com os respectivos limites superiores e inferiores utilizáveis e limites superiores e inferiores ótimos do agregado miúdo estão apresentados na Figura 3.2. Através dos resultados obtidos observa-se que o agregado miúdo natural apresenta uma distribuição contínua, variando entre as zonas utilizáveis e ótimas.

Figura 3.2 - Curva granulométrica do agregado miúdo e limites da NBR NM 7211.

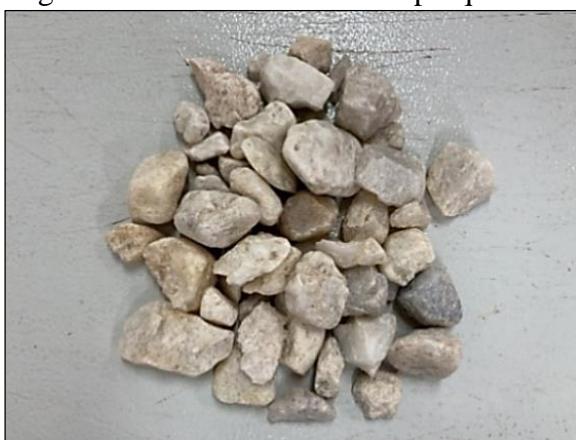


Fonte: Autora, 2022.

### 3.2.4 Agregado Graúdo

Foi utilizado na confecção do concreto referência o agregado graúdo natural de origem silicosa, conforme a Figura 3.3, nomeado de seixo rolado e que atende aos requisitos descritos na NBR 7211 (ABNT, 2009). A Tabela 3.4 apresenta os resultados dos ensaios granulometria, massa específica, massa unitária, módulo de finura dimensão máxima, coeficiente uniforme e índice de vazios.

Figura 3.3 – Seixo utilizado na pesquisa.



Fonte: Autora, 2022.

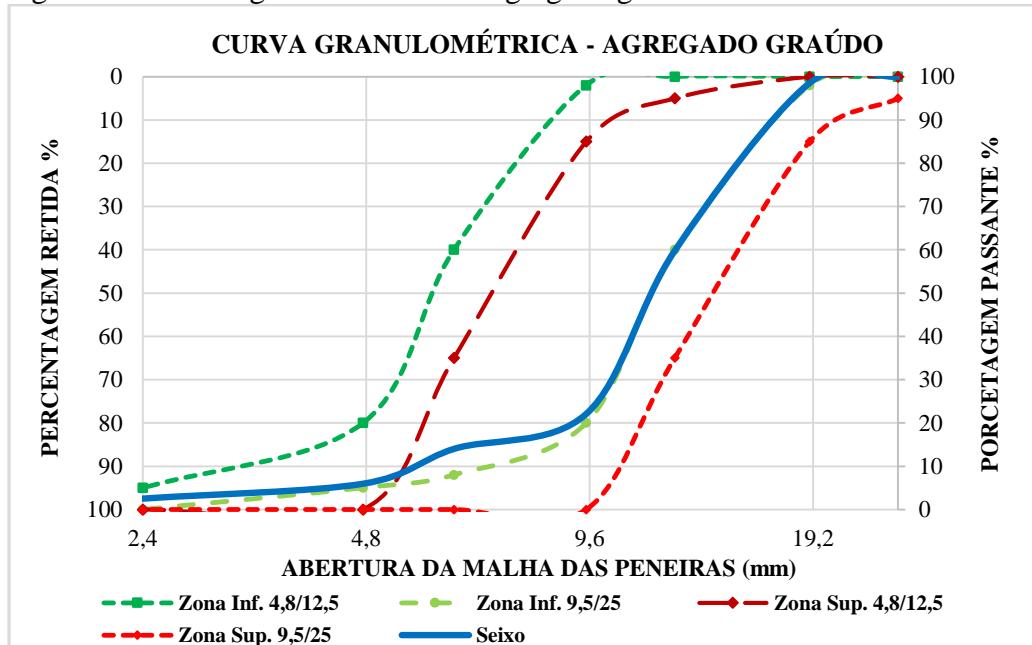
Tabela 3.4 – Distribuição granulométrica Seixo.

Agregado Graúdo (Seixo)				
Abertura das Peneiras (mm)	Massa Retida (g)	% Retida	% Retida Acumulada	Norma de Ensaio
<b>37,5</b>	0,00	0,00	0,00	ABNT NBR NM 248 (2003)
<b>25</b>	0,00	0,00	0,00	
<b>19</b>	73,97	1,48	1,48	
<b>12,5</b>	1938,94	38,78	40,26	
<b>9,5</b>	1882,72	37,65	77,91	
<b>6,3</b>	404,29	8,09	86,00	
<b>4,75</b>	402,31	8,05	94	
<b>2,36</b>	171,68	3,43	97	
<b>1,18</b>	76,42	2,00	99	
<b>0,6</b>	19,43	0,00	99	
<b>0,3</b>	8,60	0,00	100	
<b>0,15</b>	3,69	0,00	100	
Fundo	0,00	0,00	100	
	17,95	0,36	100	
Massa Específica	2,60 g/cm <sup>3</sup>			ABNT NBR 16917 (2021)
Massa Unitária	1,61 g/cm <sup>3</sup>			ABNT NBR 16972 (2021)
Módulo de Finura	6,69			ABNT NBR NM 248 (2003)
Dimensão Máxima	12,5 mm			ABNT NBR NM 248 (2003)
Coeficiente de Uniformidade	2,55 mm			ABNT NBR NM 248 (2003)
Índice de Vazios	37,97%			ABNT NBR 16972 (2021)

Fonte: Autora, 2022.

A curva granulométrica com as respectivas zonas superiores e inferiores 4,8/12,5 e zonas superiores e inferiores 9,5/25 do agregado graúdo estão apresentados na Figura 3.4. Através dos resultados obtidos observa-se que o agregado graúdo natural apresenta uma distribuição contínua, se concentrando na zona inferior 9,5/25.

Figura 3.4 - Curva granulométrica do agregado graúdo e limites da NBR NM 7211.

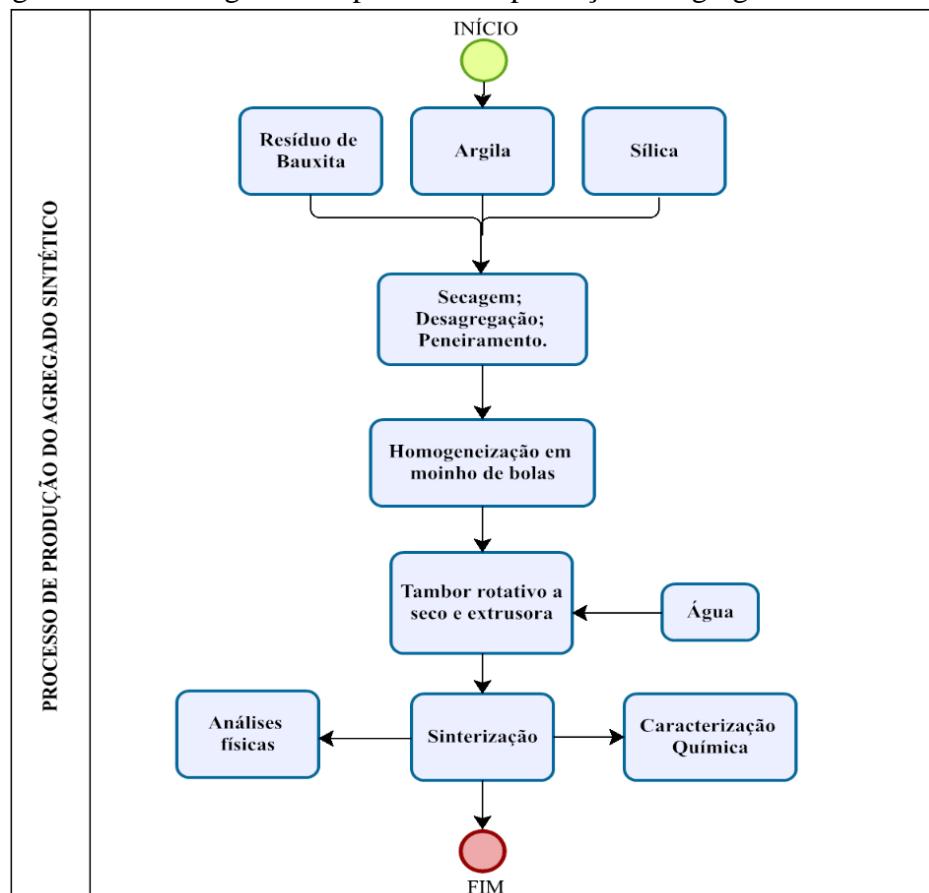


Fonte: Autora, 2022.

### 3.2.5 Agregado Sintético Resíduo de Bauxita

Os agregados sintéticos de resíduo de bauxita utilizado nesta pesquisa foram produzidos no laboratório de Engenharia química (LEQ), com as matérias primas, resíduo de bauxita, argila e sílica em diferentes proporções conforme a Tabela 3.5. Na Figura 3.5 é apresentado o fluxograma do processo de produção do agregado sintético.

Figura 3.5 – Fluxograma do processo de produção do agregado sintético.



Fonte: Autora, 2022.

Tabela 3.5 – Composição, massa específica, temperatura e tempo de sinterização das amostras de agregado.

Amostra	Resíduo de bauxita (%)	Sílica (%)	Argila (%)	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	Temperatura (°C)	Tempo (h)
ASRB-90	95 – 90	0 - 5	5	> 2,0	1050 - 1250	3
ASRB-80	85 – 80	10 - 15	5	> 1,5 e < 2,0	1050 - 1250	3
ASRB-70	75 – 70	20 - 25	5	< 1,5	1050 - 1250	3

Fonte: Autora, 2022.

Os agregados apresentados na Tabela 3.5 são baseadas nos resultados obtidos neste projeto, que indicaram a possibilidade de produzir agregado sintético em diferentes proporções das matérias-primas (resíduo de bauxita, sílica e argila) e sobretudo, nas

especificações dos agregados utilizados comercialmente (leve, normal e pesado). Ademais, a aplicação das amostras ASRB-90, ASRB-80 e ASRB-70 tem como propósito de aumentar a produção de agregados sintéticos e o consumo de resíduo de bauxita.

Figura 3.6 – (a) ASRB-70, (b) ASRB-80 e (c) ASRB-90.



Fonte: Autora, 2022.

Na produção das amostras ASRB-90, ASRB-80 e ASRB-70 o controle foi realizado através das faixas de composição, massa específica, temperatura e tempo de sinterização, com a finalidade de que esteja dentro dos parâmetros estabelecidos para uma possível comercialização do produto. Todos os ensaios de caracterização química e mineralógica, assim como a produção do ASRB, foram realizados em parceira com o Laboratório de Engenharia Química (LEQ), da Universidade Federal do Pará, que estão integrando ao projeto de estudo e desenvolvimento dos agregados sintéticos proveniente de resíduo de bauxita do convênio entre a HYDRO ALUNORTE e a UFPA.

### 3.3 MÉTODOS UTILIZADOS

#### 3.3.1 Caracterização Física

##### 3.3.2.1 Granulometria

A caracterização da distribuição granulométrica dos agregados, determina diversos parâmetros, a curva granulométrica, dimensão máxima, módulo de finura e o coeficiente

de uniformidade, além de classificar a largura do agregado. O ensaio de granulometria é baseado na NBR NM 248 (2003) e deve atender aos limites indicados do agregado graúdo para concreto de acordo com a NBR 7211 (2019). Para realização do ensaio foi utilizado o peneirador eletromecânico 8X2, conforme a Figura 3.7 e na Figura 3.8 após o ensaio.

Figura 3.7 – Peneirador eletromecânico.



Fonte: Autora, 2022.

Figura 3.8 – Distribuição granulométrica ASRB-90.



Fonte: Autora, 2022.

### 3.3.2.2 Índice de Forma

Para uso no concreto, foi realizado o ensaio do índice de forma dos ASRB's, com a utilização do paquímetro para uma análise simplificada, que consiste na razão entre comprimento e espessura de 200 partículas conforme a ABNT NBR 7809 (2019). Na Figura 3.9 demonstra os paquímetros utilizados.

Figura 3.9 – Ensaio índice de forma dos ASRB's.



Fonte: Autora, 2022.

A Equação 3.1 foi utilizada para encontrar o índice de forma do agregado.

$$I = \frac{c_{m\acute{e}dio}}{e_{m\acute{e}dio}} \quad (3.1)$$

Onde:

I - é o índice de forma do agregado;

$c_{m\acute{e}dio}$  - é o comprimento médio, expresso em milímetros (mm) dos 200 grãos;

$e_{m\acute{e}dio}$  - é a espessura média, expressa em milímetros (mm) dos 200 grãos.

### 3.3.2.3 Densidade e absorção de água

A absorção de água dos agregados é um fator excepcional por interferir diretamente na dosagem de água no concreto. A determinação da absorção de água e densidade do agregado é realizada com base na norma NBR 16917 (2021), o ensaio determina os valores a partir da coleta de dados da massa seca, massa da amostra na condição saturada superfície seca e a massa da amostra submersa em água. Na Figura 3.10 mostra uma das etapas do ensaio.

Figura 3.10 – Ensaio de absorção de água ASRB-90.



Fonte: Autora ,2022.

A Equação 3.2 será utilizada para encontrar a absorção de água do agregado.

$$Abs = \frac{m_B - m_A}{m_A} \times 100 \quad (3.2)$$

Onde:

Abs - é a absorção de água, %;

$m_A$  - é a massa da amostra seca em estufa a  $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ , g;

$m_B$  - é a massa da amostra na condição saturada superfície seca, g.

Em posse dos dados referente absorção, calcula-se a densidade do agregado é através da Equação 3.3.

$$\rho_s = \frac{m_A}{m_B - m_C} \quad (3.3)$$

Onde:

$\rho_s$  - é a densidade do agregado na condição saturada superfície seca,  $\text{g/cm}^3$ ;

$m_A$  - é a massa da amostra seca em estufa a  $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ , g;

$m_B$  - é a massa da amostra na condição saturada superfície seca, g;

$m_C$  - é a massa da amostra submersa em água na condição saturada superfície seca, g.

### 3.3.2.4. Massa unitária e Índice de vazios

A massa unitária do agregado é a relação entre a massa e o volume de vazios entre os grãos. A importância de se conhecer a massa unitária dos agregados, está ligada na

dosagem de concretos, em que se procura determinar o volume mínimo de ligantes que deve ser utilizado com os agregados nas formulações de misturas cimentícias, além de caracterizar o empacotamento do agregado. Para determinação da massa unitária dos agregados sintéticos e o índice de vazios o ensaio foi realizado com base na norma NBR 16972 (2021), como demonstrado na Figura 3.11.

Figura 3.11 – Ensaio de massa unitária ASRB-70.



Fonte: Autora, 2022.

Em posse dos dados referente ao volume de grãos calcula-se a massa unitária do agregado através da Equação 3.4.

$$\rho_{ap} = \frac{mar - mr}{V} \quad \text{ou} \quad \rho_{ap} = (mar - mr) \cdot F \quad (3.4)$$

Onde:

$\rho_{ap}$  = massa unitária do agregado,  $\text{kg/m}^3$ ;

$mar$  = massa do recipiente mais o agregado,  $\text{kg}$ ;

$mr$  = massa do recipiente vazio,  $\text{kg}$ ;

$V$  - Volume do recipiente,  $\text{m}^3$ ;

$F$  - Fator para o recipiente,  $1/\text{m}^3$ .

Em posse dos dados referente a massa unitária, calcula-se o índice de vazios do agregado através da Equação 3.5:

$$Ev = \frac{100[(d_1\rho_w) - \rho_{ap}]}{d_1\rho_w} \quad (3.5)$$

$Ev$  = índice de volume de vazios nos agregados, %;

$d_1$  - massa específica relativa do agregado seco, determinada conforme as NBR 16916 e NBR 16917;

$\rho_w$  - massa específica de água,  $\text{kg/m}^3$ ;

$\rho_{ap}$  - massa unitária média do agregado,  $\text{kg/m}^3$ .

### 3.3.2.5 Abrasão Los Angeles

A resistência ao desgaste superficial dos grãos de agregado submetido ao atrito será obtida pelo ensaio de Abrasão “*Los Angeles*”, conhecido como perda de massa ou desgaste abrasividade conforme a NBR 16974 (2021). Na Figura 3.12 é demonstrado o tambor de abrasão “*Los Angeles*” e na Figura 3.13 o material antes do ensaio e após sofrer o desgaste abrasivo.

Figura 3.12 – Tambor de Abrasão *Los Angeles*.



Fonte: Autora, 2022.

Figura 3.13 – Antes do ensaio, após o desgaste à Abrasão do ASRB-90.



Fonte: Autora, 2022.

A Equação 3.6 é empregada para o cálculo dos desgastes dos grãos.

$$P = \frac{m-m_1}{m} \quad (3.6)$$

Onde:

P - Perda por abrasão, %;

m - Massa da amostra seca, g;

$m_1$  - Massa do material retido na peneira, g.

### 3.3.2.6 Perda ao Choque

O ensaio de perda ao choque foi realizado no equipamento de Treton, conforme o Anexo E da norma ABNT NBR 5564 (2021), o material é submetido a dez choques provocadas por queda livre de uma altura de 380 mm. Após dez choques, o material retido na peneira de 1,7 mm deve ser lavado em água corrente, secado em estufa por 24 h entre 105 °C e 110°C. Depois de resfriado, verificar sua massa final. Na Figura 3.14 demonstra o equipamento Treton utilizado e na Figura 3.15 preparação do material para execução do ensaio.

Figura 3.14 - Equipamento Treton.



Fonte: Autora, 2022.

Figura 3.15 – Preparação do ASRB-80 para o ensaio de perda ao choque.



Fonte: Autora, 2022.

Em posse dos dados a resistência ao choque foi calculada pela Equação 3.6

$$T = \frac{m_i - m_f}{m_f} \times 100 \quad 3.6$$

Onde:

T – é a resistência ao choque, %;

$m_i$  – é a massa inicial, g;

$m_f$  – é a massa final, g.

A perda ao choque dos agregados é a perda de massa das partículas após submetido à uma série de batidas. Na geologia, a propriedade que indica a capacidade de uma rocha resistir à impactos exercidos por corpos sólidos é chamada de tenacidade (FRAZÃO, 2002).

### 3.4 PRODUÇÃO DO CONCRETO

#### 3.4.1 Metodologia de Dosagem

Durante a produção dos concretos neste estudo, sucedeu o método de dosagem IPT/EPUSP (HELENE e TERZIAN, 1993), que consiste em ajustar, de forma experimental, a melhor proporção entre os agregados constituintes do traço e o teor de argamassa ideal. O método é elaborado para montar o diagrama de dosagem e então obter um traço de concreto para alcançar uma resistência especificada. Os traços são nomeados

de acordo com a relação entre a quantidade de cimento e a quantidade de agregado, são eles: normal (1:5), rico (1:3,5) e pobre (1:6,5). A partir da resposta obtida no ensaio de compressão, é possível estabelecer uma relação direta com as variáveis envolvidas.

O valor do abatimento do tronco de cone foi definido em função da trabalhabilidade requerida, a depender da aplicação e emprego do concreto dosado, para este estudo foi fixado em  $100\pm10$  mm, conforme a NBR 6118 (2014) e a quantidade de agregados inicial neste estudo foi adotado em 15kg para produção de 10 corpos-de-prova de 10x20 cm, buscando-se diferentes teores de argamassas até alcançar o teor final, como parâmetro de controle.

A Equação 3.7, foi utilizada para o encontrar o teor da argamassa.

$$\alpha = \frac{1+a}{a+m} \quad (3.7)$$

Onde:

$\alpha$  - teor de argamassa;

$m$  - Soma de areia e pedra ( $a+p$ );

$a$  - Areia.

### 3.4.2 Curva de Dosagem

Na elaboração do diagrama de dosagem, são necessários três pontos que correlacionassem a resistência à compressão, relação a/c, traço e consumo de cimento. A análise e determinação do teor de argamassa ideal para o traço é de grande importância para a adequabilidade do concreto quanto ao seu uso. A falta de argamassa proporciona um concreto com grande segregação, alta porosidade e falta de coesão, favorecendo no surgimento de falhas de concretagem. Entretanto, o excesso no teor, proporciona uma melhor aparência e coesão, todavia aumenta o custo da produção devido um maior consumo de cimento. Ademais, um elevado teor de argamassa proporciona a aparição de patologias de fissuração, geralmente por origem térmica ou por retração de secagem (NASCIMENTO, 2019).

Os materiais foram inicialmente pesados e separados, conforme a Figura 3.16, e situado na betoneira, devidamente imprimada, na respectiva ordem: 80% água, cimento, pedra, areia e os 20% restante da água. Após este procedimento foram realizados os

acréscimos consecutivos de argamassas na mistura até atingir o teor final como mostra na Figura 3.17 através do abatimento de cone e a Figura 3.18.

Figura 3.16 – Materiais para dosagem.



Fonte: Autora, 2022.

Na Tabela 3.6, pode-se observar as quantidades de cada componente dos traços normais para um teor de argamassa preliminar, e as quantidades de acréscimos de cimento e areia até chegar no teor de argamassa final.

Figura 3.17 – Abatimento troco de cone, *Slump Test*.



Fonte: Autora, 2022.

As melhores condições de coesão e envolvimento dos agregados ocorreu para um teor de 51% do seixo, 55% do ASRB-70, 59% do ASRB-80 e 61% ASRB-90. Percebe-se um aspecto homogêneo da superfície do concreto, com argamassa envolvendo os grãos do agregado graúdo.

Tabela 3.6 - Traços normais em função do teor de argamassa.

Teor de Argamassa	Traço Unitário			Qtde. De Areia (kg)		Qtde. De Cimento (kg)		Qtde.de Pedra (kg)
	Cimento	Areia	Pedra	Massa Total	Acréscimo	Massa Total	Acréscimo	
41%	1	1,46	3,54	6,19		4,24		15,00
43%	1	1,58	3,42	6,93	0,7434	4,39	0,1487	15,00
45%	1	1,70	3,30	7,73	0,7974	4,55	0,1595	15,00
47%	1	1,82	3,18	8,58	0,8576	4,72	0,1715	15,00
49%	1	1,94	3,06	9,51	0,9249	4,90	0,1850	15,00
50%	1	2,00	3,00	10,00	0,4902	5,00	0,0980	15,00
51%	1	2,06	2,94	10,51	0,5102	5,10	0,1020	15,00
53%	1	2,18	2,82	11,60	1,0855	5,32	0,2171	15,00
55%	1	2,30	2,70	12,78	1,1820	5,56	0,2364	15,00
57%	1	2,42	2,58	14,07	1,2920	5,81	0,2584	15,00
59%	1	2,54	2,46	15,49	1,4180	6,10	0,2836	15,00
61%	1	2,66	2,34	17,05	1,5635	6,41	0,3127	15,00
63%	1	2,78	2,22	18,78	1,7325	6,76	0,3465	15,00
65%	1	2,90	2,10	20,71	1,9305	7,14	0,3861	15,00

Fonte: Autora, 2022.

Figura 3.18 – (a) Análise comparativa do traço com teor de argamassa preliminar e (b) final.



Fonte: Autora, 2022.

Posteriormente foi realizado a determinação dos três traços complementares do diagrama de dosagem. Para esses dois traços foi estabelecida uma variação do teor de agregados de  $m \pm 1,5$  em relação ao traço normal, sendo a proporção 1:m do traço rico ficou 1:3,5, e para o traço pobre de 1:6,5.

As formas utilizadas para a moldagem dos corpos-de-prova são regulamentadas pela NBR 5738 (ABNT, 2018) e possuem formato cilíndrico com dimensões de 20 cm de altura e

10 cm de diâmetro. Seguiu-se com a desforma após 24h, submetendo as amostras à cura submersa, conforme as Figuras 3.19 e 3.20.

Figura 3.19 – Moldes dos corpos-de-prova.



Fonte: Autora, 2022.

Figura 3.20 – Tanque de cura.



Fonte: Autora, 2022.

Baseando nisto, iniciaram-se os testes aos 3 dias, sendo submetidos três corpos de prova de cada classe, sendo um contraprova caso houvesse divergência nos resultados ao ensaio resistência à compressão axial, conforme a NBR 5739 (ABNT, 2018), seguindo com o procedimento aos 7 dias e 28 dias, conforme a Tabela 3.7.

Tabela 3.7 – Quantidade de corpos de prova em relação aos dias de cura.

Teste à resistência à compressão após "x" dias de cura						
% Substituição	Nomeclatura	3 dias	7 dias	28 dias	Contraprova	Total
0	REF	3	3	3	1	10
100	ASRB-70	3	3	3	1	10
100	ASRB-80	3	3	3	1	10
100	ASRB-90	3	3	3	1	10

Fonte: Autora, 2022.

Nas idades de 3, 7 e 28 dias, os corpos de prova moldados, referentes aos traços normal, rico e pobre, foram rompidos à compressão conforme a NBR 5739 (2018), conforme apresentados os traços na Tabela 3.8. Atingir um traço de concreto que tenha resistência à compressão característica de 25 MPa aos 28 dias, tendo como referência o diagrama de dosagem feito pelo método.

Tabela 3.8 – Traços normais, ricos e pobres para montagem das curvas.

CLASSE	TRAÇO	AREIA	PEDRA	a/c	Consumo de Cimento (kg/m <sup>3</sup> )	Teor de argamassa (%)	CP'S
REF. POBRE	1:6,5	2,83	3,67	0,60	276,60		10
REF. NORMAL	1:5,0	2,06	2,94	0,50	345,74	51%	10
REF. RICO	1:3,5	1,30	2,20	0,45	450,46		10
ASRB 70 POBRE	1:6,5	3,13	3,37	0,65	260,44	55%	10
ASRB 70 NORMAL	1:5,0	2,30	2,70	0,55	324,46		10
ASRB 70 RICO	1:3,5	1,48	2,02	0,50	421,14		10
ASRB 80 POBRE	1:6,5	3,43	3,07	0,85	239,50	59%	10
ASRB 80 NORMAL	1:5,0	2,54	2,46	0,70	299,33		10
ASRB 80 RICO	1:3,5	1,66	1,84	0,65	383,75		10
ASRB 90 POBRE	1:6,5	3,58	2,92	1,00	218,89	61%	10
ASRB 90 NORMAL	1:5,0	2,66	2,34	0,80	275,06		10
ASRB 90 RICO	1:3,5	1,75	1,75	0,65	363,44		10

Fonte: Autora, 2022.

Os dados de resistência obtidos, foi possível iniciar a montagem do diagrama de dosagem. A correlação entre a resistência à compressão axial aos  $j$  dias ( $f_{cj}$ ) e a relação água/cimento é denominada como correções assumidas como “leis de comportamento”.

As leis apresentam as seguintes equações necessárias para o diagrama, “Lei de Abrams” (Equação 3.8); já entre o traço de concreto (m) e a relação água/cimento é denominada “Lei de Lyse” (Equação 3.9); enquanto entre o consumo de cimento e o traço é baseada na “Lei de Molinari” (Equação 3.10).

Equação “Lei de Abrams”

$$f_c = \frac{k_1}{k_2^{a/c}} \quad (3.8)$$

Equação “Lei de Lyse”

$$m = k_3 + k_4 \cdot a/c \quad (3.9)$$

Equação “Lei de Molinari”

$$C = 1000 / (k_5 + k_4 \cdot m) \quad (3.10)$$

Onde:

$f_{cj}$  - Resistência à compressão axial, à idade  $j$ , em MPa;

$a/c$  - Relação água/cimento em massa, em kg/kg;

$a$  - Relação agregado miúdo seco/cimento em massa, em kg/kg;

$m$  - Relação agregados secos/cimento em massa, em kg/kg;

$\alpha$  - teor de argamassa seca; deve ser constante para uma determinada situação, em kg/kg;

$p$  - relação agregados graúdos secos/cimento em massa, em kg/kg;

$k_1, k_2, k_3, k_4, k_5$  e  $k_6$  constantes que dependem exclusivamente dos materiais (cimento, agregados miúdos, agregados graúdos e aditivos).

A partir do diagrama de dosagem, é possível obter qualquer traço para as resistências à compressão desejadas. Nesta pesquisa, o diagrama de dosagem foi montado para obter o traço de concreto com as características predefinidas. Assim, foi possível definir ao traço definitivo para a resistência 25MPa aos 28 dias de idade, conforme a Tabela 3.9.

Tabela 3.9 – Traços unitários definidos para resistência de 25MPa aos 28 dias.

Classe	Cimento	Areia	Pedra	a/c	Teor de Argamassa	Consumo de Cimento
REF	1	2,315	3,185	0,55	51%	350,00 kg/m <sup>3</sup>
ASRB-70	1	3,13	3,38	0,65	55%	333,44 kg/m <sup>3</sup>
ASRB-80	1	1,95	2,05	0,65	59%	371,83 kg/m <sup>3</sup>
ASRB-90	1	1,75	1,76	0,65	61%	363,37 kg/m <sup>3</sup>

Fonte: Autora, 2022.

### 3.5. ENSAIOS MECÂNICOS DO CONCRETO

#### 3.5.1 Resistência à compressão axial

A resistência a compressão é a propriedade mais importante do concreto sendo tomada como base para avaliar a sua qualidade, e por estar relacionada com sua estrutura interna, indicando uma estimativa do desempenho em termos mecânicos e, indiretamente, da durabilidade (CABRAL, 2007).

A resistência à compressão foi obtida conforme está preconizado pela NBR 5739 (2018). Para estimá-la em um lote de concreto, são moldados e preparados corpos-de-prova para ensaio de acordo com a NBR 5738 (2021), conforme demonstrado na Figura 3.21.

Figura 3.21 – Ensaio de compressão axial ASRB-80.



Fonte: Autora, 2022.

A resistência à compressão deve ser calculada pela equação (3.7)

$$F_C = \frac{4F}{\pi x D^2} \quad (3.7)$$

Onde:

$F_C$  - é a resistência à compressão, expressa em megapascals (MPa);

$F$  - é a força máxima alcançada, expressa em newtons (N);

$D$  - é o diâmetro do corpo de prova, expresso em milímetros (mm).

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados com os corpos-de-prova nas idades de 3, 7 e 28 dias, e rompidos no Laboratório de Engenharia Civil da UFPA. As

velocidades de aplicação das cargas de cada ensaio são especificadas por NBR 5739 (2018).

### 3.5.2 Resistência à tração diametral

Neste ensaio, um corpo de prova cilíndrico, como o utilizado nos ensaios à compressão, é posicionado com seu eixo horizontal entre os pratos de uma máquina de ensaio, e a carga é aumentada até ocorrer a ruptura por tração indireta na forma de fendimento ao longo do diâmetro vertical (NEVILLE, 2016).

Segundo a NBR 7222 (ABNT, 2011), a carga deve ser aplicada continuamente e sem choques, com crescimento constante da tensão de tração a uma velocidade de 62 (0,05  $\pm$  0,02) MPa/s até a ruptura do corpo de prova, demonstrado na Figura 3.22.

Figura 3.22 – Ensaio de Tração ASRB-70.



Fonte: Autora, 2022.

A resistência à tração por compressão diametral deve ser calculada pela expressão:

$$f_{ct, sp} = \frac{2F}{\pi d \ell} \quad (3.8)$$

Onde:

$f_{ct, sp}$  - é a resistência à tração por compressão diametral, expressa com três algarismos significativos, em megapascals (MPa);

$F$  - é a força máxima obtida no ensaio, expresso em newtons (N);

$d$  - é o diâmetro do corpo de prova, expresso em milímetros (mm);

$\ell$  - é o comprimento do corpo de prova, expresso em milímetros (mm).

Os ensaios de resistência à tração por compressão diametral foram rompidos no Laboratório de Resistência dos Materiais no Instituto Federal do Pará - Campus Belém.

### 3.5.3 Módulo de Elasticidade

O ensaio do módulo de elasticidade será obtido conforme está preconizado na NBR 8522-1, sendo considerado nesta norma o módulo de deformação tangente inicial cordal a 30%  $f_c$ , ou outra tensão especificada em projeto.

Os ensaios do módulo de elasticidade foram realizados no Laboratório de Engenharia Civil da UFPa. As velocidades de aplicação das cargas de cada ensaio são especificadas por NBR 8522-1 (2021), demonstrados na Figura 3.23.

Figura 3.23 – Ensaio de módulo de elasticidade ASRB-90



Fonte: Autora, 2022.

O módulo de elasticidade de tensão fixa de cada corpo de prova, é dado pela Equação (3.9).

$$Eci, i = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} 10^{-3} = \frac{\sigma b - 0,5}{\varepsilon b - \varepsilon a} 10^{-3} \quad (3.9)$$

Onde:

$\sigma b$  - é a tensão maior, considerada como 30% da resistência à compressão, ou outra tensão específica em projeto;

0,5 - é o valor da tensão baixa, em MPa;

$\varepsilon b$  - é a deformação específica do concreto;

$\varepsilon a$  - é a deformação específica do concreto sob tensão básica.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

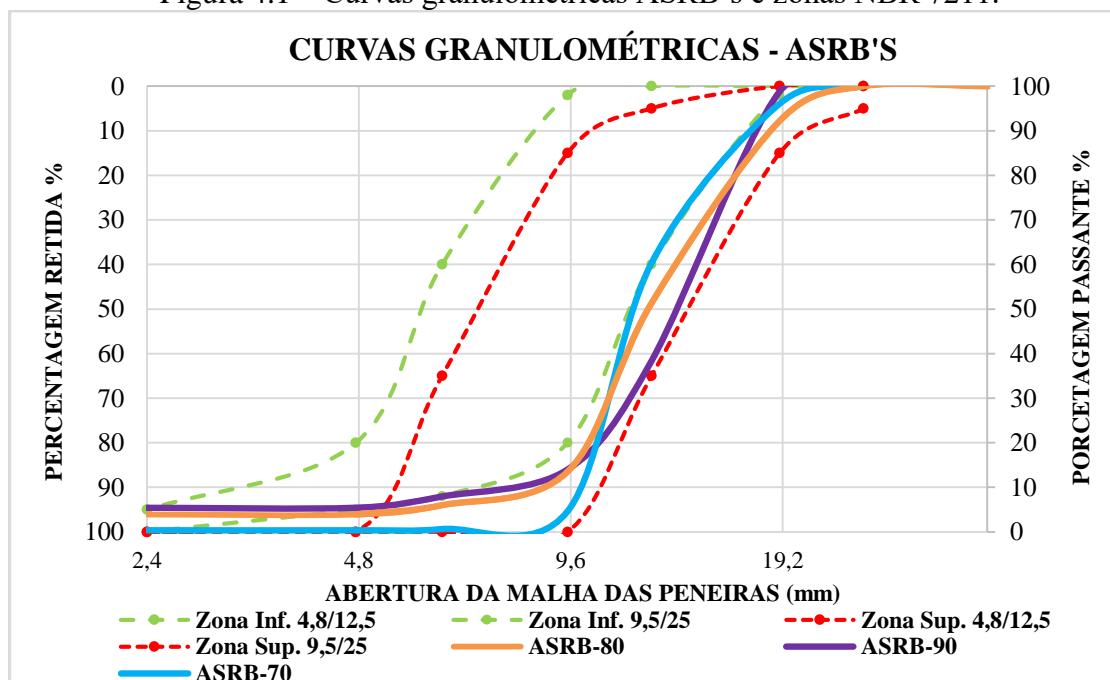
### 4.1 GRANULOMETRIA E CARACTERIZAÇÃO

A caracterização da composição granulométrica dos ASRB's e os resultados obtidos através dos ensaios de massa específica, massa unitária e índice de vazios estão apresentados nas Tabelas 4.1; 4.2 e 4.3, foram ensaiadas três amostras de 5000 g cada agregado, os dados mostram a média dos ensaios realizados.

A partir destes ensaios de granulometria observou-se que o comportamento dos agregados sintéticos é controlado quanto às dimensões máximas e mínimas, perfazendo seu comportamento nos intervalos limites previstos em norma. Constatou-se ainda que esses materiais têm um controle maior quando comparado com os agregados de origem natural utilizados, os quais tem um desempenho insatisfatório quando comparados aos limites estabelecidos em norma.

Na Figura 4.1 é possível observar as curvas granulométricas de cada ASRB, e as zonas estabelecidas pela NBR 7211. Transitando pelas zonas inferior 9,5/25 e zonas superior 9,5/25, apresentando uma certa continuidade na sua granulometria, sendo aceita para utilização em concreto como agregado graúdo de acordo com a norma supracitada.

Figura 4.1 – Curvas granulométricas ASRB's e zonas NBR 7211.



Fonte: Autora, 2022.

Tabela 4.1 – Composição granulométrica e caracterização do ASRB-70.

Agregado Sintético (ASRB-70)				
Abertura das Peneiras (mm)	Massa Retida (g)	% Retida	% Retida Acumulada	Norma de Ensaio
<b>37,5</b>	0,00	0,00	0,00	
<b>25</b>	0,00	0,00	0,00	
<b>19</b>	198,10	3,96	3,96	
<b>12,5</b>	1787,04	35,74	39,70	
<b>9,5</b>	2783,44	55,67	95,37	
<b>6,3</b>	199,83	4,00	99,37	
<b>4,75</b>	13,64	0,27	100,00	ABNT NBR NM 248 (2003)
<b>2,36</b>	0,00	0,00	100,00	
<b>1,18</b>	0,00	0,00	100,00	
<b>0,6</b>	0,00	0,00	100,00	
<b>0,3</b>	0,00	0,00	100,00	
<b>0,15</b>	0,00	0,00	100,00	
Fundo	17,95	0,36	100,00	
	5000	100		
Massa Específica	2,32 g/cm <sup>3</sup>		ABNT NBR 16917 (2021)	
Massa Unitária	1,61 g/cm <sup>3</sup>		ABNT NBR 16972 (2021)	
Módulo de Finura	6,97		ABNT NBR NM 248 (2003)	
Dimensão Máxima	12,5 mm		ABNT NBR NM 248 (2003)	
Coeficiente de Uniformidade	1,28		ABNT NBR NM 248 (2003)	
Índice de Vazios	32,17%		ABNT NBR 16972 (2021)	

Fonte: Autora, 2022.

Tabela 4.2 – Composição granulometria e caracterização do ASRB-80.

Agregado Sintético (ASRB-80)				
Abertura das Peneiras (mm)	Massa Retida (g)	% Retida	% Retida Acumulada	Norma de Ensaio
<b>37,5</b>	0,00	0,00	0,00	
<b>25</b>	0,00	0,00	0,00	
<b>19</b>	391,09	7,82	7,82	
<b>12,5</b>	2043,72	40,87	48,70	
<b>9,5</b>	1889,39	37,79	86,48	
<b>6,3</b>	376,53	7,53	94,01	
<b>4,75</b>	105,23	2,10	96,12	ABNT NBR NM 248 (2003)
<b>2,36</b>	0,00	0,00	96,12	
<b>1,18</b>	0,00	0,00	96,12	
<b>0,6</b>	0,00	0,00	96,12	
<b>0,3</b>	0,00	0,00	96,12	
<b>0,15</b>	0,00	0,00	96,12	
Fundo	194,04	3,88	100,00	
	5000	100		
Massa Específica	2,11 g/cm <sup>3</sup>		ABNT NBR 16917 (2021)	
Massa Unitária	1,61 g/cm <sup>3</sup>		ABNT NBR 16972 (2021)	
Módulo de Finura	6,71		ABNT NBR NM 248 (2003)	
Dimensão Máxima	19 mm		ABNT NBR NM 248 (2003)	
Coeficiente de Uniformidade	1,69		ABNT NBR NM 248 (2003)	
Índice de Vazios	35,05%		ABNT NBR 16972 (2021)	

Fonte: Autora, 2022.

Tabela 4.3 – Composição granulométrica e caracterização do ASRB-90.

Agregado Sintético (ASRB-90)				
Abertura das Peneiras (mm)	Massa Retida (g)	% Retida	% Retida Acumulada	Norma de Ensaio
37,5	0,00	0,00	0,00	
25	0,00	0,00	0,00	
19	62,81	1,26	1,26	
12,5	3020,55	60,41	61,67	
9,5	1216,77	24,34	86,00	
6,3	302,81	6,06	92,06	
4,75	126,28	2,53	94,58	ABNT NBR NM
2,36	0,85	0,02	94,60	248 (2003)
1,18	0,00	0,00	94,60	
0,6	0,00	0,00	94,60	
0,3	0,00	0,00	94,60	
0,15	0,00	0,00	94,60	
Fundo	269,93	5,40	100,00	
	5000	100		
Massa Específica	1,79 g/cm <sup>3</sup>			ABNT NBR 16917 (2021)
Massa Unitária	1,61 g/cm <sup>3</sup>			ABNT NBR 16972 (2021)
Módulo de Finura	6,55			ABNT NBR NM 248 (2003)
Dimensão Máxima	12,5 mm			ABNT NBR NM 248 (2003)
Coeficiente de Uniformidade	1,95			ABNT NBR NM 248 (2003)
Índice de Vazios	39,39%			ABNT NBR 16972 (2021)

Fonte: Autora, 2022.

Devido a amostra ASRB-90 ser mais porosa que as outras duas, isso influenciou em um material mais rígido e consequentemente mais quebradiço, com os choques das partículas no jogo de peneiras no momento do ensaio, tem-se a produção maior de finos da amostra, o que explica a maior quantidade de material no fundo em relação as outras duas amostras. E seu formato cilíndrico dificultou a passagem do material nas respectivas peneiras, resultando posteriormente na trabalhabilidade do concreto no estado fresco e endurecido.

## 4.2 ÍNDICE DE FORMA

O valor do índice de forma de um agregado influencia diretamente, no consumo de cimento Portland e na trabalhabilidade no estado fresco de um concreto, além de influenciar no estado endurecido do concreto no desempenho da sua resistência mecânica ( $f_{ck}$ ), tendo um valor maior relacionado ao índice de vazios. As formas lamelares e alongada – lamelar apresentam maior consumo e menor trabalhabilidade.

Os valores limites do IF (índice de forma) de acordo com a NBR 7809 (2019), estão descritos na Tabela 4.4, assim como estão apresentados os resultados das médias dos ensaios dos agregados. Todas as amostras de agregado sintético de resíduo de bauxita

apresentaram classificação ideal para utilização em concreto de acordo com a norma supracitada, no entanto em comparação ao seixo (forma arredonda) e os agregados sintéticos (forma alongada-lamelar), os agregados de bauxita vão apresentar maior consumo de cimento, diminuindo a trabalhabilidade e aumentando o índice de vazios.

Tabela 4.4 – Resultados Índice de forma dos agregados.

Material	Média	IF	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação
SEIXO	17,91	2,01	4,34	0,24
	8,93			
ASRB-70	15,83	1,37	3,68	0,37
	11,39			
ASRB-80	22,18	1,74	5,89	0,25
	12,53			
ASRB-90	19,07	1,61	6,04	0,27
	11,99			
IF ideal		IF < 1,8 mm		ABNT NBR 7809 (2019)
IF aceitável		1,8 mm < IF < 3,0 mm		ABNT NBR 7809 (2019)
IF Inadequado		IF > 3,0 mm		ABNT NBR 7809 (2019)

Fonte: Autora, 2022.

### 4.3 ABSORÇÃO DE ÁGUA

A absorção de água de um agregado infere não apenas na dosagem do concreto, como na sua resistência mecânica. Os resultados das médias dos ensaios de absorção dos agregados estão demostrados na Tabela 4.5 e na Figura 4.3.

Conforme os resultados obtidos no ensaio de absorção de água dos agregados, foi identificado que o ASRB-80 e o ASRB-90 tiveram valores de absorção com valores próximos de acordo com a média, uma diferença média de 5,83 % e 9,07 % se comparados com os valores das amostras ASRB-70 e o agregado natural seixo, que foram de 2,60% e 1,97%, tiveram valores acima do esperado. A norma estabelece que o valor de absorção de água de um agregado não deve ser superior a 10%, somente a amostra ASRB-90 ficou acima do representativo.

Tabela 4.5 – Resultados médios de absorção de água dos agregados.

Amostras	Absorção (%)	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação
SEIXO	1,97	0,19	0,06
ASRB-70	2,60	0,19	0,06
ASRB-80	8,12	0,75	0,08
ASRB-90	11,35	0,22	0,02

Fonte: Autora, 2022.

#### 4.4 ABRASÃO LOS ANGELES

Os dados dos ensaios de desgaste abrasividade dos agregados estão apresentados na Tabela 4.6 e na Figura 4.4 conforme estabelecido pela norma NBR 16974 (2021).

Tabela 4.6 – Resultados do ensaio Abrasão “Los Angeles”.

Material	Graduação	Nº de Esferas	Desgaste (%)
SEIXO	F	11	56,01
ASRB-70	F	11	32,50
ASRB-80	F	11	36,09
ASRB-90	F	11	38,08

Fonte: Autora, 2022.

De posse dos resultados, o agregado natural seixo é considerado desapropriado estabelecido em norma, não atingindo o valor menor ou igual de 50% de desgaste abrasividade. Enquanto aos agregados sintéticos, amostra ASRB-90 obteve o maior valor de perda de massa (38% em média), ela apresenta uma maior porosidade, consequentemente mais rígida e frágil, por conter essas características interferiu diretamente na resistência mecânica devido apresentar maior índice de vazios internamente, entretanto, ela encontra-se inserida para utilização, atingindo um valor menor que 50% de perda de massa, estabelecido pela norma.

Figura 4.2 – Resultado desgaste abrasão dos agregados.



Fonte: Autora, 2022.

#### 4.5 PERDA AO CHOQUE

O ensaio de perda ao choque pelo equipamento de Treton, estabelecido pelo Anexo E da NBR 5564 (2021), é considerado um dos ensaios opcionais no lastro ferroviário. A perda ao choque, sendo um ensaio de resistência, é um ensaio que complementa o ensaio de abrasão Los Angeles, tende a ser maior quanto ao desgaste à abrasão. O ensaio determina as médias do índice de tenacidade Treton máximo no valor de 25%, porém caso o agregado não atinja o valor estabelecido, a norma não implica na rejeição do agregado, fica a critério do usuário a decisão quanto à sua aceitação. Os resultados das médias do ensaio estão apresentados na Tabela 4.7 e na Figura 4.5.

Tabela 4.7 – Resultados de perda ao choque dos agregados.

Amostras	Tenacidade Média (%)	Desvio Padrão	Coeficiente de Variação (%)
SEIXO	82,22	5,51	0,07
ASRB-70	87,86	8,79	0,10
ASRB-80	91,34	8,35	0,09
ASRB-90	85,38	7,22	0,08

Fonte: Autora, 2022.

## 4.6 CURVA DE DOSAGEM

Em posse dos resultados obtidos com o ensaio de resistência a compressão, deram-se início a montagem das curvas de dosagem dos agregados, na subsequência a definição os traços decisivos. Os resultados apresentados nas Tabelas 4.8; 4.9 e 4.10 demonstraram um comportamento experimental satisfatório em relação as resistências à compressão ao longo do tempo, foram rompidos três corpos de prova para cada idade (3, 7 e 28 dias) de cada traço normal, rico e pobre, o comportamento foi igualmente para todos as amostras, em outros termos, houve um aumento das resistências ao longo do tempo, como esperável. A média dos resultados estão apresentadas na Figura 4.3.

Tabela 4.8 – Traços normais para curva de dosagem.

Grupo de amostras	Idade (dias)	Resistência à compressão axial média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coeficiente de variação (%)
REF NORMAL	3	13,12	0,64	0,04
	7	18,05	0,41	0,02
	28	35,29	1,80	0,05
ASRB-70 NORMAL	3	17,96	0,61	0,03
	7	22,94	1,52	0,07
	28	35,57	1,57	0,01
ASRB-80 NORMAL	3	14,34	1,11	0,09
	7	16,87	1,14	0,07
	28	26,30	0,41	0,02
ASRB-90 NORMAL	3	12,81	0,12	0,01
	7	16,33	0,53	0,03
	28	24,60	1,29	0,05

Fonte: Autora, 2022.

Tabela 4.9 – Traços ricos para curva de dosagem.

Grupo de amostras	Idade (dias)	Resistência à compressão axial média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coeficiente de variação (%)
REF RICO	3	12,29	1,75	0,14
	7	17,46	1,48	0,07
	28	41,70	3,66	0,09
ASRB-70 RICO	3	18,89	2,01	0,11
	7	23,69	3,79	0,16
	28	33,16	2,03	0,05
ASRB-80 RICO	3	23,22	0,96	0,04
	7	26,77	1,70	0,06
	28	38,68	2,33	0,07
ASRB-90 RICO	3	16,49	0,49	0,03
	7	21,39	0,70	0,03
	28	32,34	2,72	0,13

Fonte: Autora, 2022.

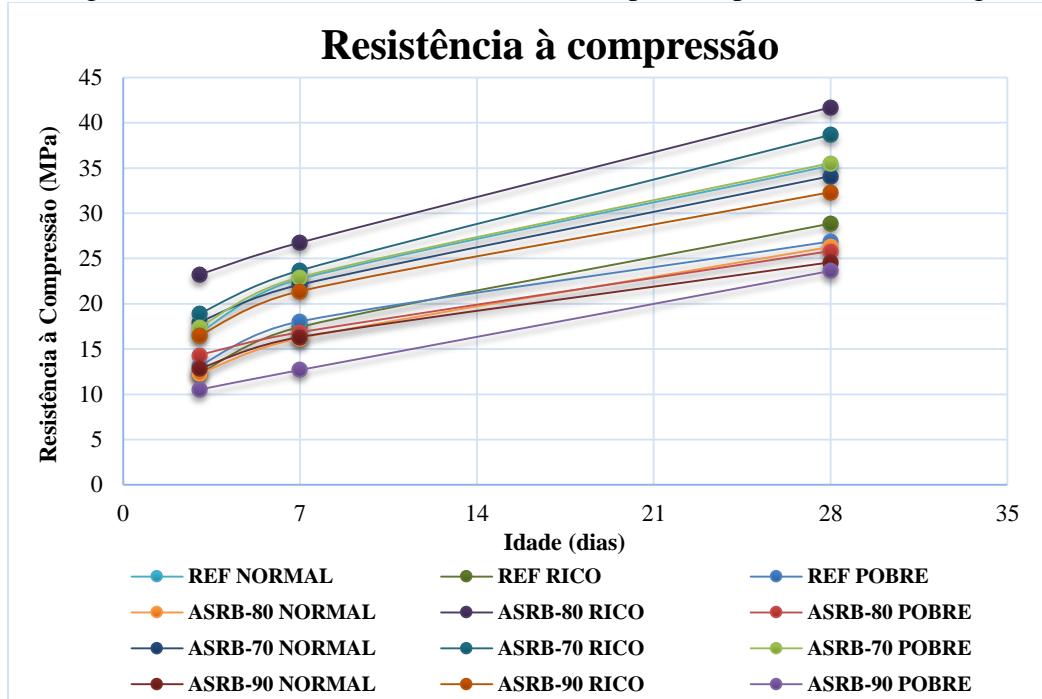
Tabela 4.10 – Traços pobres para a curva de dosagem.

Grupo de Amostras	Idade (dias)	Resistência à compressão axial média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coeficiente de variação (%)
REF POBRE	3	12,29	0,21	0,02
	7	17,46	1,19	0,07
	28	26,89	1,48	0,07
ASRB-70 POBRE	3	17,40	0,82	0,05
	7	22,10	0,28	0,01
	28	34,09	0,81	0,02
ASRB-80 POBRE	3	12,24	0,23	0,02
	7	16,21	0,13	0,01
	28	25,84	0,75	0,03
ASRB-90 POBRE	3	10,52	0,46	0,04
	7	12,70	1,52	0,12
	28	23,64	0,73	0,03

Fonte: Autora, 2022.

Contudo, em uma comparação entre as amostras, não foi observado o mesmo comportamento, sendo maiores em idades inferiores e menores para a idade de 28 dias. Além de não serem da mesma família, devido cada agregado se comportou e apresentou teores de argamassas ideais e relação a/c diferentes, ocasionando essa diferença entre as amostras. Outra possível justificativa para este comportamento seria também a moldagem dos corpos de prova, pois a compactação em camadas e os procedimentos de cura úmida podem ser também os motivos dessas resistências não apresentarem um comportamento de aumento delas para diferentes idades. Entretanto, todos os concretos tiveram aumento de resistência com passar o tempo. Este estudo, informa que estes valores são experimentais e podem ter variáveis que causam essas diferenças, porém para a obtenção do traço definitivo foi utilizada como referência a trabalhabilidade, isto é, não foi utilizada a relação a/c diretamente dos traços iniciais.

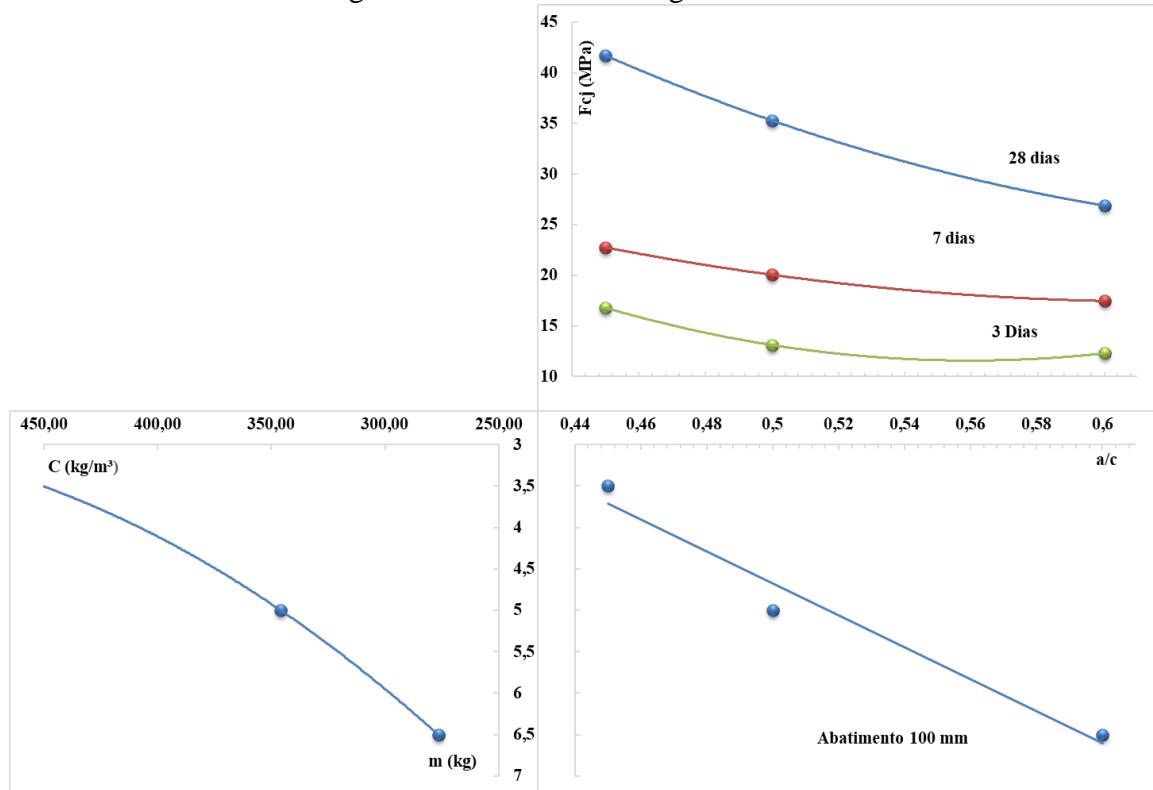
Figura 4.3 – Resultados de resistência à compressão para curva de dosagem.



Fonte: Autora, 2022.

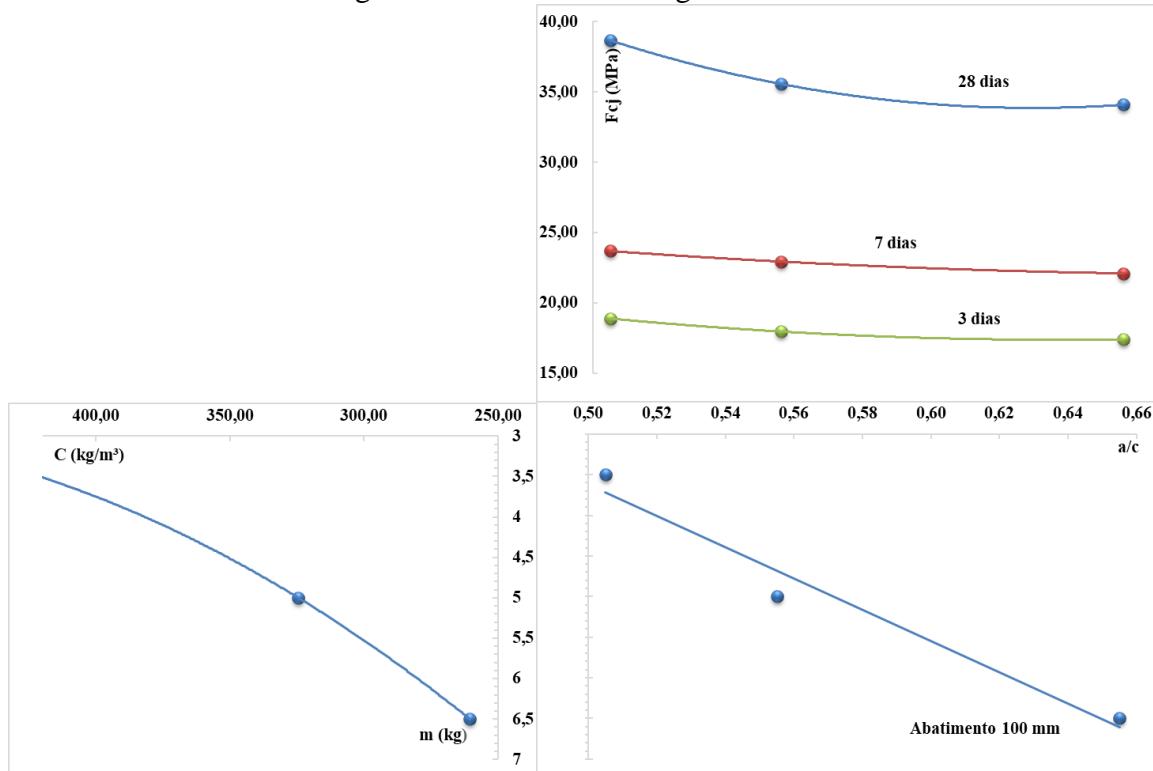
Nas Figuras 4.4; 4.5; 4.6 e 4.7 exibem as curvas de dosagens das amostras, pode-se observar também que o consumo de cimento Portland por metro cúbico foi diferente entre as amostras, a de referência, o seixo utilizado para este estudo, apresentou o maior consumo de cimento quando comparados com as amostras de agregados sintéticos, isto pode ter ocorrido devido a granulometria dos agregados sintéticos de bauxita apresentar uma granulometria mais contínua que a granulometria do seixo, sendo maior a compacidade e menor a porosidade, quanto mais contínua for a granulometria do agregado, melhor para o desempenho do concreto.

Figura 4.4 – Curva de dosagem Referência.



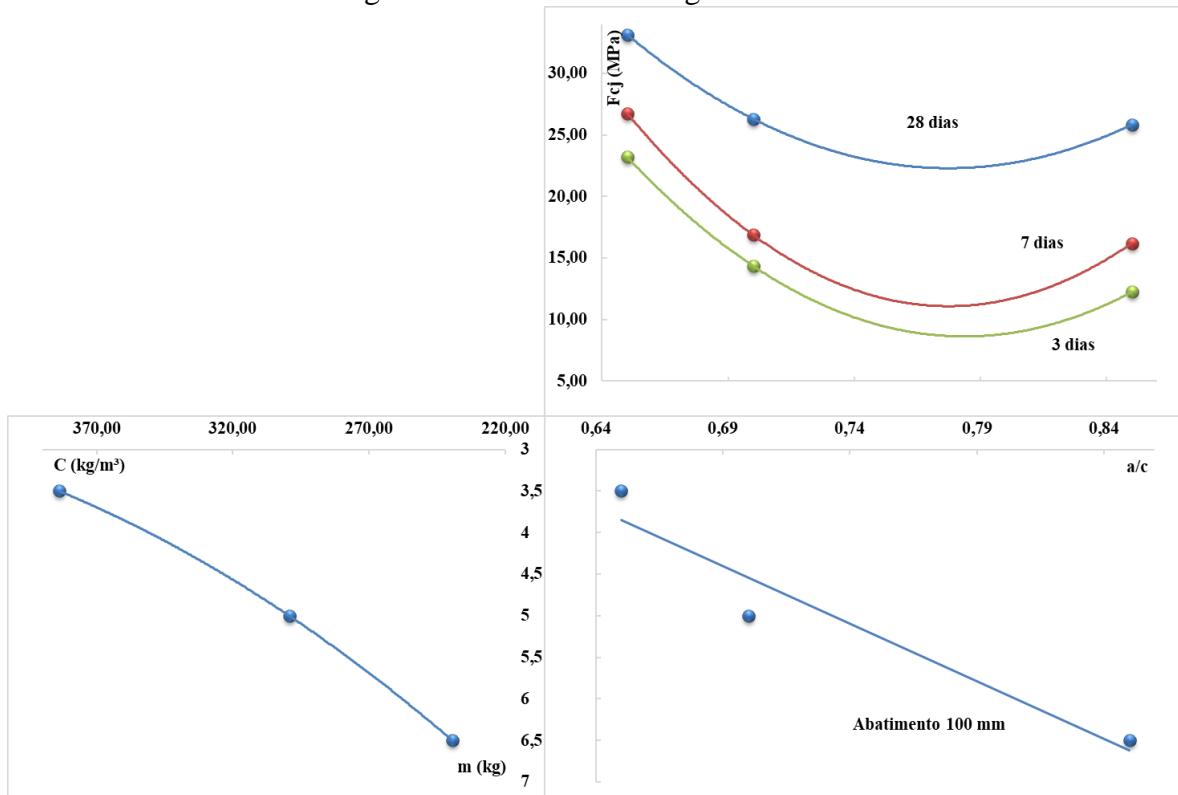
Fonte: Autora, 2022.

Figura 4.5 – Curva de dosagem ASRB-70.



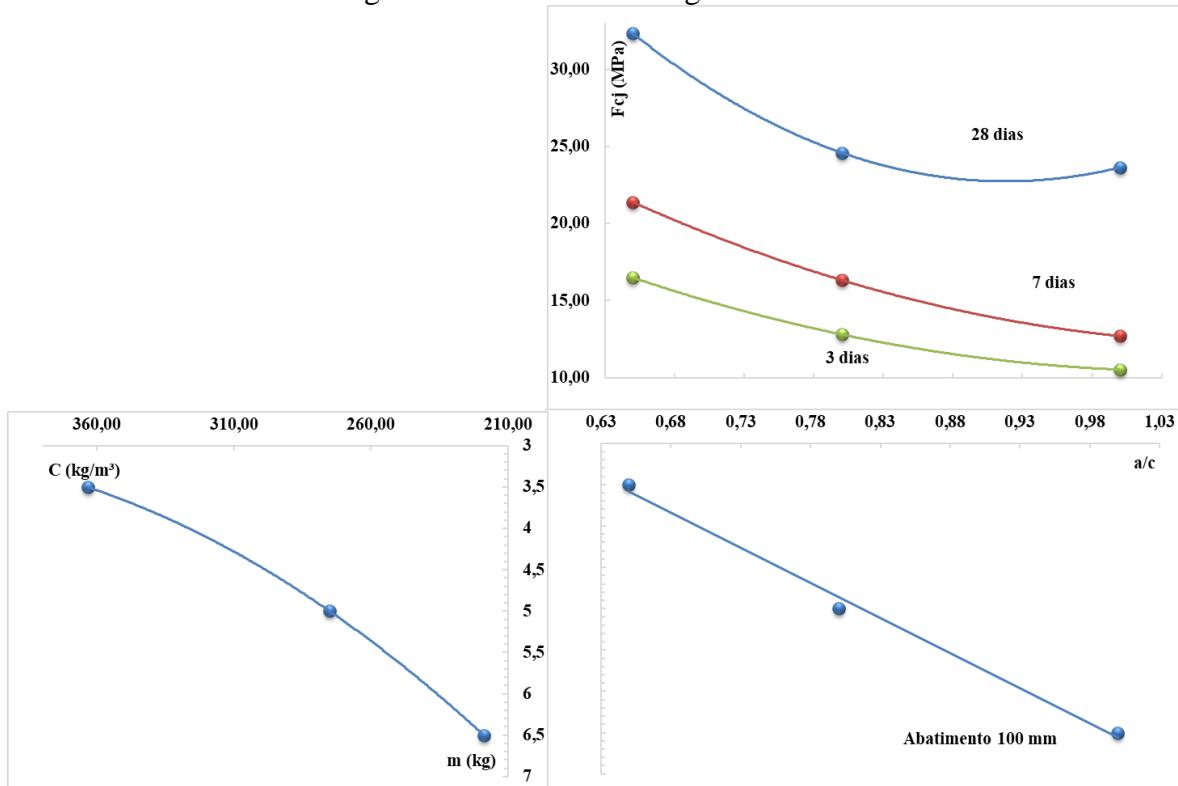
Fonte: Autora, 2022.

Figura 4.6 – Curva de dosagem ASRB-80.



Fonte: Autora, 2022.

Figura 4.7 – Curva de dosagem ASRB-90.



Fonte: Autora, 2022.

A partir das curvas de dosagem, do método experimental IPT/EPUSP expostos nas Figuras 4.4; 4.5; 4.6 e 4.7 é possível obter qualquer traço como parâmetro de referência a resistência do concreto no qual quer se atingir. Contudo, as características dos materiais e as propriedades do concreto devem se manter conforme às preestabelecidas neste estudo, teor de argamassa e consistência. Na pesquisa em questão, a curva de dosagem foi montada para obter o traço de concreto com as características predefinidas, ficou definido os traços para a resistência 25 MPa aos 28 dias de idade.

Durante a execução dos traços definitivos, mesmo com o teor de argamassa ideal e a melhoria do aspecto das misturas, o abatimento de tronco do ASRB-90 apresentou tendência à exsudação, demonstrando o excesso de água na dosagem. Conforme identificado na Figura 4.8.

Figura 4.8 - Exsudação de água *Slump Test ASRB-90*.



Fonte: Autora, 2022.

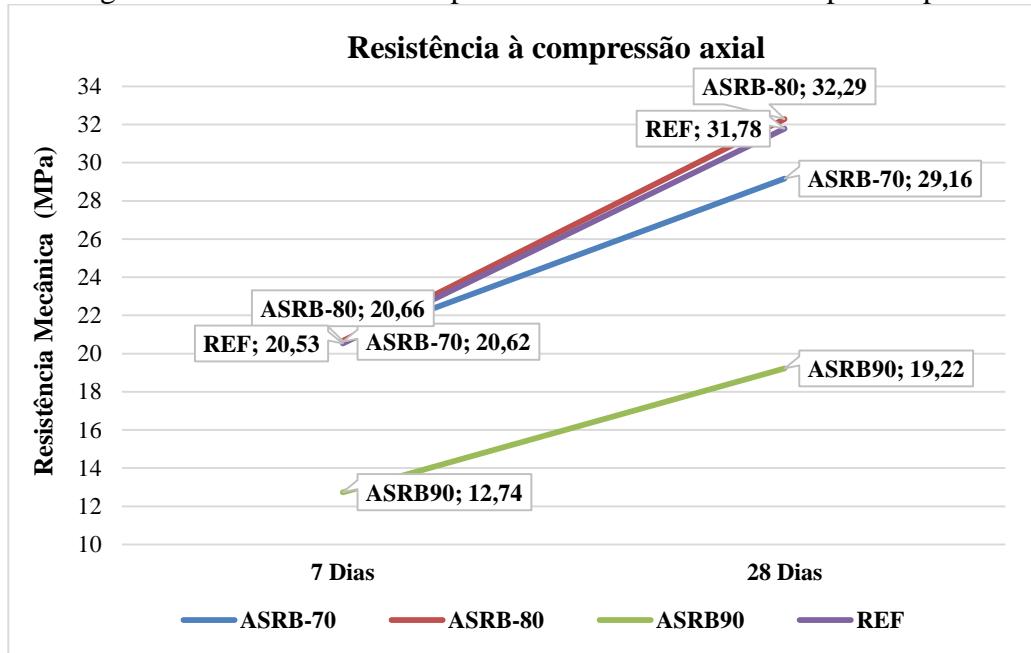
## 4.7 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

O ensaio mais comum de todos os realizados no concreto é o ensaio de resistência à compressão, em parte devido a ele ser de fácil realização, em parte devido a várias, senão todas, características desejáveis do concreto estarem qualitativamente relacionadas à sua resistência, mas principalmente, devido à importância intrínseca da resistência à compressão do concreto no projeto estrutural (NEVILLE, 2016).

Os resultados das médias dos ensaios de resistência mecânica dos traços definitivos para atingir  $f_{ck}$  de 25 MPa aos 28 dias, eles estão apresentados na Tabela 4.11 e na Figura 4.9. Os resultados dos ensaios de resistência podem ser afetados por variações do tipo e das dimensões do corpo de prova, pelo tipo de molde, pela cura, pelo preparo das superfícies,

pela rigidez da máquina de ensaio e pela velocidade de aplicação do carregamento (NEVILLE, 2016).

Figura 4.9 – Resultado das rupturas aos 7 e 28 dias dos corpos-de-prova.



Fonte: Autora, 2022.

Tabela 4.11 – Resultados resistência à compressão axial.

Grupo de amostras	Idade (dias)	Resistência à compressão axial média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coeficiente de variação (%)
REF	7	18,53	1,02	0,05
	28	31,78	1,57	0,07
ASRB-70	7	20,62	0,34	0,02
	28	29,16	4,42	0,15
ASRB-80	7	20,66	2,36	0,11
	28	32,29	3,51	0,11
ASRB90	7	12,74	2,09	0,16
	28	19,22	0,96	0,05

Fonte: Autora, 2022.

#### 4.8 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO DIAMETRAL

Embora o concreto não seja normalmente projetado para resistir à tração direta, o conhecimento da resistência à tração é importante para a determinação da carga em que a fissuração inicia. A ausência de fissuração é de importância considerável para a

manutenção da continuidade de uma estrutura e, em muitos casos, para a prevenção da corrosão de armaduras (NEVILLE, 2016).

Os dados das médias dos ensaios de resistência à tração, estão apresentados na Tabela 4.12 e na Figura 4.10 é demonstrado os corpos de prova dos concretos ASRB-70 após o ensaio de tração à compressão diametral. Na Tabela 4.13 e Figura 4.11 correlação da resistência à compressão axial de 10% esperada e obtida.

Tabela 4.12 – Resultados ensaio de resistência à tração diametral.

Grupo de amostras	Idade (dias)	Resistência à tração por compressão diametral média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	Coeficiente de variação (%)
REF	28	2,41	0,21	0,09
ASRB-70	28	2,95	0,16	0,07
ASRB-80	28	2,50	0,19	0,08
ASRB-90	28	1,69	0,18	0,10

Fonte: Autora, 2022.

Tabela 4.13 – Correlações entre a resistência à tração e a resistência à compressão.

Grupo de amostras	Resistência à compressão média (MPa)	Resistência à tração por compressão diametral média (MPa)	Resistência à tração por compressão diametral esperada (MPa)
REF	23,28	2,41	2,33
ASRB-70	29,16	2,95	2,92
ASRB-80	33,41	2,50	3,34
ASRB-90	19,22	1,69	1,92

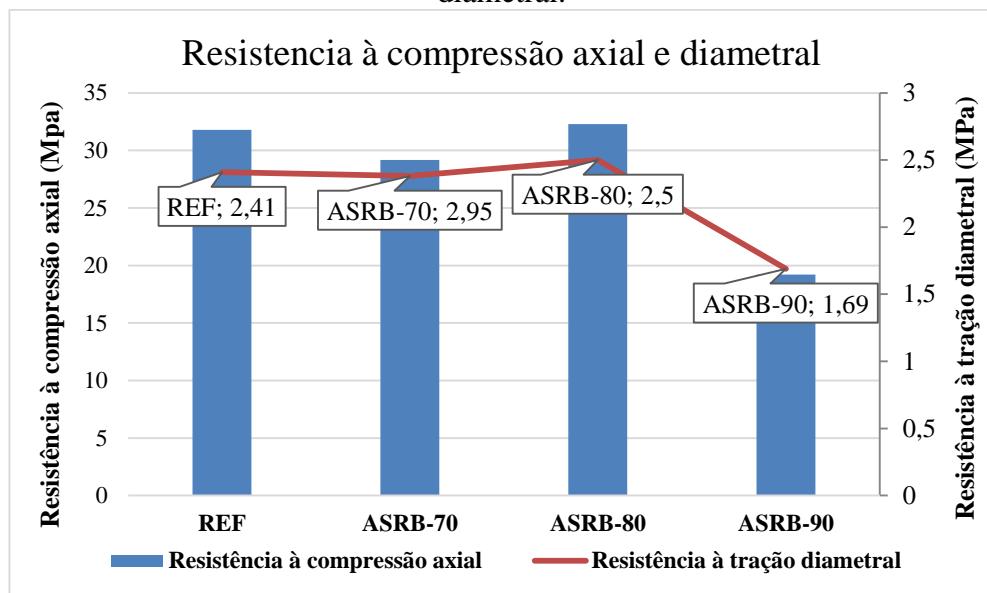
Fonte: Autora, 2022.

Figura 4.10 – Corpos-de-provas ASRB-70 após ruptura.



Fonte: Autora 2022.

Figura 4.11 – Resistência à compressão axial e resistência à tração por compressão diametal.



Fonte: Autora, 2022.

A correlação amplamente utilizada de que a resistência à tração do concreto corresponde a 10% da sua resistência à compressão. (NEVILLE, 2016). De posse dos resultados, o ASRB-70 e o concreto referência atingiram o valor esperado correspondente aos 10% em relação a resistência à compressão axial aos 28 dias, já o ASRB-80 e ASRB-90 não atingiram o valor esperado, esperava-se valores 3,34 MPa e 1,92 MPa.

#### 4.9 MÓDULO DE ELASTICIDADE

Assim como vários outros materiais estruturais, o concreto é, até certo ponto, elástico. Um material é considerado perfeitamente elástico quando a deformação surge e desaparece imediatamente na aplicação e na retirada da tensão. Quando o concreto é submetido à carga de longa duração (carga mantida), a deformação aumenta com o tempo, ou seja, o concreto apresenta fluência (NEVILLE, 2016).

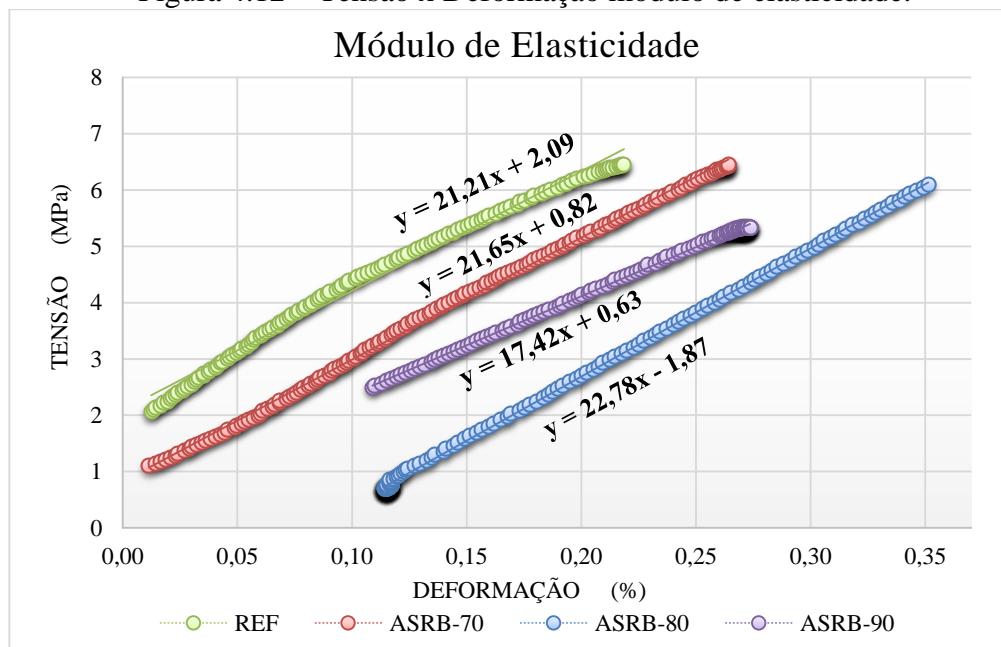
Na Tabela 4.14 exibe-se os resultados das médias do ensaio de módulo de elasticidade para os grupos de amostras produzidos. A Figura 4.12 apresenta os gráficos referente ao ensaio de módulo, 30% da ruptura, e a relação deformação-tensão.

Tabela 4.14 – Resultados médios de módulo de elasticidade.

Amostras	Módulo de elasticidade médio (GPa)	Desvio padrão (GPa)	Coeficiente de variação (%)
REF	21,21	2,69	0,13
ASRB-70	21,65	3,56	0,17
ASRB-80	21,78	2,11	0,11
ASRB-90	17,42	0,53	0,03

Fonte: Autora, 2022.

Figura 4.12 – Tensão x Deformação módulo de elasticidade.



Fonte: Autora, 2022.

O ensaio módulo de elasticidade tem como principal finalidade avaliar o comportamento autêntico da estrutura de concreto, em outros termos, tender a se aproximar de forma mais realista do comportamento do material a ser utilizado. Assim, foi possível analisar que quanto menor a relação água/cimento maior é o módulo de elasticidade, apesar do módulo do agregado ser maior o que prevalece é o da pasta de cimento, subsequente o consumo de cimento aumentará reduzindo a relação e aumentando o módulo. Analisando os dados, o ASRB-90 por ter um maior consumo de água, mesmo possuindo uma quantidade maior de agregado e um maior teor de argamassa a pasta está enfraquecida, o que apresentou um resultado de módulo baixo.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 5.1 CONCLUSÕES

Estas informações se referem exclusivamente aos ensaios realizados nesta pesquisa. Os resultados dos experimentos com a utilização de agregado sintético de resíduo de bauxita para confecção de concretos estruturais permitiu concluir que:

- Pode-se concluir que em todos os ensaios de resistência mecânica avaliados neste trabalho, o concreto com ASRB de forma geral teve desempenho promissor e pertinente, com exceção do ASRB-90 que apresentou um teor de argamassa elevado e uma relação a/c maior, sendo necessário a reformulação da composição do agregado sintético. Os concretos com ASRB-70 e ASRB-80 apresentaram resultados tecnicamente satisfatórios;
- Os ensaios de caracterização física demonstrou que ASRB's se mostrou um material mais resistente, resistindo mais ao desgaste abrasivo comparando ao agregado natural seixo utilizado nesta pesquisa;
- A composição granulometrica dos ASRB's demonstrou que a produção do agregado sintético baseado nas dimensões máximas e mínimas, possui uma granulometria mais continua, sendo mais satisfatório que o agregado natural utilizado na pesquisa, em virtude, dele apresenta uma quantidade maior de finos na sua composição, aumentando a trabalhabilidade na dosagem do concreto, aumentando o consumo de água. Exceto, o ASRB-90 por ser mais poroso e possuir um formato mais cilindro, tendo maior indice de vazios, detendo a desempenho do concreto;
- O ensaio de perda ao choque que teve como principal objetivo de complementar o ensaio de desgaste por abrasão, apresentou todos os resultados abaixo do estabelecido na NBR 5564/2021, em que a perda de máxima do agregado seria até 25%, o que não implica na reprovação ou não utilização do agregado sintético, além de ser opcional sua utilização neste estudo não tinha fins de ser utilizado como opção para lastro ferroviário e sim para comparar e estudar sua resistência através de outras metodologias e ensaios;
- Na investigação da absorção de água dos agregados, o agregado ASRB-70 foi o que mais se aproximou em relação ao agregado natural seixo, com

uma diferença apenas de 0,6%, tornando sua trabalhabilidade boa, com menor consumo de água na dosagem;

- Os resultados de módulos de elasticidade dos concretos, ASRB-70, ASRB-80 apresentaram valores proporcionalmente satisfatórios comparados que a concreto de referência que foi de 21,12 GPa, apenas o ASRB-90 que obteve um menor desempenho;
- Os resultados obtidos mostram que os agregados sintéticos exerceu influência significativa tanto na resistência à compressão quanto no módulo de deformação dos concretos estudados;
- O método de dosagem IPT/EUSP obteve maior adequação nas dosagens feitas com os materiais, empregando com maior eficácia, pois o método considera as características dos materiais de forma prática, além da maior facilidade de ajuste caso houvesse a necessidade de aditivos e adições;
- Na análise do ensaio de índice de forma dos agregados, mesmo que todos os ASRB's estejam dentro dos parâmetros estabelecido pela NBR 7809/2019, é necessário aprimorar as formas dos agregados sintéticos de maneira que atinga a forma mais lamenar, assim podendo melhorar a trabalhabilidade do concreto e diminuir o indice de vazios;
- Na comparação entre as resistências à compressão axial das amostras, demonstraram resultados satisfatórios, com aumento de resistência com passar do tempo. As amostras de ASRB tiveram resultados equivalentes ao concreto de referência;
- As implicações econômicas e tecnológicas dos ASRB's está relacionada no maior consumo de cimento, o que torna o concreto mais caro, e no maior consumo de água, diminuindo a resistência mecânica do concreto. Todavia, ainda deve ser aprimorado e estudado suas propriedades e sua composição com intuitivo de diminuir estes fatores para a comercialização dos ASRB's;
- Considerando os resultados encontrados para os ensaios de resistências mecânica apresentadas nesta pesquisa, a utilização dos agregados sintéticos de resíduo de bauxita é viável e promissor de material alternativo, uma vez que sua incorporação no mercado diminuirá o consumo dos recursos naturais seixo e brita requeridas para a produção de concretos, e apresentando uma destinação dos resíduos do setor do alumino e alumina

que até o momento presente, não apresentam uma destinação propensa e apropriada para seu aproveitamento. No entanto, o comportamento dependente do tempo dos concretos de ASRB deve ser mais estudado para entender seu desempenho a longo prazo;

## 5.2 SUGESTÕES

Considerando a enorme quantidade de resíduos provenientes da indústria da alumina e alumínio e a motivação na redução da pegada ambiental, se faz necessário a continuação e disseminação do conhecimento sobre a utilização e a produção de agregados sintéticos proveniente de resíduo de bauxita, cujo objetivo é buscar alternativas de aplicabilidade e novos materiais para interação deste resíduo na indústria da construção civil. O agregado sintético se mostra como alternativa para melhoria do comportamento mecânico em concreto, podendo melhorar em outras propriedades. Desta forma, descreve-se a seguir algumas propostas de trabalhos que visem a continuidade no estudo desse material:

- Analisar a reatividade do agregado sintético de resíduo de bauxita, analisando a sua disposição em desencadear a reação álcali-sílica;
- Realizar ensaios de microestrutura do concreto com o ASRB analisando o comportamento do mesmo na zona de transição interfacial;
- Realizar ensaios de durabilidade dos concretos com ASRB, ensaios de absorção de água capilaridade, absorção por imersão, carbonatação e penetração de cloretos;
- Avaliar o desempenho dos concretos com a utilização de aditivos plastificantes e superplastificantes e comparar os aspectos mecânicos;
- Ampliar este estudo para vigas de concreto armado, realizando ensaios de deformação, flexão e fissuração;
- Empregar outros tipos de cimento, como o CP II Z, CP II F ou CP I, para fins comparativos e de investigar se ocorre alterações das propriedades do concreto, assim como verificou-se para o CP IV RS;
- Estudar diferentes relações a/c, métodos de adensamento, metodologia de dosagem e cura, juntamente com distintos tipos de cimento para verificar a

influência da quantidade de água na hidratação dos cimentos e na resistência mecânica dos concretos com ASRB;

- Analisar a viabilidade técnico-econômica dos agregados sintéticos de resíduo de bauxita, determinando a relação custo x benefício para utilização dos agregados como substituição total dos agregados naturais em concretos para a indústria de construção civil.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABAL. **Relatório da Sustentabilidade da Indústria de Alumínio**, 2017. Disponível em: <[www.abal.org.br](http://www.abal.org.br)>. Acesso em: 12 abr. 2021.
- ALMEIDA, S. L. M.; LUZ, A. B. **Manual de agregados para construção civil**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2009.
- ALBUQUERQUE, N. G. **Estudo das propriedades mecânicas de concretos dosados com agregados produzidos a partir de lama vermelha**. 2007. Trabalho de conclusão de curso. (Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2007.
- ALVES, J. D. **Materiais de Construção**. 8<sup>a</sup> Ed. Goiânia: Editora da UFG e Editora da UCG, 2006.
- ALUNORTE. **Relatório Anual. Relatório da Administração**, 2009.
- AMBROZEWICZ, P. H. L. **Materiais de Construção: Normas, Especificações, Aplicação e Ensaios de Laboratório**. São Paulo: Pini, 2012.
- ANTUNES, M. L. P.; CONCEICAO, F. T.; NAVARRO, G.R.B.; TOLEDO, S. P.; KIYOHARA, Pedro K. **Resíduo da Bauxita- Diferentes Formas de Ativação e Sua Caracterização**. Anais do 57º Congresso Brasileiro de Cerâmica e 5º Congresso Ibero Americano de Cerâmica, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 248: **Agregados – Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16917: **Agregado graúdo - Determinação da densidade e da absorção de água**. Rio de Janeiro, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: **Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova**. Rio de Janeiro, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7809: **Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2019.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16972: **Agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios**. Rio de Janeiro, 2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16697: **Cimento Portland - Requisitos**. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16605: **Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica.** Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16607: **Cimento Portland — Determinação dos tempos de pega.** Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11579: **Cimento Portland — Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200).** Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16916: **Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água.** Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211: **Agregados para concreto - Especificação.** Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7222: **Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16974: **Agregado graúdo - Ensaio de Abrasão Los Angeles.** Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16605: **Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica.** Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5738: **Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova.** Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215. **Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 8522-1. **Concreto- Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão.** Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118. **Projeto de estruturas de concreto — Procedimento.** Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT, NBR 5564. **Via férrea - Lastro ferroviário - Requisitos e métodos de ensaio.** Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS ENTIDADES DE PRODUTORES DE AGREGADOS PARA CONSTRUÇÃO (ANEpac). Disponível em: <<http://www.anepac.org.br/agregados/mercado>>. Acesso em: 12 jun. 2021.

BAUER, L. A. F. **Materiais de Construção.** Volume 1. 6<sup>a</sup> Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2019.

BIZÃO, Álvaro HENRIQUE, Nogueira. **Concreto permeável com agregado reciclado: otimização de traço com análise multiparamétrica.** Orientador: Prof. Dr. Wesley Renato Viali. Co-orientadores: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Cristiane Alvarenga Gajo; Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Eloiza da Silva Nunes Viali. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, Junho, 2021.

BOGAS, A. GOMES, A. “**Compressive behavior and failure modes of structural lightweight aggregate concrete – Characterization and strength prediction**”, Materials and Design, v.46, pp.832–834, 2013.

BRINDLEY, G. W., NAKAHIRA, M. “**New concept of the transformation sequence of kaolinite to mullite**”, Nature, v. 181, pp. 1333-1334, 1958.

CABRAL, E. M.; SA, R. J. de; VIEIRA, R. K. and VASCONCELOS, R. P. **Utilização de Massas Cerâmicas na Produção de Agregado Sintético de Argila Calcinada para Uso em Concreto.** Cerâmica [online]. 2008, vol.54, n.332, pp.404-410. ISSN 0366-6913.

CABRAL, A. E. B. **Mechanical Properties Modeling of Recycled Aggregate Concrete.** Construction and Building Materials, v. 24, n. 4, p. 421-430, 2010.

CALLISTER, William D., Jr.; RETHWISCH, David G. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução.** Tradução de Sérgio Murilo Stamile Soares. 9. ed – Rio de Janeiro: LTC, 2018.

CAPELLI, Renata Brazzarella. **CoMParação de Métodos na Análise Granulométrica de Resíduos de Mineração.** 31 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

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

CHANDRA, S. BERNTSSON, L. **Lightweight Aggregate Concrete: Science, Technology, and Applications**. Noyes Publications, USA, p.409, 2002.

CHAVES, A. G. F., **A Lama Vermelha e Sua Eliminação da Fábrica de Alumina**, in: 2º Semana de Estudos. Alumínio e Zinco. Sociedade de Intercâmbio Cultura e Estudos Geológicos dos Alunos da Escola de Minas de Ouro Preto, n. 2, Ouro Preto, Minas Gerais, 1962.

CHINELATTO, A. S. A. et al. **Mechanisms of Microstructure Control in Conventional Sintering**. In: LAKSHMANAN, A. (Ed.) *Sintering of ceramics-new emerging techniques*. Intech, p. 401-422, 2012.

CUI, X. et al. **Experimental Study on the Relationship Between Permeability and Strength of Pervious Concrete**. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 29, n. 11, p. 1-9, 2017. Disponível em: DOI: 10.1061/ (ASCE) MT.1943-5533.0002058. Acesso em: out. 2020.

DAY, K. W. **Concrete Mix Design, Quality Control and Specification**. Third Edition. New York: Taylor & Francis, 2006.

DENG, Z.-Y. et al. **Microstructure and Mechanical Properties of Porous Alumina Ceramics Fabricated by the Decomposition of Aluminum Hydroxide**. *Journal of the American Ceramic Society*, v. 84, n. 11, p. 2638-2644, 2001.

DOMAGATA, L., “**The effect of Lightweight Aggregate Water Absorption on the Reduction of Watercement Ratio in Fresh Concrete**,” *Procedia Engineerin*”, v. 108, pp. 206-2013, 2016.

Erhan Güneyisi, Mehmet Gesoġlu, Özgür Pürsünlü, Kasım Mermerdas. **Durability aspect of concretes composed of cold bonded and sintered fly ash lightweight aggregates**, Compos. B Eng. 53 (2013) 258–266.

E.P. Bertin, **Principles and Practice of X-Ray Spectrometric Analysis** (Plenum, New York, 1975).

FERREIRA, L. R. **Utilização do Resíduo de Bauxita como Agregado Miúdo para a Produção de Concreto**. Monografia (Graduação) – Curso Engenharia Civil, Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2019.

FRAZÃO, E. B. **Tecnologia de Rochas na Construção Civil** – São Paulo: ABGE, 2002.

FIBER, M. A. **Avaliação do agregado calcinado de resíduo de mineração para o emprego em pavimentação**. Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2015.

GAO, H.; XIA, S.; CHEN, F.; STUEDLEIN A., W.; LI, X.; WANG, Z.; SHEN, Z.; CHEN, X. **Dynamic Shear Modulus and Damping of Cemented and Uncemented Lightweight Expanded Clay Aggregate (LECA) at Low Strains**. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 142, p.1-11, January, 2021.

GOMES NETO, D. P. **Dosagem de Micro concretos Leves de Alto Desempenho para Produção de Pré-Fabricados de Pequena Espessura – Estudo de Caso**. São Carlos, 1998. 156p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1998.

GRABASCK, J. R. **Aspectos e Impactos Ambientais Decorrentes da Extração de Agregado Natural e Produção de Agregado Reciclado: Estudo de Caso no RS**. 2016. 164 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2016. Disponível em: [http://www.repositorio.jesuita.org.br/bitstream/handle/UNISINOS/5398/Jaquelaine%20Ramos%20Grabasck\\_.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://www.repositorio.jesuita.org.br/bitstream/handle/UNISINOS/5398/Jaquelaine%20Ramos%20Grabasck_.pdf?sequence=1&isAllowed=y). Acesso em: 21 dez. 2021.

HILDELBRANDO, E. A.; SOUZA, J.A. S.; NEVES, R. F. **Aplicação do Rejeito do Processo Bayer (Lama Vermelha) como Matéria-Prima na Indústria de Cerâmica Estrutural**. In: Anais do 43º Congresso Brasileiro de Cerâmica. - Florianópolis – SC, 28101- 28111, 1999.

HYDRO. **Relatório Anual**. Norsk Hydro ASA, 2019.

IBRAM. **Setor Mineral: Coletiva de Imprensa Sobre o Ano de 2019**. [online]. IBRAM, 12 de fevereiro de 2020. Disponível em: <https://portaldamineracao.com.br/mineracao-expandefaturamento-e-recolhe-quase-r-50-bi-em-tributos-e-encargos/>. Acesso em: 15 maio 2021.

IBRAM. **Setor Mineral: Coletiva de Imprensa do 1º Trimestre 2020b**. [online]. IBRAM, 16 de abril de 2020. Disponível em: <http://portaldamineracao.com.br/arquivos/dados-do-setor-mineral-1o-trimestre-2020/> Acesso em: 15 maio 2021.

IAI. **SUSTAINABLE BAUXITE RESIDUE MANAGEMENT GUIDANCE**. International Aluminium Institute. Disponível em: <http://www.international-aluminium.org/> Acesso em: 10 de agosto de 2022.

ISLAM, Md Sagirul et al. **Effect of Soda Lime Silica Glass Waste on the Basic Properties of Clay Aggregate.** Int. J. Sci. Eng. Res, v. 7, n. 4, p. 149-154, 2016.

Kaige Tian, Yanshuai Wang, Shuxian Hong, Jinrui Zhang, Dongshuai Hou, Biqin Dong, Feng Xing. **Alkali-activated artificial aggregates fabricated by red mud and fly ash: Performance and microstructure.** Construction and Building Materials, Volume 281, 2021, 122552, ISSN 0950-0618.

KAZMI, S. M. S.; ABBAS, S.; SALEEM, M. A.; MUNIR, M. J.; KHITAB, A. **Manufacturing of Sustainable Clay Bricks: Utilization of Waste Sugarcane Bagasse and Rice Husk Ashes.** Construction and Building Materials, v. 120, p. 29–41, 2016.

LAGE, N. M. **Aproveitamento do Rejeito da Bauxita da Mina de Juruti por Flotação,** Ouro Preto, UFOP, 2018. Acesso em: 21/06/2021. Disponível em: [www.monografias.ufop.br](http://www.monografias.ufop.br)

LARRARD, F. de. **Concrete Mixture Proportioning: a Scientific Approach.** London: E & FN Spon, 1999.

LI, Z. **Advanced Concrete Technology.** New Jersey: John Wiley & Sons, 2011.

MANFROI, E. P. **Avaliação da Lama como Material Pozolâmico em Substituição ao Cimento para Produção de Argamassas.** Dissertação de Mestrado, 2009. Florianopolis, SC.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais.** 2<sup>a</sup> ed. São Paulo: Nicole Pagan Hasparyk, 2014.

MENDES, Marcos Vinicius Agapito. **Análise Técnica da Substituição Parcial do Agregado Miúdo por Rejeito Magnético na Produção de Concreto.** [manuscrito]/ Marcos Vinicius Agapito Mendes-2016. 123 f.: il.

MENDES, T. M. **Influência do Coeficiente de Atrito entre os Agregados e da Viscosidade da Matriz no Comportamento Reológico de Suspensões Concentradas Heterogêneas.** Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. p. 103, 2008.

NAHHAB, A.H.; KETAB, A.K. **Influence of Content and Maximum Size of Light Expanded Clay Aggregate on the Fresh, Strength, and Durability Properties of Self-Compacting Lightweight Concrete Reinforced with Micro Steel Fibers.** Construction and Building Materials, 233, 117922, December, 2019.

NASCIMENTO, Lucas Costa do. **Análise de Viabilidade entre Concretos Dosados pelos Métodos da ABCP/ACI e IPT/USP.** 17 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2019.

NEPTUNE, A. **Investigation of the Effects of Aggregate Properties and Gradation on Pervious Concrete Mixtures.** (Master of Science Civil Engineering), Clemson University, Theses at TigerPrints. All Theses. 460, 178p, Clemson, South Carolina, U.S.A. 2008. Disponível em: [https://tigerprints.clemson.edu/all\\_theses/460](https://tigerprints.clemson.edu/all_theses/460). Acesso em: out. 2021.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do Concreto.** Tradução Ruy Alberto Cremonini. 2<sup>a</sup> ed. Porto Alegre/RS: Bookman, 2013.

NEVILLE, Adam M. **Propriedades do Concreto.** 5<sup>a</sup>. Ed. Porto Alegre: Bookman, 2016. 912 p.

NJINDAM, O. R. et al. **Effect of Glass Powder on the Technological Properties and Microstructure of Clay Mixture for Porcelain Stoneware Tiles Manufacture.** Construction and Building Materials, v. 170, p. 512-519, 2018.

NUNES, A. S. **Desenvolvimento de Cerâmicas Refratárias com Substituição da Argila Refratária por Sílica da Casca de Arroz, Microfibras Cerâmicas e Fibras de Aço: Caracterização das Propriedades Físicas, Mecânicas e Térmicas.** Dissertação (Mestrado) Universidade Federal do Pampa, 2017.

OLIVEIRA, I. R.; STUDART, A. R.; PILEGGI, R. G.; PANDOLFELLI, V. C. **Dispersão e Empacotamento de Partículas: Princípios e Aplicações em Processamento Cerâmico.** São Paulo: Fazendo Arte Editorial, 2000.

OLIVEIRA, A.H.; SANTOS, P.C.; OLIVEIRA, R.B.; JESUS E.; MACEDO, Z. **Produção de agregado sintético de argila com reaproveitamento de resíduo de vidro.** Revista Matéria, v.24, n.1, 2018.

PINHEIRO, C. S. S.; MENDES, R. L. R.; OLIVEIRA, M. J. **Impactos Socioambientais Causados pela Extração de Areia e Seixo em Porto Grande/AP e sua Relação com o Desenvolvimento Local.** Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional, [S.l.], v. 15, n. 1, fev. 2019. ISSN 1809-239X. Disponível em: <https://www.rbgdr.net/revista/index.php/rbgdr/article/view/4326>. Acesso em: 22 dez. 2021.

RAMACHANDRAN, V. S.; BEAUDIOIN, J. J. **Handbook of Analytical Techniques in Concrete Science and Technology: Principles, Techniques and Applications**. New York, U.S.A: Noyes Publications/Willian Andrew Publishing/Elsevier, 2000.

RASHAD, A.M. **Lightweight Expanded Clay Aggregate as a Building Material – An Overview**. Construction and Building Materials, 170, p. 757–775, March, 2018.

RECENA, Fernando Antonio Piazza. **Retração do concreto**. Porto Alegre: EdiPUCRS, 2014. 151 p.

REIS, A.W.C. **Caracterização Mineralógica do Agregado Obtido a Partir da Lama Vermelha do Processo Bayer**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará. Instituto de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, 2014.

ROCES-ALONSO, E.A.; GONZÁLEZ-GALINDO, J. **Experimental Study on Grain Failure of Lightweight Expanded Clay Aggregate Under Uniaxial and Biaxial Load Conditions**. Powder Technology, 383, p. 542–553, January 2021.

RODRIGUES, C. R. DE SÁ; FUCALE, S. **Dosagem de Concretos Produzidos com Agregado Miúdo Reciclado de Resíduo da Construção Civil**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 14, n. 1, p. 99-111, jan./mar. 2014. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído.

ROSÁRIO, K. A. do. **Concreto com Utilização de Agregado Graúdo Sintético Produzido a Partir da Lama Vermelha: Estudos de Dosagem, Propriedade e Microestrutura**. 2013, 113p, il. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém-PA, 2013.

ROSSIGNOLO, J.A. “**Properties of High-Performance LWAC for Precast Structures With Brazilian Lighweight Aggregates**”, Cement & Concrete Composites, v. 253, n 1, p. 77-82, 2006.

ROSSIGNOLO, J.A. “**Influence Avaliação da Zona de Transição interfacial Pasta Agregado Leve em Concretos com Sílica Ativa e Látex**”, Revista Matéria, v. 12, n. 3, 2007.

ROSSIGNOLO, João A. **Concreto Leve Estrutural: Produção, Propriedades, Microestrutura e Aplicações**. 1 Ed. São Paulo: PINI, 2009.

ROSSIGNOLO, J. A. **Concreto Leve de Alto Desempenho Modificado com SB para Pré: Fabricados Esbeltos: Dosagem, Produção, Propriedades e Microestrutura**. 2003.

Tese. (Doutorado em Interunidade: Ciência e Engenharia de Materiais), Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

R.-X. Liu, C.-S. Poon, **Utilization of Red Mud Derived from Bauxite. in Self-Compacting Concrete.** J. Clean. Prod. 112, 384–391 (2016).

SAMPAIO, J. A.; Andrade, M. C.; Dutra, A. J. B. 2005. **Bauxita. In: Rochas & Minerais Industriais: Usos e Especificações.** Rio de Janeiro: CETEM. Parte II. Cap.13. p. 279-304.

SANDOVAL, G. F. B. et al. **Correlation Between Permeability and Porosity for Pervious Concrete (PC).** DYNA (Colombia), v. 86, n. 209, p. 151-159, 2019. Disponível em: <http://www.scielo.org.co/pdf/dyna/v86n209/0012-7353-dyna-86-209-151.pdf>. Acesso em: set. 2021.

SANTOS, D.H. **Utilização do Rejeito do Processo Bayer como Matéria-Prima na Produção de Agregados Leves.** Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Elétrica) - Programa de pós-graduação em engenharia elétrica, Belém-PA. P. 73, 2011.

SCHNEIDER, H.; SCHREUER, J.; HILDMANN, B. **Structure and Properties of Mullite - A Review.** Journal of the European Ceramic Society, v. 28 n. 2, p. 329-344, 2008.

SCOBAR, Renan Luna. **Concreto Leve Estrutural: Substituição do Agregado Graúdo Convencional por Argila Expandida.** Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, p. 45. 2016.

SERNA, H. A. L.; REZENDE, M. M. **Agregados para Construção Civil. Associação Nacional de Entidades de Produtores de Agregados para Construção Civil.** São Paulo, São Paulo, 2011.

SETZ, Luiz F. G., SILVA, Antonio C. **O Processamento Cerâmico sem Mistério.** Bulcher, 2019.

SHETTY, M. S. **Concrete Technology: Theory and Practice.** Multicolor Illustrative Edition. New Delhi: S. Chand & Company, 2005.

SHINOMIYA, Léo; GOMES, Jerfesson; ALVES, Joner. **Análises de Cenários para Reaproveitamento do Resíduo de Bauxita no Pará.** Tecnol Metal Mater Min., São Paulo, v. 16, n. 1, p. 75-81, 30 abr 2018. Disponível em: <<https://www.tecnologiammm.com.br/doi/10.4322/2176-1523.20191676>>. Acesso em: 20 mar. 2021.

**SILVA FILHO, E. B.; ALVES, M. C. M.; DA MOTTA, M. *Lama Vermelha da Indústria de Beneficiamento de Alumina: Produção, Características, Disposição e Aplicações Alternativas*.** Revista Matéria, Rio de Janeiro, v. 12, n. 2, p. 322-338, 2007.

**SILVA, D. DE A. E. *Estudo da Influência do Índice de Forma do Graúdo nas Propriedades Mecânicas do Concreto*.** Dissertação de (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Civil, 2012.

**SILVA, K.L. *Obtenção de Nanocompósitos de Alumina-Zircônica para Aplicação como Biomaterial*.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, p. 75. 2011.

**SINGH, M, UPADHAYAY, S. N., PRASAD, P. M., “Preparation of Iron Rich Cements Using Red Mud”,** Cement and Concrete Research, v. 27, n 7, pp. 1037-1046, 1997.

**SMITH, N. J.; BUCHANAN, V. E.; OLIVER, G. *The Potential Application of Red Mud in the Production of Castings*.** Materials Science & Engineering, 2006.

**SOUZA, J.A.S. *Estudo e Avaliação do Uso de Resíduos do Processo Bayer como Matéria-Prima na Produção de Agregados Sintéticos para a Construção Civil*.** 2010. Tese (Doutorado em Engenharia de recursos naturais da Amazônia) – Universidade Federal do Pará. Belém, 2010.

**SOUZA, Pedro Henrique Rodrigues de. Et al. *Utilização da Lama Vermelha para Produção de Agregado Sintético*.** Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Ano 04, Ed. 03, Vol. 06, pp. 30-43. Março de 2019. ISSN: 2448-0959.

**SOUZA SANTOS, P. *Ciência e Tecnologia de Argilas* – vol. 1.** São Paulo: E. Blucher, 1989.

**SOUZA, Jéssica Siqueira. *Mecânica dos Solos* / NT Editora. - Brasília: 2015.**

**TOURENQ, C.; DUPONT, P.; PRIMEL, L. *Non-Conventional Aggregates*.** In: Aggregates, Louis Primel, e Claude Tourenq (editors), 2010.

**TSAKIRIDIS, P. E.; AGATZINI-LEONARDOU, S.; OUSTADAKIS, P. *Red Mud Addition in the Raw Meal for the Production of Portland Cement Clinker*.** Journal of Hazardous Materials, 2004.

**VIEIRA FILHO, José Orlando. *Avaliação da Resistência à Compressão do Concreto Através de Testemunhos Extraídos: Contribuição à Estimativa do Coeficiente de***

**Correção Devido aos Efeitos Broqueamento.** São Paulo, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Engenharia de Construção Civil e Urbana, Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, PCC-EP-USP, 2007. 2 v. 440 p. (tese de doutorado).

WANG, S; ANG, H.M; TADÉ, M.O., 2008. **Novel Applications of Red Mud as Coagulant, Adsorbent and Catalyst for Environmentally Benign Processes.** Chemosphere 72, 1621-1635.

W.C. TANG, Z. WANG, Y. LIU, H.Z. CUI. **Influence of Red Mud on Fresh and Hardened Properties of Self-Compacting Concrete.** Construction and Building Materials, Volume 178, 2018, Pages 288-300.

YU, F. et al. **Influence of Aggregate Size on Compressive Strength of Pervious Concrete.** Construction and Building Materials, v. 209, p. 463-475, 2019. Disponível em: DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.140. Acesso em: set. 2020.

ZERBO, L. et al. **Microstructure and Weibull Distribution of Rupture Strength of Clay-Talc Ceramics.** Cerâmica, v. 65, n. 374, p. 240245, 2019.

ZHANG, M. H., GJØRV, O. E. “**Penetration of Cement Paste into Lightweight Aggregate**”, Cement and Concrete Research, v.22, pp.47-55, 1992.

ZHANG, M.H; GJORV, O.E. **Cement Concrete Research.** 22 (1992) 47.