



Tayanne Christina Melo Vieira

**Resíduo da bauxita calcinado como material em substituição do cimento na produção das argamassas de assentamento.**

## **DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

Instituto de Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Dissertação orientada pelo Professor Dr. Alcebíades Negrão Macêdo

Belém – Pará – Brasil

2023



## RESÍDUO DA BAUXITA CALCINADO COMO MATERIAL EM SUBSTITUIÇÃO DO CIMENTO NA PRODUÇÃO DAS ARGAMASSAS DE ASSENTAMENTO

AUTORA:

TAYANNE CHRISTINA MELO VIEIRA

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

APROVADO EM: 06 / 02 / 2024.

BANCA EXAMINADORA:

Documentário assinado digitalmente  
**gov.br**  
ALCEBIADES NEGRÃO MACEDO  
Data: 23/02/2024 15:26:21-0300  
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. Alcebiades Negrão Macêdo  
Orientador (UFPA)

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

Documentário assinado digitalmente  
**gov.br**  
RODRIGO RODRIGUES DA CUNHA  
Data: 23/02/2024 14:49:34-0300  
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. Rodrigo Rodrigues da Cunha  
Membro Externo (IFPA)

Documentário assinado digitalmente  
**gov.br**  
MARCELO DE SOUZA PICANÇO  
Data: 23/02/2024 09:50:48-0300  
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço  
Membro Interno (UFPA)

Visto:

Prof. Dr. Dênio Ramam Carvalho de Oliveira  
Coordenador do PPGEC / ITEC / UFPA

**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)

---

V657r Vieira, Tayanne Christina Melo.  
Resíduo da bauxita calcinado como material em  
substituição do cimento na produção das argamassas de  
assentamento / Tayanne Christina Melo Vieira. — 2024.  
102 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Alcebíades Negrão Macêdo  
Coorientador(a): Prof. Dr. Rodrigo Rodrigues da Cunha  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,  
Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Civil, Belém, 2024.

1. Resíduo da Bauxita. 2. Argamassa. 3. Filler. I.  
Título.

CDD 624

---

## **AGRADECIMENTO**

Agradeço primeiramente a Deus, por todas as bênçãos, grandes e pequenas, cada uma delas tem o seu valor em minha vida, obrigada por me dares exatamente o que preciso na hora certa, pelo conhecimento e me agraciado por ter pessoas magnificas na minha vida.

Gostaria de agradecer a Rosangela Pedroso da Silva e Idena Campos Pedroso, pelo incentivo nos momentos difíceis e suas orações, toda a solidariedade e acolhimento que precisei, fez com que houvesse motivação para realizar essa pesquisa.

Evidencio um agradecimento especial ao então Co-Autor da pesquisa Rodrigo Pedroso da Silva, que colaborou assiduamente no desenvolvimento da pesquisa, por ter passado comigo em todos os momentos difíceis, transmitindo otimismo e segurança desde o princípio, por trabalhar com tanto esforço, do início do refinamento da lama vermelha a preparação das argamassas e nos ensaios em geral até a escrita da dissertação.

Agradeço ao Prof. Dr. Alcebíades Negrão Macêdo, pelo aceite a essa pesquisa, confiar no meu trabalho e na minha aprovação ao Programa de Pós-graduação.

Meu estimo obrigado ao Prof. Dr. Rodrigo Rodrigues da Cunha que se comprometeu a me auxiliar na pesquisa, contribuindo através de leituras e fundamentações.

Sou muito grata a Prof. Dr. Amanda Lucena de Medeiros, que viabilizou e forneceu o forno mufla para que a calcinação da lama vermelha do presente estudo fosse desenvolvida.

Agradeço ao Técnico Joel Silva Martins, pelo apoio e auxílio a realização dos ensaios mecânicos, sendo de fundamental importância.

Agradeço ao Prof. Dr. Cláudio Remédios pelo uso dos equipamentos do LABNANO-AMAZON/UFPA. E apoio técnico Dra. Graziela Telles e Técnico João Godinho pela execução dos ensaios de DRX, FTIR e MEV.

Desejo, a todos que contribuíram com a realização a este trabalho de maneira direta ou indiretamente, que Deus lhes conceda saúde e graças na vida.

A motivação e o principal combustível para o sucesso.

Clóvis Rosa

## **RESUMO**

**VIEIRA, T. C. M. Resíduo da bauxita calcinado como material em substituição do cimento na produção das argamassas de assentamento.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Pará. Belém, 2023.

O resíduo da bauxita é um produto residual gerado através do processo Bayer na fabricação alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) como matéria-prima para a produção de alumínio, a eliminação frequentemente é realizada através de depósitos de armazenamento de grandes reservatórios, e uma ameaça ao meio ambiente em razão do teor tóxico de alcalinidade. Foram realizados ensaios no resíduo da bauxita na Universidade Federal do Pará na tentativa de destinar e reduzir a quantidade desses reservatórios. Este trabalho tem como objetivo analisar a reação da composição mineralógica do resíduo da bauxita através da calcinação, com o intuito de desenvolver uma melhora nas propriedades químicas, aproveitando o pequeno tamanho de partículas de 75  $\mu\text{m}$  na substituição parcial do cimento em porcentagens de 10%, 15% e 20%, em prol de averiguar o desempenho através dos ensaios mecânicos das argamassas de assentamento de alvenaria estrutural no estado endurecido. No resíduo do processo Bayer foi realizada calcinações isoladas em temperaturas de 800°C, 900°C e 1000°C, por um período de queima de três horas posteriormente, moída em um moinho de bolas em sequente passou-se na peneira 0,075mm, condizendo com a granulometria do cimento. Os resultados expuseram que o resíduo da bauxita calcinada em temperaturas de 800°C, 900°C classificados como material não pozolânico, sendo somente o único que apresentou um teor de índice de atividade pozolânica foi 1000°C, em relação a avaliação do início e final de pega, todas as pastas indicou uma aceleração das reações dos compostos aluminosos da lama vermelha com os compósitos de hidratação do cimento, as resistências mecânicas a 1000°C apresentaram-se maiores, com 25,22 MPa em significância de resistência a compressão axial, comparadas com argamassa de referência. Conclui-se que em sua maioria os resultados obtidos foram abaixo dos 25 MPa pré-estabelecidos, mesmo não alcançando a resistência estipulada, todas possuíram uma classificação excelente, estando dentro dos parâmetros, de utilização para assentamento.

**Palavras-chave:** Resíduo da Bauxita. Argamassa. Filler.

## **ABSTRACT**

**VIEIRA, T. C. M. Calcined bauxite residue as a material to replace cement in the production of laying mortars.** Masters dissertation. Post-graduate Program in Civil Engineering. Federal University of Pará. Belém, 2023.

Bauxite residue is a waste product generated through the Bayer process in the manufacture of alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) as a raw material for the production of aluminum, disposal is often carried out through large reservoir storage depots, and a threat to the environment due to the toxic alkalinity content. Tests were carried out on bauxite residue at the Federal University of Pará in an attempt to allocate and reduce the quantity of these reservoirs. This work aims to analyze the reaction of the mineralogical analysis of bauxite residue through calcination, with the aim of developing an improvement in chemical properties, taking advantage of the small particle size of 75  $\mu\text{m}$  in the partial replacement of cement in percentages of 10%, 15% and 20%, in order to verify the performance through mechanical tests of mortars for laying structural masonry in the hardened state. Isolated calcinations were carried out on the residue from the Bayer process at temperatures of 800°C, 900°C and 1000°C, for a burning period of three hours, subsequently ground in a ball mill and subsequently passed through a 0.075mm sieve, matching the granulometry of the cement. The results showed that the residue of bauxite calcined at temperatures of 800°C, 900°C classified as non-pozzolanic material, with only the only one that presented a pozzolanic activity index content being 1000°C, in relation to the evaluation of the beginning and end of handle, all pastes indicated an acceleration of the reactions of the aluminous compounds of the red mud with the cement hydration composites, the mechanical resistances at 1000°C were higher, with 25.22 MPa in significance of resistance to axial compression, compared with reference mortar. It is concluded that most of the results obtained were below the pre-established 25 MPa, even though they did not reach the stipulated resistance, all of them had an excellent classification, being within the parameters of use for laying.

**Palavras-chave:** Bauxite Residue. Mortar. Filler.

## **LISTA DE SIGLAS**

ABAL	Associação Brasileira de Aluminio
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
A/C	Relação água/cimento
ACI	American Concrete Institute
ARBC	Argamassa com Resíduo da Bauxita Calcinada
CP	Corpo de Prova
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
DRX	Difratometria de Raios-X
FCK	Resistência característica do concreto à compressão
FRX	Fluorescência de Raios-X
ISO	International Standard
RB	Resíduo da Bauxita
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
PH	Potencial Hidrogeniônico
PPGF	Programa de Pós-Graduação em Física
UFPA	Universidade Federal do Pará

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1 – Estrutura da dissertação.....</b>	<b>17</b>
<b>Figura 2 – Reservas Mundiais de Bauxita.....</b>	<b>19</b>
<b>Figura 3 – Processo Bayer.....</b>	<b>23</b>
<b>Figura 4 – Resíduo de bauxita da produção de alumina.....</b>	<b>25</b>
<b>Figura 5 – Intensidade de emissão - refino de alumina.....</b>	<b>25</b>
<b>Figura 6 – Processos de calcinação e refinamento.....</b>	<b>34</b>
<b>Figura 7 – Recipiente utilizado para calcinação da amostra residual.....</b>	<b>34</b>
<b>Figura 8 – Processo de moagem no moinho de bolas.....</b>	<b>35</b>
<b>Figura 9 – Resíduos da bauxita após o refino na peneira 0,075mm.....</b>	<b>35</b>
<b>Figura 10 – Curva Granulométrica do Retido Acumulado% do Agregado Miúdo com os limites da distribuição segundo a ABNT NBR 7211: 2022.....</b>	<b>42</b>
<b>Figura 11 – Distribuições dos grãos (Areia).....</b>	<b>42</b>
<b>Figura 12 – Porcentagem do índice de atividade pozolânica do Resíduo da Bauxita .....</b>	<b>44</b>
<b>Figura 13 – Difração de raios-x do resíduo da bauxita in-natura e calcinadas .....</b>	<b>46</b>
<b>Figura 14 – Fluxograma da etapa de produção das argamassas.....</b>	<b>55</b>
<b>Figura 15 – Fluxograma das etapas de execução do método ABCP baseado da ACI 211.1-91 (2002).....</b>	<b>57</b>
<b>Figura 16 – Curva de Abrans do cimento (ABCP).....</b>	<b>58</b>
<b>Figura 17 – Fluxograma da mistura dos materiais da argamassa.....</b>	<b>59</b>
<b>Figura 18 – Determinações de índice de consistência das argamassas.....</b>	<b>63</b>
<b>Figura 19 – Moldes após ser submetido a uma película de água e envolvidos em filme plástico.....</b>	<b>65</b>
<b>Figura 20 – Disposição dos corpos de prova no dispositivo de carga para o ensaio de compressão axial segundo a NBR 13279 (ABNT, 2005).....</b>	<b>66</b>
<b>Figura 21 – Dispositivo de carga para ensaio de resistência a tração na flexão.....</b>	<b>67</b>
<b>Figura 22 – Ensaio de tração na flexão dos prismas de argamassa.....</b>	<b>67</b>
<b>Figura 23 – Massa Específica no estado fresco e Teor de ar.....</b>	<b>70</b>
<b>Figura 24 – Relação entre índice de vazios e absorção de água e das argamassas .....</b>	<b>73</b>
<b>Figura 25 – Massas Específicas no Estado Endurecido.....</b>	<b>74</b>

<b>Figura 26 – Resistências a compressão Axial em CP's 5x10cm de argamassas ARB10C800, ARB15C800 e ARB20C800 comparadas a ARC.....</b>	<b>76</b>
<b>Figura 27 – Resistências a compressão Axial em CP's 5x10cm de Argamassas de ARB10C900, ARB15C900 e ARB20C900 comparadas a ARC.....</b>	<b>76</b>
<b>Figura 28 – Resistências a compressão Axial em CP's 5x10cm de Argamassas de ARB10C1000, ARB15C1000 e ARB20C1000 comparadas a ARC.....</b>	<b>77</b>
<b>Figura 29 – Resistência a Tração na Flexão dos prismas de argamassa.....</b>	<b>79</b>
<b>Figura 30 – Resistência a Tração por Compressão Diametral aos 28 dias.....</b>	<b>81</b>
<b>Figura 31 – Módulo de deformação dos corpos de prova aos 28 dias.....</b>	<b>83</b>
<b>Figura 32 – Micrografia da argamassa ARC 200X (A) e 5000X (B).....</b>	<b>84</b>
<b>Figura 33 – Micrografia da argamassa ARB10C800 200X (A) e 5000X (B).....</b>	<b>85</b>
<b>Figura 34 – Micrografia da argamassa ARB15C900 200X (A) e 5000X (B).....</b>	<b>85</b>
<b>Figura 35 – Micrografia da argamassa ARB15C1000 200X (A) e 5000X (B).....</b>	<b>86</b>

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Pesquisas sobre o resíduo da bauxita .....	19
<b>Tabela 2</b> - Produção bruta de alumínio no Pará .....	21
<b>Tabela 3</b> - Rejeitos e resíduos de bauxita.....	24
<b>Tabela 4</b> - Estudos sobre o resíduo da bauxita em substituições de argamassas e concretos.....	27
<b>Tabela 5</b> - Características físicas, químicas e mecânicas do cimento CP II F 32 ....	36
<b>Tabela 6</b> - Propriedade e característica do aditivo.....	37
<b>Tabela 7</b> - Composição química, comumente encontrado no Brasil .....	38
<b>Tabela 8</b> - Requisitos químicos .....	40
<b>Tabela 9</b> - Requisitos físicos .....	40
<b>Tabela 10</b> - Características do Agregado Miúdo (Areia) obtido em Laboratório .....	41
<b>Tabela 11</b> - Massa específica do resíduo da bauxita in-natura e calcinado .....	43
<b>Tabela 12</b> - Índice de atividade pozolânica do Residuo da Bauxita - NBR 5752 (ABNT, 2014) .....	44
<b>Tabela 13</b> - Composição química do resíduo da bauxita in- natura e calcinada .....	45
<b>Tabela 14</b> - Grupos de Argamassas Produzidas .....	56
<b>Tabela 15</b> - Procedimentos experimentais para a caracterização das propriedades das argamassas produzidas .....	60
<b>Tabela 16</b> - Cimento Portland .....	61
<b>Tabela 17</b> - Fator a/c, Fck, Traço e Aditivo .....	62
<b>Tabela 18</b> - Numero de amostras moldados .....	64
<b>Tabela 19</b> - Parâmetros de densidade de Massa e teor de ar no estado fresco.....	71
<b>Tabela 20</b> - Início e Fim de Pega das argamassas .....	71
<b>Tabela 21</b> – Massa específica no estado endurecido .....	75
<b>Tabela 22</b> - Classe de uso e critérios de resistências a compressão axial de argamassa para alvenaria estrutural .....	78
<b>Tabela 23</b> - Resistência a Tração na Flexão com desvio padrão aos 7 e 28 dias em (MPa).....	79
<b>Tabela 24</b> - Critério classificação de resistência a tração na flexão.....	80
<b>Tabela 25</b> - Resistências a Tração por Compressão Diametral (MPa) .....	81
<b>Tabela 26</b> - Resultados das resistências a compressão, massa específica e efeito das variáveis do modulo de deformação.....	82

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO .....	14
1.1.	RELEVÂNCIA DO TEMA E JUSTIFICATIVA .....	14
1.2.	OBJETIVOS .....	15
1.2.1.	Objetivo geral.....	15
1.2.2.	Objetivos específicos.....	15
1.3.	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	16
2-	REFERENCIAL TEÓRICO .....	18
2.1.	ALUMINA .....	18
2.2.	PROCESSO BAYER .....	20
2.3.	RESÍDUO DA BAUXITA (RB) .....	24
2.4.	PESQUISAS DESENVOLVIDAS COM SUBSTITUIÇÃO DO CIMENTO.26	
2.5.	CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO DA BAUXITA EM SUBSTITUIÇÃO NO CIMENTO.....	28
2.6.	MINERALOGICAS .....	29
3-	ARTIGO 1 - CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS PARA ARGAMASSA COM RESÍDUO DA BAUXITA CALCINADA EM SUBSTITUIÇÃO DO CIMENTO ...31	
3.1.	INTRODUÇÃO .....	32
3.2.	METODOLOGIA .....	33
3.2.1.	Materiais.....	33
3.2.2.	Métodos.....	38
3.3.	ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	41
3.3.1.	Agregado Miúdo .....	41
3.3.2.	Massa específica do resíduo da Bauxita.....	43
3.3.3.	Índice de Atividade Pozolânica (IAP) – Cimento.....	43
3.3.4.	Espectrometria por fluorescência de raios-X (FRX).....	44
3.3.5.	Difração de raios-X (DRX).....	46
3.4.	CONCLUSÃO .....	47
3.5.	REFERÊNCIAS .....	48
4-	ARTIGO 2 – ANALISE DAS PROPRIEDADES DO RESÍDUO DA BAUXITA CALCINADO, COMO MATERIAL EM SUBSTITUIÇÃO DO CIMENTO NA PRODUÇÃO DAS ARGAMASSAS DE ASSENTAMENTO.....	52
4.1.	INTRODUÇÃO .....	53
4.2.	METODOLOGIA .....	54
4.2.1.	Materiais .....	54

<b>4.2.2. Métodos.....</b>	<b>55</b>
<b>4.3- ANÁLISE DE RESULTADOS .....</b>	<b>69</b>
<b>4.3.1. Massa específica e teor de ar incorporado no estado fresco .....</b>	<b>70</b>
<b>4.3.2. Início e fim de pega .....</b>	<b>71</b>
<b>4.3.3. Absorção de Água e Índice de vazios por imersão em argamassas .....</b>	<b>73</b>
<b>4.3.4. Massa específica aparente no estado endurecido .....</b>	<b>74</b>
<b>4.3.5. Resistencia à compressão axial.....</b>	<b>75</b>
<b>4.3.6. Resistencia a tração na flexão .....</b>	<b>78</b>
<b>4.3.7. Compressão a tração diametral .....</b>	<b>80</b>
<b>4.3.8. Modulo de elasticidade estático.....</b>	<b>82</b>
<b>4.3.9. Análise Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) .....</b>	<b>84</b>
<b>4.4. CONCLUSÃO .....</b>	<b>86</b>
<b>4.5. REFERÊNCIAS .....</b>	<b>88</b>
<b>5- CONCLUSÃO GERAL.....</b>	<b>92</b>
<b>5.1 Sugestões para trabalhos futuros .....</b>	<b>93</b>
<b>6- REFERÊNCIAS GERAIS.....</b>	<b>95</b>

## **1. INTRODUÇÃO**

### **1.1. RELEVÂNCIA DO TEMA E JUSTIFICATIVA**

A fabricação moderna de alumínio inicia pela mineração de resíduo de bauxita, minério de relevância com altos teores de alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Rodrigues, (2018), cita a origem do nome deste minério está atrelada à aldeia de Les Baux (França) onde o geólogo, Pierre Berthier, identificou o mineral. Devido à sua composição química e mineralógica, a bauxita possui uma ampla gama de aplicações industriais. Bauxita mineral, uma matéria-prima heterogênea que consiste principalmente em um ou mais tipos de hidróxido de alumínio (gibsita ( $\gamma\text{-Al(OH)}_3$ ), boemita( $\gamma\text{-AlOOH}$ ), diáspero( $\alpha\text{-AlOOH}$ )), acrescido de uma mistura de compostos contendo sílica, óxido de ferro, titânia e aluminossilicatos. O projeto em questão, tem a finalidade de analisar a reação da composição mineralógica do resíduo da bauxita através da calcinação, com intuito de aproveitar o pequeno tamanho de partículas de 75  $\mu\text{m}$  na substituição parcial do cimento, em prol de averiguar o desempenho através dos ensaios mecânicos das argamassas de assentamento de alvenaria estrutural no estado endurecido, no presente estudo serão comparadas as diferentes propriedades mecânicas, da argamassa de referência com as argamassas que ocorreram a substituição parcial do cimento. O trabalho foi inspirado em Aquino (2007), Manfroi, Cherif e Rocha (2010), Hardjito, Wibowo e Christianto (2012) e Danner e Justnes (2020), devido possuir resultados promissores de resíduo da bauxita calcinada em substituição parcial do cimento que influencia na resistência, visando maximizar o uso em argamassas e concreto.

Com a crescente demanda por alumínio, o estoque de resíduo de bauxita é um passivo com proeminente crescimento, tornando-se uma ameaça para as empresas do setor. Segundo o Instituto Brasileiro de Mineração IBRAM (2016), o Brasil é o terceiro maior produtor de minério de ferro do mundo e os estados de Minas Gerais e do Pará contribuem com a maior parcela dessa produção, 71% e 26%, respectivamente.

A empresa Hydro extrai bauxita e refina alumina, para depositar os rejeitos, a mineração Barcarena-Pará, Brasil possui duas instalações, o sistema de barragens do vale e o sistema do platô, localizados na região do entorno da mina. De acordo com Hydro Alunorte (2020) o sistema Vale tem capacidade de armazenamento de

mais de 50 milhões de metros cúbicos, o sistema do Platô possui capacidade de armazenamento de 11 milhões de metros cúbicos de rejeitos. Associação Brasileira do Alumínio ABAL (2023) informa que, o alumínio é um minério encontrado em três principais grupos climáticos: Mediterrâneo, Tropical e Subtropical, a bauxita deve apresentar no mínimo 30% de óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ) para que a produção seja viável.

De acordo com World Aluminium and the European Aluminium Association (2015) o processo Bayer é responsável pela grande parte da produção mundial de alumina e objetiva a extração de alumina existente na bauxita, sendo aplicada ao minério de bauxita no processo hidrometalúrgico, para isso, a World Aluminium and the European Aluminium Association (2015) cita, a utilização uma solução concentrada de soda cáustica e uma fração de aluminato de sódio denominada de licor, múltiplos processos são conduzidos nesse licor, entretanto os primordiais elementos da matérias primas usufruídos no processo são a soda cáustica, a bauxita, a cal, combustível e aditivos como flokulantes e redutores de encrostamento. A alumina é utilizada em vários produtos, em que consumo principal é produzir alumínio, onde minério não dissolvido desse processo é chamado de resíduo de lama vermelha ou bauxita. (WORLD ALUMINIUM AND THE EUROPEAN ALUMINIUM ASSOCIATION, 2015).

## 1.2. OBJETIVOS

### 1.2.1. Objetivo geral

Analisar o desempenho do resíduo da bauxita calcinada em temperaturas de 800°C, 900°C e 1000°C em substituições de 10%, 15% e 20% na massa do cimento CP II-F-32, sendo empregado como filler aproveitando o pequeno tamanho de partículas de 75 µm, para produção das argamassas de assentamento, com intuito de desenvolver uma melhora nas propriedades químicas, em prol de averiguar o desempenho através dos ensaios mecânicos das argamassas no estado endurecido.

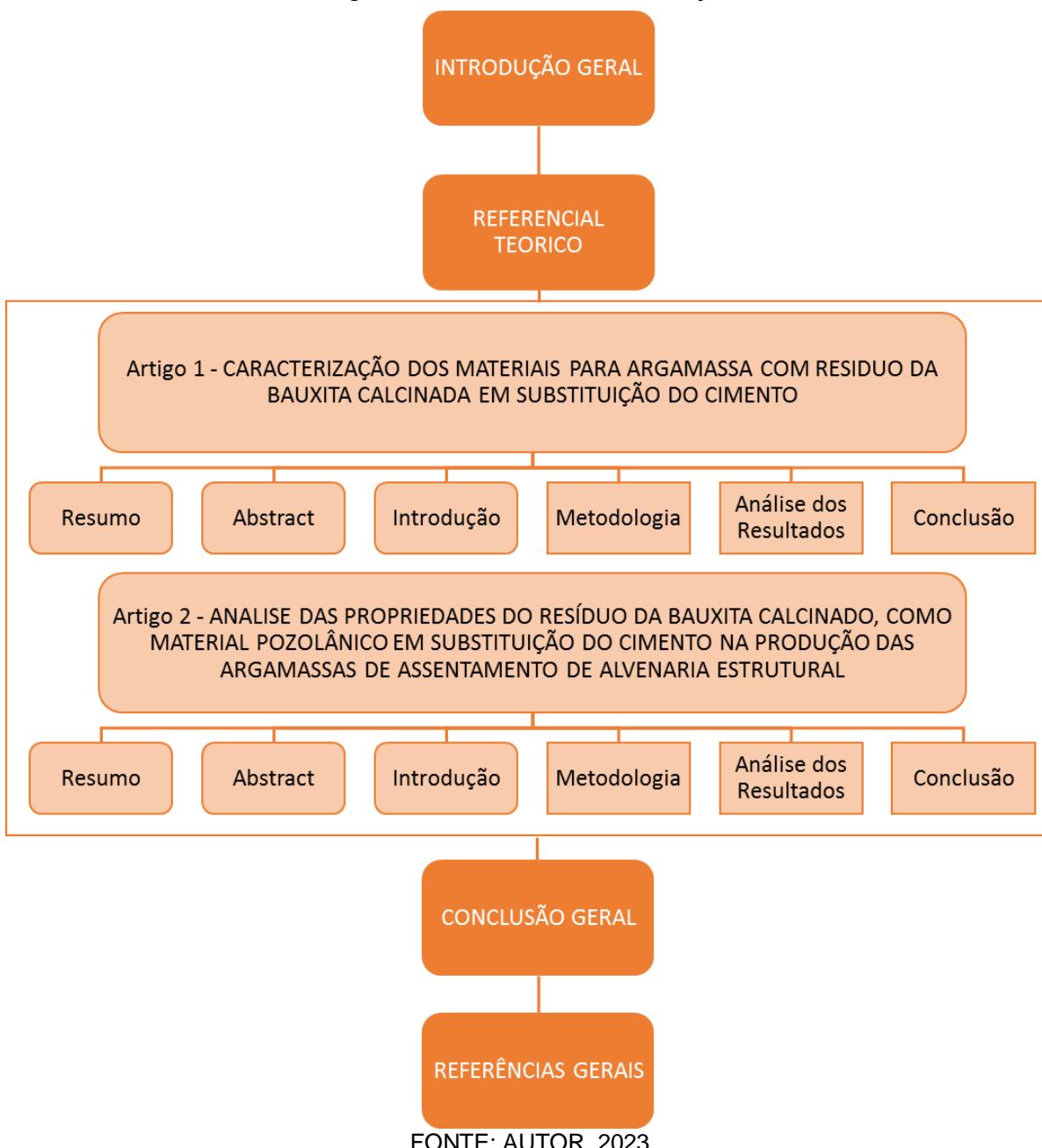
### 1.2.2. Objetivos específicos

- a) Preparar as amostras calcinadas em temperaturas de 800°C, 900°C e 1000°C, posteriormente executar a moagem na peneira de 0,075mm.
- b) Caracterizar as amostras físicas (Massa específica e índice de atividade pozolanica) e quimicamente (Fluorescência de Raio-X e Difração de Raio-x) do resíduo da bauxita.
- c) Dosar e desenvolver amostras do resíduo da bauxita calcinada em substituições de 10%, 15% e 20% no cimento CP II-F-32, sendo empregado como filler para produção de argamassas.
- d) Avaliar as propriedades das amostras de argamassas produzidas no estado fresco, índice de consistência, densidade de massa aparente, teor de ar e tempo de pega.
- e) Avaliar as propriedades das amostras de argamassas produzidas no estado endurecido, absorção de agua e índice de vazios por imersão, densidade de massa aparente, resistência a tração na flexão, resistência a compressão axial, compressão diametral, modulo de elasticidade estático e carbonatação natural.
- f) Analisar a microestrutura das amostras de argamassas produzidas, através Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

### 1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A estrutura da pesquisa está fracionada em 5 (cinco) fases. O fluxograma das etapas sequenciais da dissertação está apresentado na Figura 1.

Figura 1 Estrutura da dissertação.



FONTE: AUTOR, 2023.

## **2- REFERENCIAL TEÓRICO**

O alumínio é um dos elementos mais profuso da crosta terrestre e no mundo contemporâneo, possui grande relevância econômica. A World Aluminium and the European Aluminium Association (2015), informa, o alumínio é um constituinte de muitas rochas, minerais e minérios e tem que ser extraído e convertido em metal por meio de uma combinação de produtos químicos e processos eletrolíticos, o alumínio é um metal resistente e leve. O resíduo da bauxita derivado do processo Bayer da região Norte do Brasil (Barcarena-Pá), realizou-se uma revisão bibliográfica com intuito de compreender a composição química do resíduo do processo Bayer e de modo geral as aplicações na construção civil.

### **2.1. ALUMINA**

A World Aluminium and the European Aluminium Association (2015) menciona, o precursor normal do metal alumínio é o alumínio óxido (alumina), embora as rotas baseadas em cloretos de alumínio também tenham sido desenvolvidas e empregadas em uma escala muito pequena. Os usos deste material são dos mais múltiplos presumíveis, é usado em equipamentos aeroespaciais e na permutação do aço em blocos de motor e estruturas metálicas. Na indústria automotiva, a incorporação do alumínio nas estruturas metálicas e no motor auxiliou, principalmente, na atenuação do uso de combustível de modo consequente, na diminuição nas emissões de gases de efeito estufa.

Segundo o relatório U.S.G.S (2020), as reservas de bauxita do Brasil estimam-se em 2,6 bilhões de toneladas métricas em base seca, aproximadamente 8,7% das reservas mundiais, com focos em Minas gerais, em sua maioria no estado do Pará. U.S.G.S (2020), ainda cita que com essas reservas, o Brasil se posiciona no 4º lugar, perdendo para o Vietnã, com 3,7 bilhões, a Austrália, com 6,0 bilhões e a Guiné, com 7,4 bilhões, como demonstrado na figura 2.

Figura 2 Reservas Mundiais de Bauxita

País	Tamanho das reservas (mil toneladas em base seca)
Mundo (arredondado)	30,000,000
Guiné	7,400,000
Australia	6,000,000
Vietnã	3,700,000
Brasil	2,600,000
Jamaica	2,000,000
China	1,000,000
Indonesia	1,000,000
Guiana	850,000
India	830,000
Russia	500,000
Grécia	250,000
Arábia Saudita	210,000
Cazaquistão	160,000
Malásia	110,000
EUA	20,000
Outros Países	3,200,000

FONTE: BAUXITE AND ALUMINA, 2018

Tabela 1 Pesquisas sobre o resíduo da bauxita

Países	Produção (t)	
	2018	2019
Austrália	86400	100000
China	79000	75000
Guiné	57000	82000
<b>Brasil</b>	29000	29000
Índia	23000	26000
Indonésia	11000	16000
Jamaica	10100	8900
Rússia	5650	5400
Vietnam	4100	4500
Arábia Saudita	3890	4100
Malásia	500	900
Estados Unidos	0	0
Canada	0	0
Outros Países	17000	15000
<b>Total Mundial</b>	326640	366800

FONTE: USGS, 2020

Devido a uma paralisação na produção da bauxita, ocorreu uma diminuição em 2018 referente alguns países, e um aumento significativo no ano de 2019, como demonstrado na tabela 1, a USGS (2020) explica em abril, o governo da Malásia encerrou sua proibição à mineração de bauxita que impôs em janeiro de 2016 pelo fato de preocupações com a poluição das minas e estoques descobertos nos portos. Segundo World Aluminium and the European Aluminium Association (2015), o mineral bauxita, matéria-prima heterogênea composta principalmente de um ou mais tipos de hidróxido de alumínio (gibsita, boemita, diásporo), acrescido de uma mistura de compostos contendo sílica, óxido de ferro, titânia e aluminossilicatos.

Segundo World Aluminium and the European Aluminium Association (2015) no Brasil existem quatro refinarias de alumina conduzindo o processo Bayer: sendo companhia brasileira de alumínio (CBA), de controle da Votorantim metais; o Consórcio de alumínio do maranhão S.A. (Alumar); formado pela Alcoa, RioTinto Alcan e BHP Billington. Seguida com a refinaria de Poços de Caldas controlada pela Alcoa e a Alumina do Norte do Brasil S.A (Alunorte), controlada pela Hydro. Ainda de acordo com associação a produção de alumínio começa pela mineração de bauxita, minério de interesse com altos teores de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

## 2.2. PROCESSO BAYER

O processo Bayer, e disposto por grande percentual de refinarias no mundo, é responsável pela maioria da fabricação mundial. O relatório da World Aluminium and the European Aluminium Association (2015) relata que mais de 95% da alumina fabricado globalmente é derivado da bauxita pelo processo Bayer, a fabricação limitada de alumina usa outros processos, como, o VAMI e processos de rota de sinterização na Rússia e China. Bauxita e nefelina sienito são as principais fontes de matéria-prima, de acordo com o relatório “o trabalho experimental é continuando a usar caulin e argilas com alto teor de alumina”. Os materiais residuais surgem durante essas etapas de produção de alumina, aqueles que usam o processo de extração de bauxita Bayer são referidos "lama vermelha", embora aqueles de diferentes rotas que usam outros materiais aluminosos dão origem a belita / lama branca.

A World Aluminium and the European Aluminium Association (2015) diz que os parâmetros de processos, concentração de hidróxido de sódio e temperaturas de operação são definidos basicamente pela bauxita que será utilizada no processo.

Assumindo uma bauxita gibsítica nos padrões do norte do Brasil, onde ainda completa que para a produção de 1T tonelada de alumina, são necessários aproximadamente 2T toneladas de bauxita, sendo produzidas 2T toneladas de subproduto (resíduo de processo Bayer) é produzido. Em seguida a associação diz, essa 1T tonelada de alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) é alimentada nas células eletrolíticas e produz, aproximadamente, meia tonelada de alumínio (Al) primário que é a proporção estequiométrica entre o alumínio e a alumina". Na tabela 2, demonstra a produção bruta de alumínio no estado do Pará.

Tabela 2 Produção bruta de alumínio no Pará

Substancia	Quantidade (t)	Contido (t)	Teor Médio (%)
Alumínio (Bauxita)	46.767.625	22.312.212	47,71 $\text{Al}_2\text{O}_3$

FONTE: DNPM, 2017

De acordo com World Aluminium and the European Aluminium Association (2015) o processo Bayer é responsável pela grande parte da produção mundial de alumina e objetiva a purificação da alumina existente na bauxita. Para isso segundo a associação e, utilizado uma solução concentrada de soda cáustica e uma fração de aluminato de sódio denominada de licor. Múltiplos processos são conduzidos nesse licor. De acordo com associação as principais matérias primas utilizadas no processo são a soda cáustica, a bauxita, a cal, combustível e aditivos como floculantes e redutores de encrostamento.

Segundo World Aluminium and the European Aluminium Association (2015) dentro do processo Bayer existe as fases, na digestão, o processo é responsável por retirar o material desejado de sua matriz mineral, a fase não se refere somente aos digestores, reatores "CSTR" onde as reações características do processo acontecem, mas também a algumas outras operações que são necessárias para esse fim. A qual a digestão inicia segundo a associação Europeia de alumínio, usualmente, da alimentação da bateria de evaporadores à descarga do "flasheamento" de licor as reações mais importantes que acontecem durante o contato da bauxita com o licor aquecido intrínseco ao processo digestão. Onde ocorre a dissolução da gibsita, boemita e diáspera, a World Aluminium and the European Aluminium Association (2015), da conversão de alumino-goetita para hematita e alumina dissolvida,

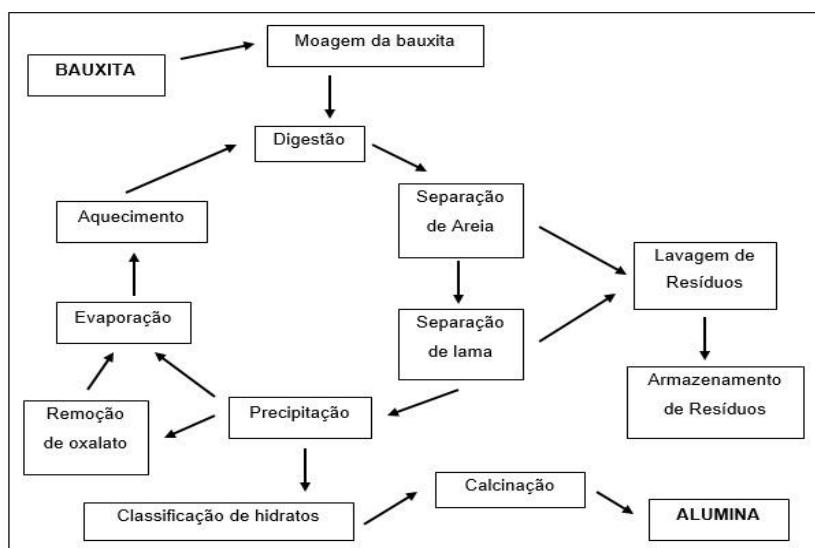
conversão da gibsita para boemita, conversão da boemita para diáspora, dissolução da caulinita, e por fim ainda continua com dissolução do quartzo, precipitação do produto da dessilicatação (DSP, Desilication Product), transformação do fosfato em hidroxiapatita , o objetivo da operação é aproveitar o máximo possível da dissolução da gibsita.

Segundo World Aluminium and the European Aluminium Association (2015) a fase clarificação, “tem a finalidade, separar o licor fase líquida do resíduo fase sólida, lavar o resíduo onde o mínimo de soda cáustica seja liberado ao meio ambiente, o circuito de clarificação e um conjunto de decantadores, lavadores e filtros”. Ainda de acordo com a associação Europeia de alumínio, o resíduo do processo Bayer, é tipicamente enviado para lagos ou depósitos de resíduos sólidos, dependendo do processo adotado pela refinaria em questão.

Na fase de precipitação os autores Wang e Yuehua, (2015), dizem, o licor rico clarificado é alimentado à região de precipitação, a corrente de licor rico passa por resfriamento em evaporadores a vácuo e trocadores de calor do tipo placa, onde há a conversão de calor com os fluxos de licor pobre ou com a fluxo de água procedente das torres de resfriamento conseguinte ser introduzido na linha de precipitação. Aboagye et al. (2012), confirma que, “o fator que possibilita a nucleação é a semeadura de cristais de gibsita no início da cadeia de precipitadores”, e, consequentemente, a forma como a categorização é realizada define a produtividade e qualidade do produto de uma refinaria de alumina. Hudson et al. (2012), complementa, as variáveis pertinentes para o controle desta etapa do processo são: vazão de licor alimentado, quantidade de semente adicionada e temperatura alcançada durante o circuito, já que a reação é exotérmica.

A Hydro Alunorte, no Brasil, usa o processo para a fabricação de alumina e demonstrado na figura 3.

Figura 3 Processo Bayer



FONTE: adaptado de JAMIESON, 2013

A World Aluminium and the European Aluminium Association (2015), diz, o minério de bauxita está prontamente disponível e contém óxidos e hidróxidos de alumínio em níveis entre 30 e 65% (medido como óxido de alumínio), estimativas atuais do mundo conhecido as reservas são de cerca de 30 bilhões de toneladas com indicações de reservas não comprovadas sendo muito mais alto. Os depósitos de bauxita são encontrados especialmente em uma ampla faixa ao redor do equador, as minas de bauxita da Hydro estão localizadas no estado do Pará, no extremo norte do Brasil. Segundo o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM 2017), “grande parte das reservas mundiais de bauxita se encontra localizada em regiões tropicais e subtropicais, ocorrendo em três principais tipos de climas, sendo que 57% (tropical), 33% (mediterrâneo) e 10% (subtropical)”. A matéria-prima fundamental para fabricação alumínio primário é o óxido de alumínio, também denominado de alumina, é um pó branco produzido pelo refino da bauxita. A Hydro (2020), diz que “cerca de duas toneladas de alumina são necessárias para produzir uma tonelada de alumínio”. Jamieson (2013), expôs que, alguns depósitos de bauxita contêm uma quantidade significativa de material orgânico, alguns dos quais se dissolvem no licor, aumentando a carga de impurezas, essas variedades orgânicas são intituladas como Carbono Orgânico Total (TOC). O autor enfatiza que presença de TOC e outras impurezas em licores Bayer reduz a produtividade em grande parte por meio de dois efeitos, os compostos orgânicos podem agir como ácidos e combinar-se com o cáustico livre, isso simplifica a cáustica acessível para fluidificar a alumina do minério

de bauxita. Jamieson (2013), diz a alta solubilidade de várias espécies orgânicas, em última análise, reduz a concentração geral de soda cáustica no circuito do licor e a quantidade de aluminato que ele pode transportar, nessa conformidade menos produto hidratado é produzido para cada etapa do licor. A alumina também é utilizada para diversos outros fins, como purificação de água e como aditivo em várias aplicabilidades.

### 2.3. RESÍDUO DA BAUXITA (RB)

De acordo com a Hydro Alunorte, (2020), os rejeitos da extração de bauxita consistem em rejeitos minerais do processo de extração misturados com água, os rejeitos de Paragominas são armazenados em barragens dedicadas”, onde as partículas assentam. Paragominas é a única mina consolidada da Hydro.

Conforme a Hydro Alunorte, (2020), “o resíduo de bauxita, é um subproduto do refino da alumina, o resíduo é lavado com água para diminuir a alcalinidade, e a soda cáustica recuperada é reciclada para uso no processo produtivo”. O sedimento é empilhado a seco como uma substância similar a argila com baixo teor de umidade. Na tabela 3 observa-se os rejeitos e resíduos originados da bauxita dos anos de 2015 a 2019, levando em consideração uma diminuição significativa do ano de 2015 para 2019 na produção de rejeitos e resíduos gerados.

Tabela 3 Rejeitos e resíduos de bauxita

<b>Rejeitos e resíduos de bauxita 1 000 toneladas métricas)</b>	<b>2019</b>	<b>2018</b>	<b>2017</b>	<b>2016</b>	<b>2015</b>
Rejeitos	2,871	2,116	4,067	4,117	4,128
Resíduo da Bauxita	3,871	3,191	5,979	6,426	5,973

FONTE: HYDRO, 2020

De acordo com o relatório anual da Hydro Alunorte, (2020), usa uma tecnologia aprimorada de empilhamento a seco para descartar resíduos de bauxita, o que permite o armazenamento de resíduos em encostas mais íngremes, reduzindo as necessidades de área de disposição. O relatório da Hydro complementa que, isso reduz a pegada ambiental relativa seu descarte é desafiador devido aos grandes

volumes e à natureza alcalina do componente líquido do resíduo. O sedimento é lavado com água para abrandar a alcalinidade e reaver a soda cáustica para reciclar, como pode ser visto na figura 4.

Figura 4 Resíduo de bauxita da produção de alumina



FONTE: HYDRO, 2020

Figura 5 Intensidade de emissão - refino de alumina



FONTE: HYDRO, 2020

A diminuição de CO<sub>2</sub> em 2019 como demonstrado na figura 5 refere-se a supervisão e averiguação do risco ambiental durante a vida útil das unidades operacionais, com foco na restauração de mina de bauxita no Pará, Brasil, que geram emissões de gases que causam o efeito estufa (SO<sub>2</sub>, NOx e material particulado) para a atmosfera.

De acordo com World Aluminium and the European Aluminium Association (2015), a quantidade de resíduo de bauxita produzida por uma usina de alumina ou refinaria depende principalmente das fontes da bauxita e secundariamente nas condições de extração utilizadas pela planta, varia de 0,3 a 2,5 toneladas de resíduo por tonelada de alumina produzida. Segundo o relatório da associação Europeia de alumínio (2015), os últimos dois fatores são ditados pela natureza e forma da alumina presente, o custo local da energia e o custo e distância em que a bauxita precisa ser transportada, com as Bauxitas de alto teor de boemita precisam de maior processamento, bauxitas diaspóricas e condições ainda mais agressivas de temperatura e causticidade.

Quando explana sobre materiais cimentícios misturados a World Aluminium and the European Aluminium Association (2020), disserta sobre a oportunidade pozolânico de resíduo da bauxita, normalmente após ativação pelo calor, podendo fornecer atividade pozolânica, desempenhando um papel valioso em argamassas ou concreto como características e granulometria fina, tem potencial de melhorar algumas propriedades, como resistência à compressão comportamento reológico de uma mistura de cimento ou fornecendo um papel hidratação do cimento.

#### 2.4. PESQUISAS DESENVOLVIDAS COM SUBSTITUIÇÃO DO CIMENTO

Estudos na literatura confirmam um ganho de resistência com substituição do resíduo da bauxita no cimento para a fabricação de argamassas e concretos, a aquisição ou perda de resistência varia com os diferentes graus de substituição do resíduo e suas alterações nas propriedades físico-químicas em comparação com uma referência, o resíduo de bauxita pode elevar a durabilidade da argamassa por meio de cloreto e resistência à carbonatação, devida a oportuna refinação dos poros, a tabela 4 demonstra os autores no qual o trabalho em questão se fundamentou.

Tabela 4 Estudos sobre o resíduo da bauxita em substituições de argamassas e concretos

<b>Autores</b>	<b>Ano</b>	<b>Titulo</b>
AQUINO	2007	Beneficiamento químico da bauxita de Santa Catarina
MANFROI, CHERIAF e ROCHA	2010	Avaliação da lama vermelha como material pozolânico em Substituição ao cimento para produção de argamassas
HARDJITO, WIBOWO e CHRISTIANTO	2012	Avaliação da atividade pozolânica de LUSI (Lama Sidoarjo) Lama em Argamassa Pozolânica de Semi Alto Volume
DANNER e JUSTNES	2020	Resíduo de bauxita como material cimentício suplementar - esforços para reduzir a quantidade de sódio solúvel

FONTE: AUTORA, 2023

Aquino (2007) tem em seu trabalho como objetivo geral a caracterização da bauxita de Santa Catarina e a avaliação da lixiviação ácida como forma de beneficiamento para obtenção de uma matéria-prima adequada para a indústria de refratários, além de caracterizar a bauxita “in natura” com o intuito de verificar a sua composição, as fases mineralógicas presentes e também o seu comportamento térmico, estudar a cinética de dissolução do ferro, avaliar o efeito das condições operacionais tais como: concentração de ácido, velocidade de agitação do meio reacional, tamanho das partículas de bauxita, temperatura de reação, além de definir qual o mecanismo controlador da reação de dissolução. Concluiu-se que o processo de dissolução do ferro contido na bauxita em HCl se mostrou eficiente, obtendo uma conversão superior a 90% quando são utilizados os valores mais adequados dos parâmetros envolvidos na reação.

Manfroi, Cheriaf e Rocha (2010) tem como objetivo avaliar as características potenciais do resíduo da bauxita como material pozolânico, avaliar o potencial da ativação do resíduo seco e calcinado em diferentes temperaturas 600, 700, 800 e 900°C, Investigar o efeito da substituição do cimento Portland por 5, 10 e 15% de lama

vermelha em argamassas através da análise do consumo de hidróxido de cálcio, utilizando-se análise térmica diferencial e empregando-se a metodologia da NBR 5752 (ABNT, 2014) da comparação das resistências à compressão. Concluindo o resíduo calcinado a 900°C apresentou o menor consumo de hidróxido de cálcio, porém, maior resistência à compressão, mostrando assim um maior efeito filler, os resultados da propriedade pozolânica, resistência à compressão e sorptividade, mostraram que a substituição mais indicada é do resíduo da bauxita calcinada a 600°C.

Hardjito, Wibowo e Christianto (2012) seu estudo centra-se na possível utilização da lama LUSI de semi-alto volume com partículas inferior a 63 µm, como substituição parcial do cimento na fabricação de argamassa, relatando os resultados da influência do tamanho de partícula da lama na resistência e índice de atividade pozolânica na argamassa, além disso, o efeito do uso de quantidades maiores de substituição de cimento, 30%, 35% e 40% por lama LUSI, analisando a taxa de desenvolvimento de resistência. Concluindo, que a argamassa com 30% e 40% aumenta significativamente com o aumento do teor de lama e com a idade, a utilização de lama LUSI com até 40% como substituição de cimento é uma possibilidade.

Danner e Justnes (2020) em seu estudo investiga a viabilidade do uso do resíduo de bauxita (BR) como suplemento material cimentício para a indústria de cimento e concreto para reduzir o teor alcalino de BR, em particular para reduzir a chance de reações álcali-agregado. Concluiu-se como potencial para indústria, reduzindo o teor alcalino de BR como um procedimento economicamente viável.

## 2.5. CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO DA BAUXITA EM SUBSTITUIÇÃO NO CIMENTO

O índice de atividade pozolânica do resíduo da bauxita foi estabelecido segundo os requisitos da NBR 12653 (ABNT, 2015) destinado ao uso com cimento em concreto e argamassa classificados quanto a sua origem em pozolanas naturais e artificiais, as naturais são de origem vulcânicas de caráter petrográfico ácido e os artificiais são de tratamento térmico ou subprodutos industriais que possuem atividade pozolânica.

Segundo Lothenbach, Scrivener e Hooton, (2011), a mensuração da pozolanicidade de um material é bastante complexa, sendo necessário dispor de

metodologias para subsidiar a hierarquização de adições minerais a serem incorporadas no cimento Portland. No Brasil os procedimentos adotados, estão fundamentados na reação da adição mineral com cimento Portland NBR 5752 (ABNT, 2014) e com cal hidratada, conforme as normas NBR 15895 (ABNT, 2010) e NBR 5751 (ABNT, 2015).

A avaliação do tempo de pega é fundamentada pelas normas NBR 16606 (ABNT, 2018) e 16607 (ABNT, 2018). Onde Segundo Petrucci (1998), o tempo de início de pega ocorre desde o momento da adição de água na mistura até iniciarem as reações com os compostos do cimento, condição notalizada pelo aumento súbito na temperatura e viscosidade da pasta cimenticia, e o final de pega trata-se como sendo o momento em que pequenas cargas não deformam mais a pasta, tornando-se esta rígida.

## 2.6. MINERALOGICAS

A análise por fluorescência de raios-X é uma ferramenta importante baseia-se na medição das intensidades dos raios-X característicos emitidos pelos elementos que constituem a amostra, ela permite uma avaliação lúpida e precisa da composição química do material, Ribeiro (2006) diz que a primeira evidência da aplicação de raios-X para análise elementar foi descrita por BARCKLA no começo do século passado, a partir da observação dos espectros característicos de raios-X. A análise por fluorescência de raios-X é correntemente usada para fins qualitativos e quantitativos dos elementos químicos.

A Difração de Raio X (DRX) é uma técnica analítica e não destrutiva utilizada para determinar a estrutura e molecular de um cristal, e empregue para análise de propriedades físicas, a caracterização por DRX dos materiais é imprescindível, pois através dela, analisa suas propriedades mediante da definição dos seus arranjos cristalinos dos átomos que a constitui de forma qualitativa. Barreto (2014) descreve, a técnicas de caracterização de materiais como a difração de raios-X (DRX) é uma poderosa técnica que pode ser utilizada, primeiramente, para identificar as fases cristalinas presentes nos materiais cimentícios, pois cada sólido cristalino tem o seu padrão único de difração de raios-X que pode ser utilizado para a sua identificação.

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) possui como função a ampliação de imagem através de feixe de elétrons sobre a amostra analisada, tendo

potencial de utilização em amplos estudos através da integral caracterização de materiais naturais e sintéticos, gerando uma excelente qualidade resolução de imagem. Santos et al. (2003) diz, a Microscopia Eletrônica de Varredura é uma técnica utilizada tanto para a pesquisa básica como aplicada. Santos et al. (2003) completa que esta técnica permite a observação e a caracterização de diferentes tipos de materiais tais como: mineral, vegetal, animal e produtos agroalimentares, a partir da emissão e interação de feixes de elétrons sobre uma amostra, sendo possível caracterizá-los do ponto de vista de sua morfologia, sua organização e sua composição química.

### **3- ARTIGO 1 - CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS PARA ARGAMASSA COM RESÍDUO DA BAUXITA CALCINADA EM SUBSTITUIÇÃO DO CIMENTO**

#### **RESUMO**

A grande quantidade de resíduos sólidos insolúveis gerados pelo processo Bayer de indústrias de mineração constitui sérios problemas socioambiental. Todo resíduo de bauxita para caracterização do material foi disponibilizado por uma indústria de mineração em Barcarena no Pará. Este trabalho tem como objetivo avaliar as características físico-químico provenientes da calcinação do resíduo da bauxita, em temperaturas de 800°C, 900°C e 1000°C, em prol de verificar se o material possui características satisfatórias, para ser empregada como filler utilizando partículas de 75 µm na substituição do cimento Portland. Com esse intuito realizou-se ensaio de fluorescência de raio-x, densidade, massa específica e verificação de índice de atividade pozolanica com cimento. Conclui-se que os resultados obtidos através caracterização dos materiais são promissores para utilizar como filler na substituição do cimento.

**Palavras-chave:** Cimento. Resíduo Bauxita. Filler.

#### **ABSTRACT**

The large amount of insoluble solid waste generated by the Bayer process in mining industries constitutes serious socio-environmental problems. All bauxite residue for material characterization was made available by a mining industry in Barcarena, Pará. This work aims to evaluate the physical-chemical characteristics resulting from the calcination of the bauxite residue, at temperatures of 800°C, 900°C and 1000°C, in order to verify whether the material has satisfactory characteristics, to be used as a filler using 75 µm particles to replace Portland cement. For this purpose, x-ray fluorescence, density, specific mass and pozzolanic activity index verification were carried out with cement. It is concluded that the results obtained through characterization of the materials are promising for use as filler to replace cement.

**Keyword:** Cement. Bauxite Residue. Filler.

### 3.1. INTRODUÇÃO

O resíduo da bauxita possui altos teores de alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), segundo o Instituto de Mineração IBRAM (2016), o Brasil é o terceiro maior produtor de minério de ferro do mundo e os Estados de Minas Gerais e Pará contribui com a maior parcela dessa produção, 71% e 26% respectivamente, a indústria é altamente presente no território brasileiro, na qual colabora para o progresso socioeconômico do país. O refinamento da bauxita para conversão em alumina, acordo com ABAL (2023), os resíduos gerados do refino da bauxita são direcionados para áreas de deposição de resíduos de bauxita (ADRB). Reddy et al (2021) diz que a presença de subproduto tóxico de processos industriais representa uma série de ameaças, para a água, terra e atmosfera das áreas no entorno dos depósitos.

A Norsk Hydro (2021) relata que a taxa geração de resíduo de bauxita (RB) localizada em Barcarena no Pará foi de aproximadamente 0,91 toneladas de resíduo do processo Bayer seca por tonelada de alumina produzida, possuindo integralidade de resíduo gerado ao longo de 2020 na mesma refinaria, aproximadamente 4,9 milhões de toneladas. Segundo Zeng et al. (2020), a taxa média de aproveitamento do resíduo da bauxita ao redor do mundo está na média de 15%.

Antunes et al (2012) expõe uma alternativa para amenizar os problemas causados pelo resíduo da bauxita é o desenvolvimento de tecnologias que visem a sua reutilização. Lazou et al. (2021) complementa dizendo que pesquisas estão sendo desenvolvidas nos últimos anos buscando novas formas de aplicação para o resíduo do processo Bayer, Lazou et al. (2021) pontua que os resultados voltados para pesquisas que buscam novas formas de aproveitamento de resíduo da bauxita ainda não atingiram aplicação de escala industrial.

Neste conjunto de circunstâncias, a magnitude de resíduos sólidos insolúveis proporcionados pelo processo Bayer de indústrias. O trabalho procurou realizar análise através da caracterização físico-químico provenientes de calcinação do resíduo da bauxita, em temperaturas de 800°C, 900°C e 1000°C do material proveniente de uma indústria de mineração em Barcarena no Pará, visando expectativas satisfatórias através da caracterização, para ser empregadas como filler utilizando partículas de 75 µm na substituição no cimento Portland.

## 3.2. METODOLOGIA

### 3.2.1. Materiais

- **Resíduo da Bauxita**

O Resíduo foi obtido por meio do processo de beneficiamento da bauxita do processo bayer, que foi utilizada na forma de substituição de fino no cimento. A amostra é oriunda de uma indústria produtora de alumina no município de Barcarena/PA.

O resíduo da bauxita, não necessitou passar por secagem em estufa e nem destorramento, pois veio em estado solto e previamente seca, o processo figura 6 iniciou-se a partir da calcinação isoladamente em temperaturas de 800°C, 900°C e 1000°C, por um período de queima de três horas com intuito de promover uma melhora nas propriedades químicas através do advento a uma nova fase mineralógica, as temperaturas trabalhadas foram selecionadas segundo Danner e Justnes (2020), Hardjito, Wibowo e Christianto (2012) e Aquino (2007), a determinação ao prazo de três horas e devido a transformação em um material denominado basicamente por grãos de alfa alumina (grãos arredondados) Aquino (2007), após o tempo de calcinação em forno mufla as amostras foram retirados diretamente em alta temperatura e resfriados em clima ambiente por 24 horas, como demonstrada na figura 7, todo o processo de calcinação foi realizado no Grupo de Pesquisa em Engenharia de Materiais (GPEMAT) pertencente ao laboratório de Mecânica da UFPA.

Figura 6 Processos de calcinação e refinamento



FONTE: AUTORA, 2023

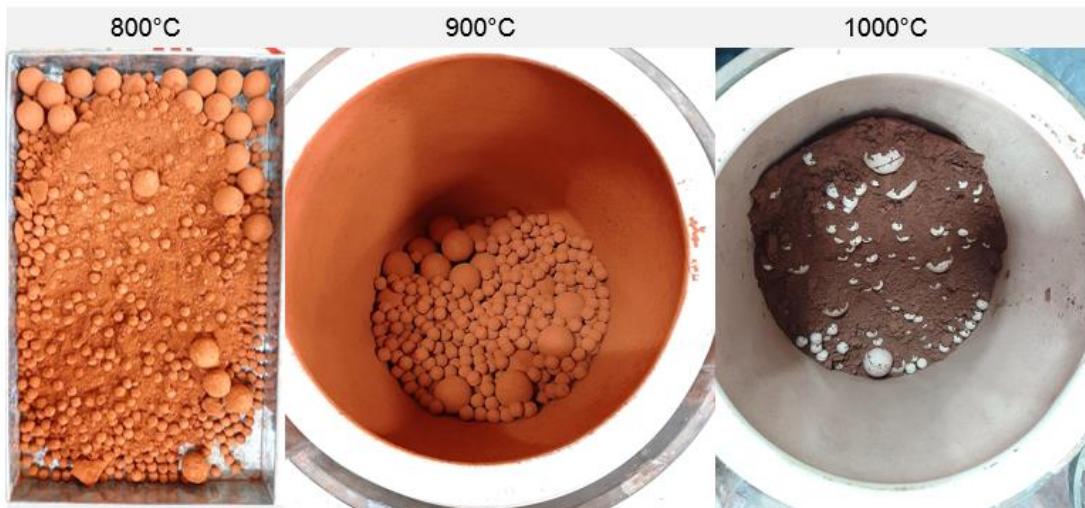
Figura 7 Recipiente utilizado para calcinação da amostra residual



FONTE: AUTORA, 2023

Posteriormente, moída em um moinho de bolas de eixo horizontal, com jarro de porcelana e diâmetro de 25 cm, movido por um motor de 40 rpm, ilustrada na figura 8, foi moído no tempo de 60 min, com aproveitamento de 80 a 92% para ficar com granulometria adequada para passar na peneira 0,075mm, observado na figura 9, foi utilizado essa abertura de malha do jogo de peneira com intuito de deixar na mesma granulometria do cimento devido a substituição ocorrer em sua massa.

Figura 8 Processo de moagem no moinho de bolas



FONTE: AUTORA, 2023

Figura 9 Resíduos da bauxita após o refino na peneira 0,075mm



FONTE: AUTORA, 2023

- **Agregado Miúdo**

Utilizou como agregado miúdo, areia proveniente de jazida Oriental situado próximo à Castanhal Km 21, a qual passou por ensaios para averiguar sua composição granulométrica de acordo com a NBR 17054 (ABNT, 2022) densidade NBR 16916 (ABNT, 2021) e massa unitária NBR 16972 (ABNT, 2021).

- **Cimento Portland**

Utilizou o cimento Portland CP II-F 32 (Cimento Portland composto com material carbonático Classe 32), de acordo com a NBR 16697 (ABNT, 2018), com massa específica de 2,96 g/cm<sup>3</sup>. Segundo Pereira (2019), CP II-F é utilizado para diversas finalidades, como no preparo de argamassas de assentamento, argamassas

de revestimento, estruturas de concreto armado, solo-cimento, pisos e pavimentos de concreto, este tipo de cimento é constituído de 90% a 94% de clínquer e gesso e de 6% a 10% de material carbonático ou fíler, caracterizando-o como um composto. Optou-se pelo uso deste cimento, pelo fato das características químicas, físicas e mecânicas além já existirem trabalhos semelhantes utilizando esse material. A tabela 5 apresenta as características químicas, físicas e mecânicas do cimento, de acordo com o fabricante.

Tabela 5 Características físicas, químicas e mecânicas do cimento CP II F 32

Características	Determinações	Valores Obtidos	Métodos de Ensaio
Físicas	Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	≥2000/≤8000	ABNT NBR 16372:2015  ABNT NBR 16697:2018
	Tempo de início de pega (h:min)	≥60	
	Tempo de fim de pega (h:min)	≤600	
	Finura na peneira # 200 (%)	≤12,0	
	Expansibilidade a frio (mm)	≤5,0	
	Expansibilidade a quente (mm)	≤5,0	
Mecânicas	Consistência normal (%)	-	ABNT NBR 16606:2018
	Resistência à compressão 1 dia (MPa)	-	ABNT NBR 16697:2018
	Resistência à compressão 3 dias (MPa)	≥10,0	
	Resistência à compressão 7 dias (MPa)	≥20,0	
	Resistência à compressão 28 dias (MPa)	≥32,0	
Químicas	Perda ao fogo (%)	≤12,5	ABNT NBR 16697:2018
	Resíduo insolúvel (%)	≤7,5	
	Trióxido de enxofre – SO <sub>3</sub> (%)	≤4,5	
	Óxido de cálcio livre – CaO Livre (%)	≤0,75	ABNT NBR NM 13:2012
	Óxido de magnésio – MgO (%)	≤0,9	ABNT NBR NM 11-2:2012
	Óxido de alumínio – Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	≤0,77	
	Óxido de silício – SiO <sub>2</sub> (%)	≤0,77	
	Óxido de ferro – Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	≤0,42	
	Óxido de cálcio – CaO (%)	≤1,5	

FONTE: AUTORA, 2023

- **Aditivo**

O aditivo líquido usado foi o retardador de pega normal e redutor de agua tipo 2/retardador RA2-R, usado como plastificante para concreto promovendo propriedades como o aumento da trabalhabilidade, melhora o acabamento superficial, reduz a retração e a fissuração, melhora a homogeneidade e aumenta a impermeabilidade. Silva (2006) diz, a classificação dos aditivos químicos está relacionada à função desempenhada dentro do concreto, e dentre os mais comuns estão os aceleradores e retardadores de pega, redutores de água (plastificantes e super plastificantes), inibidores de corrosão, incorporadores de ar, redutores de retração, formadores de gás, os mais usuais, o composto foi adicionado em pequenas quantidades para melhorar as propriedades no estado fresco e endurecido como pode ser visto na tabela 6, segundo a NBR 11768-2 (ABNT, 2019). A quantidade do produto não pode ser maior que 5% da massa de material cimentício.

**Tabela 6 Propriedade e característica do aditivo**

Propriedades	Fabricante	Método de ensaio	Requisitos
Homogeneidade	Sem Sedimentação	Exame visual	Homogêneo no momento de sua utilização, não apresentando separação ou sedimentação
Cor	Marrom Escuro	Exame visual	Uniforme e similar à descrição informada pelo fabricante
Massa específica (somente para líquidos)	$1,06 \pm 0,02 \text{ kg/L}$	ABNT NBR 11768-3:2019	Valor declarado pelo fabricante com tolerância de $\pm 0,02 \text{ g/cm}^3$
Teor de sólidos	-		Valor declarado pelo fabricante com tolerância de $\pm 2\%$
pH	$6,0 \pm 1,0$		Valor declarado pelo fabricante com tolerância de $\pm 1$
Cloreto solúveis em água (Cl)	-		Menor ou igual ao valor declarado pelo fabricante

FONTE: AUTORA, 2023 adaptada da SIKA, (2020) e NBR 11768-1 (ABNT, 2019)

- **Água**

A água utilizada foi de acordo com a NBR 15900-1: (ABNT, 2009), a água de abastecimento público é considerada adequada para o uso em misturas acimenticias, não havendo a necessidade de se fazer nenhum ensaio, a água foi fornecida pela rede de abastecimento local (Companhia de Saneamento do Pará – COSANPA).

### **3.2.2. Métodos**

- **Espectrometria por fluorescência de raios-X (FRX)**

Para a execução deste trabalho, a análise de Fluorescência de Raios-X foi realizada no Instituto SENAI, polo Belém-Pa. Foram realizadas análises químicas por Espectroscopia de Fluorescência de Raios-X por Energia Dispersiva (EDXRF), em equipamento de bancada, modelo Epsilon 3XLE, tubo de Raios-X cerâmico de Ródio e nível de potência máxima de 15 W, da marca PANalytical. Os dados foram adquiridos através do software Epsilon 3 e a interpretação foi realizada com a aplicação Omnia, ambos da PANalytical. A Tabela 7 contém a composição típica do resíduo de bauxita no Brasil, segundo a World Aluminium Organization (WAO, 2020)

Tabela 7 Composição química, comumente encontrado no Brasil

<b>Composto</b>	<b>Faixa típica de concentração (%)</b>
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5-60
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5-30
TiO <sub>2</sub>	0-15
CaO	2-14
SiO <sub>2</sub>	3-50
Na <sub>2</sub> O	1-10

FONTE: WORLD ALUMINIUM ORGANIZATION, 2020

- **Difração de raios-X (DRX)**

As análises de difração de raios X foram realizadas no Laboratório de Difração de raios X do Programa de Pós Graduação em Física da UFPA, as amostras foram analisadas em um difratômetro com geometria Bragg-Brentano e detector LynxEye, modelo D8 ADVANCE da BRUKER, tubo de raios X de Cu. Foram utilizadas as seguintes condições: faixa angular de varredura entre 5 e 90° ( $^{\circ}2\theta$ ), voltagem 40 kV e corrente 40 mA; tamanho do passo de 0,02 ° ( $^{\circ}2\theta$ ), e tempo/passo de 0,1 s, fenda divergente de 0,6 mm.

- **Massa específica**

Após o processo de calcinação do resíduo da bauxita e a redução da granulometria do material através do moinho de bolas, o resíduo passante na peneira nº 200, com abertura de malha de dimensão de 0,075 mm, dado por meio de Filler, realizou-se o ensaio de massa específica segundo a NBR 16605 (ABNT, 2017), onde os grãos são da mesma ordem de grandeza do cimento que é definida como a massa do material por unidade de volume, incluindo os poros internos das partículas, para efeito de dosagem da argamassa, é importante conhecer o volume ocupado pelas partículas do agregado, incluindo os poros existentes dentro das partículas

- **Índice de Atividade Pozolânica (IAP) – Cimento**

Os índices de atividade pozolânica do resíduo calcinado em temperaturas de 800°C, 900°C e 1000°C, foram executados utilizando-se a metodologia descrita na NBR 5752 (ABNT, 2014). E obedecendo aos requisitos da NBR 12653 (ABNT, 2015), que deve apresentar um teor de  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq 70\%$  da tabela 8, e possuir um índice de atividade pozolânica superior ou igual a 90% ao desempenho do cimento Portland aos 28 dias, abordado na tabela 9.

Tabela 8 Requisitos químicos

Propriedades	Classe de material pozolânico			Método de ensaio (valores em %)
	N	C	E	
$\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\geq 70$	$\geq 70$	$\geq 50$	ABNT NBR 17086-9: 2023
$\text{SiO}_2$	$\leq 4$	$\leq 5$	$\leq 5$	ABNT NBR 17086-5: 2023
Teor de umidade	$\leq 3$	$\leq 3$	$\leq 3$	ABNT NBR 17052: 2022
Perda de fogo	$\leq 10$	$\leq 6$	$\leq 6$	ABNT NBR 17086-6: 2023
Álcalis disponíveis em $\text{Na}_2\text{O}$	$\leq 1,5$	$\leq 1,5$	$\leq 1,5$	ABNT NBR NM 25: 2003

Os métodos de ensaios devem ser adaptados, substituindo-se o cimento Portland pelo material pozolânico.

FONTE: NBR12653 (ABNT, 2015)

Tabela 9 Requisitos físicos

Propriedades	Classe de material pozolânico			Método de ensaio
	N	C	E	
Material retido na $45\mu\text{m}$	$<20$	$<20$	$<20$	ABNT NBR 15894-3
Índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias em relação ao controle	$\geq 90\%$	$\geq 90\%$	$\geq 90\%$	NBR 5752 (ABNT, 2014)
Atividade pozolanica com cal aos sete dias	$\geq 6\text{MPA}$	$\geq 6\text{MPA}$	$\geq 6\text{MPA}$	ABNT NBR 5751

FONTE: NBR 12653 (ABNT, 2015)

### 3.3. ANÁLISE DOS RESULTADOS

#### 3.3.1. Agregado Miúdo

Por meio da composição granulométrica que pode ser observada na figura 11 foi permitido averiguar a distribuição dos grãos que constitui o agregado, é expressa em termos de porcentagens individuais ou acumuladas retidas em cada uma das peneiras da chamada série normal definida pela NBR 7211 (ABNT, 2022). Como pode ser visto com mais detalhes na Tabela 10.

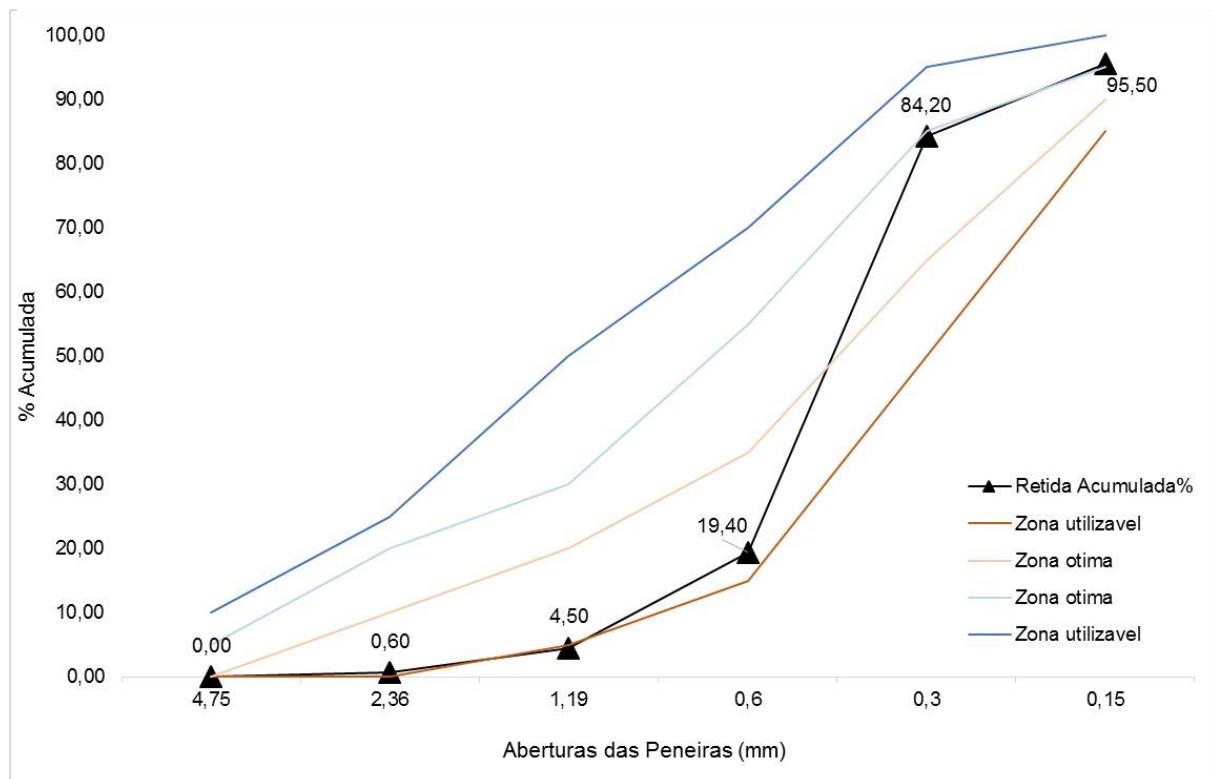
Tabela 10 Características do Agregado Miúdo (Areia) obtido em Laboratório

Peneira	Massa Retida (g)	Retida na Peneira%	Retida Acumulada%	Método de Ensaio
4,75	0	0,00	0,00	ABNT NBR 17054:2022
2,36	6	0,60	0,60	
1,19	39	3,90	4,50	
0,6	149	14,90	19,40	
0,3	648	64,80	84,20	
0,15	113	11,30	95,50	
Fundo	45	4,50	100,00	
Total	1000	100	100,00	
Massa Específica		2,61 g/cm <sup>3</sup>		ABNT NBR 16916:2021
Massa Unitária		1,69 g/cm <sup>3</sup>		ABNT NBR 16972:2021
Módulo de Finura		2,04		ABNT NBR 17054:2022
Dimensão Máxima		1,18mm		

FONTE: AUTORA, 2023

Utilizou-se como parâmetro para avaliar a composição granulométrica do agregado miúdo, atendendo aos critérios passando entre a zona ótima e zona utilizável visto no gráfico da figura 10, e determinado como material fino (grãos com diâmetros entre 0,07 e 0,42 mm), segundo a NBR 17054 (ABNT, 2022).

Figura 10 Curva Granulométrica do Retido Acumulado% do Agregado Miúdo com os limites da distribuição segundo a ABNT NBR 7211: 2022



FONTE: AUTORA, 2023

Figura 11 Distribuições dos grãos (Areia)



FONTE: AUTORA, 2023

### **3.3.2. Massa específica do resíduo da Bauxita**

A Tabela 11 manifestam resultados de massa específica do resíduo da bauxita *in-natura* e calcinado. Atenta que a massa específica dos resíduos calcinados são de valores mais elevados ao resíduo *in natura*. Cuja as massas específicas calculadas foram de 2,86 g/cm<sup>3</sup> para *in natura*, 3,095 g/cm<sup>3</sup> a 800°C, 3,118 g/cm<sup>3</sup> a 900°C e 3,153 g/cm<sup>3</sup> a 1000°C, sendo aproximada a massa específica de da Silva et al (2018).

Tabela 11 Massa específica do resíduo da bauxita *in-natura* e calcinado

<b>Amostras</b>	<b>Massa específica g/cm<sup>3</sup></b>
<i>In-Natura</i>	2,86
800°C	3,095
900°C	3,118
1000°C	3,153

FONTE: AUTORA, 2023

### **3.3.3. Índice de Atividade Pozolânica (IAP) – Cimento**

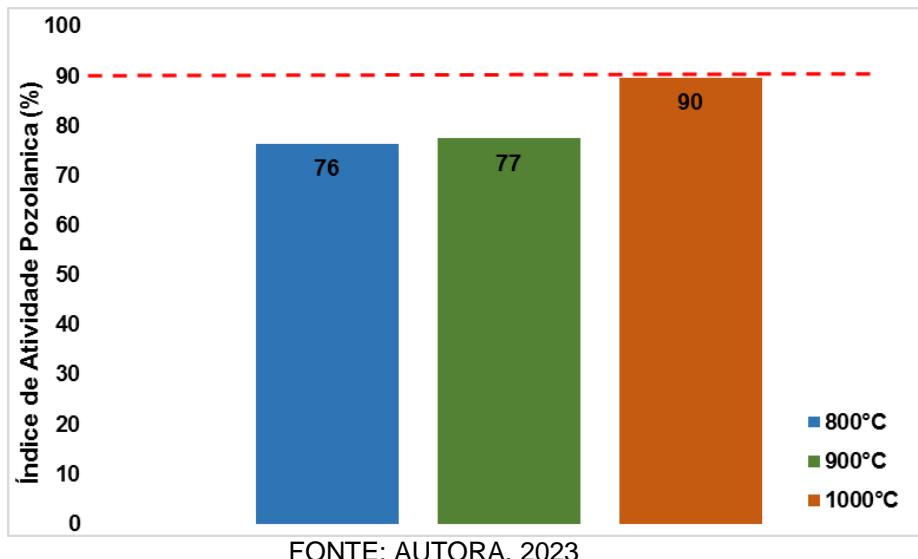
A avaliação da pozolanicidade do material analisado cuja a composição química foi deliberada por Espectroscopia de Fluorescência de Raios-X, que apresentou em todas as amostras um teor de  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \geq 70\%$ , contudo baseado nos requisitos físicos, o único que atendeu as premissas da norma que IAP  $\geq 90\%$ , foi a amostra de 1000°C, sedo assim as temperaturas de 800°C e 900°C não houve aparição do índice de atividade pozolânica mínima como observado na tabela 12 e figura 12. A indicação da dispersão dos dados dentro de uma amostra com relação à média, denominado de desvio padrão está dentro das condições firmadas pela NBR 7215 (ABNT, 2019), não podendo ser superior a 6%.

Tabela 12 Índice de atividade pozolânica do resíduo da bauxita - NBR 5752 (ABNT, 2014)

Amostras	Percentuais de SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Resistência Média aos 28 dias (MPa)	Desvio Padrão (MPa)	IAP (%)
800°C	77,17%	16,38	2,025	76
900°C	78,72%	16,6	1,16	77
1000°C	75,97%	19,23	1,15	90
Referência	-	21,43	2,45	-

FONTE: AUTORA, 2023

Figura 12 Porcentagem do índice de atividade pozolânica do Resíduo da Bauxita



FONTE: AUTORA, 2023

### 3.3.4. Espectrometria por fluorescência de raios-X (FRX)

A composição química do resíduo da bauxita *in-natura* e calcinadas em temperaturas de 800°C, 900°C e 1000°C foi deliberada por Espectroscopia de Fluorescência de Raios-X por Energia Dispersiva (EDXRF), a tabela 13, apresenta a composição química expressa em termos do percentual em óxidos equivalentes. Podendo examinar em ordem decrescente os altos teores dos principais óxidos, como o óxido de ferro, sendo este o componente mais expressivo, seguido do óxido de alumínio, óxido de silício, óxido de sódio e óxido de titânio. Pode-se observar que elevadas temperaturas de calcinação provocam aumento nas quantidades dos constituintes, Magalhães (2012), estabelece que esse aumento é devido ao

tratamento térmico, que ocasionou a perda de água estrutural e em consequência de algumas reações de estado sólido que ocorrem. No resíduo da bauxita durante o tratamento térmico realizado. Em geral, os resultados obtidos nesta pesquisa e em outros estudos como (Manfroi, Cheriaf e Rocha, 2010; Macêdo, et al., 2011; Silva Filho; Alves; Motta, 2007) são semelhantes, porém, existem pequenas diferenças encontradas devendo-se a variação na constituição da bauxita, processamento e até mesmo métodos de disposição do resíduo.

Tabela 13 Composição química do resíduo da bauxita in- natura e calcinada

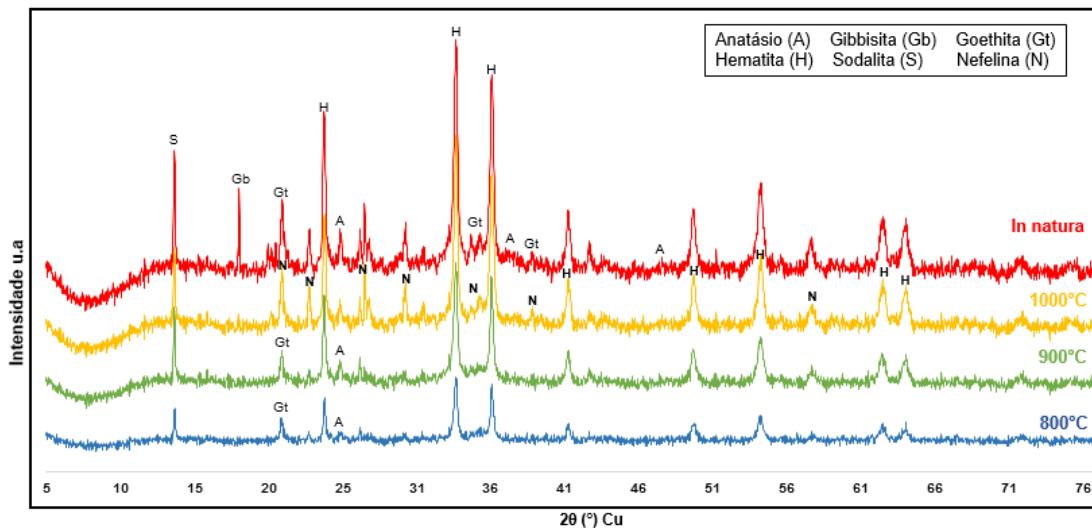
Composições	Concentração (%)			
	In Natura	800°C	900°C	1000°C
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	34,47	35,18	36,08	35,75
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	21,95	23,67	24,09	22,25
SiO <sub>2</sub>	17,82	18,32	18,55	17,97
Na <sub>2</sub> O	10,38	11,29	11,51	11,14
TiO <sub>2</sub>	6,76	7,24	7,31	7,14
CaO	1,91	1,96	2,01	1,99
MnO	0,11	0,12	0,13	0,12
K <sub>2</sub> O	0,09	0,09	0,12	0,13

FONTE: AUTORA, 2023

### 3.3.5. Difração de raios-X (DRX)

Os resultados dos ensaios de Difração de Raios X são apresentados na figura 13 para o resíduo da bauxita *in-natura* seca em temperatura 105°C e resíduo da bauxita calcinadas em temperaturas de 800°C, 900°C e 1000°C.

Figura 13 Difração de raios-x do resíduo da bauxita in-natura e calcinadas



FONTE: AUTORA, 2023

Na figura 13, é possível observar as fases detectadas no resíduo da bauxita *in-natura* sendo a (S) sodalita ( $\text{Na}_4\text{Al}_3(\text{SiO}_4)_3\text{Cl}$ ), (Gb) gibbisita ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ), (Gt) goethita ( $\text{FeO(OH)}$ ), (H) hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) e (A) anatásio ( $\text{TiO}_2$ ). O pico de (Gb) gibbisita identificado no RB *in-natura*, desaparecem em temperaturas de 800°C, 900°C e 1000°C. De acordo com as análises mineralógicas obtidas, os picos na calcinação a 800°C comparada a de 900°C, onde a amostra de RB calcinada à 900°C, possui aumento de (S) sodalita, (A) anatásio, (H) hematita e o surgimento da (N) nefelina ( $\text{NaAlSiO}_4$ ) e (Gt) goethita permaneceu inalterada. A 1000°C, a sodalita, hematita e o anatásio, não ocorreu nenhuma mudança perceptível, ou seja, permaneceram os minerais encontrados à 900°C. No entanto ocorreu o desaparecimento através da decomposição do pico (Gt) goethita, havendo somente o surgimento intensificado da (N) nefelina. Podendo ser comparado com as análises de da Silva et al (2018), no tratamento das temperaturas de 800°C e 1000°C.

### 3.4. CONCLUSÃO

A calcinação dos materiais foi essencial e tiveram como finalidade analisar a variação em sua microestrutura, a Espectroscopia de Fluorescência de Raios-X por Energia Dispersiva (EDXRF) do resíduo da bauxita *in natura* e calcinadas em temperaturas de 800°C, 900°C e 1000°C foi deliberada pela composição química expressa em termos do percentual em óxidos equivalente, ordenada decrescentemente os altos teores dos principais óxidos, como o óxido de ferro, sendo este o componente mais expressivo, seguido do óxido de alumínio, óxido de silício, óxido de sódio e óxido de titânio, tendo um aumento notavelmente em todos os óxidos comparados ao *in-natura*.

Através do DRX, foi possível observar as fases detectadas no resíduo da bauxita *in- natura* sendo a (S) sodalita ( $\text{Na}_4\text{Al}_3(\text{SiO}_4)_3\text{Cl}$ ), (Gb) gibbisita ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ), (Gt) goethita ( $\text{FeO(OH)}$ ), (H) hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) e (A) anatásio ( $\text{TiO}_2$ ). O pico de (Gb) gibbisita identificado no resíduo *in-natura*, desaparecem em temperaturas de 800°C, 900°C e 1000°C. De acordo com as análises mineralógicas obtidas, os picos na calcinação a 800°C comparada a de 900°C, onde a amostra de RB calcinada à 900°C, possui aumento de (S) sodalita, (A) anatásio, (H) hematita e o surgimento da (N) nefelina ( $\text{NaAlSiO}_4$ ) e (Gt) goethita permaneceu inalterada. A 1000°C, a sodalita, hematita e o anatásio, não ocorreu nenhuma mudança perceptível, ou seja, permaneceram os minerais encontrados à 900°C.no entanto ocorreu o desaparecimento através da decomposição do pico (Gt) goethita, havendo somente o surgimento intensificado da (N) nefelina. Podendo ser comparado com as análises de da Silva et al (2018), no tratamento das temperaturas de 800°C e 1000°C.

As análises por Fluorescência de raios-X (FRX) e Difração de raios-X (DRX) demonstraram uma propensão para que o resíduo de bauxita se comporte como material pozolânico, o resíduo calcinado demonstrou que a mesma possui em sua composição química sílica e alumina, compostos estes que certifica a propriedade pozolânica. Através dos resultados adquiridos, pode-se dizer que os resíduos calcinados em temperaturas de 800°C, 900°C e 1000°C, executados através da metodologia da NBR 5752 (ABNT, 2014), e obedecendo os requisitos da NBR12653 (ABNT, 2015), classificando as calcinadas a 800°C e 900°C como material não pozolânico, sendo que o único que apresentou um teor de índice de atividade pozolânica igual a 90% ao desempenho do cimento Portland aos 28 dias foi 1000°C.

O ensaio de massa específica do resíduo gerado do processo Bayer foi realizado segundo a NBR 16605 (ABNT, 2017), onde os grãos são da mesma ordem de grandeza do cimento que é definida como a massa do material por unidade de volume, incluindo os poros internos das partículas cuja as massas específicas calculadas foram de 2,86 g/cm<sup>3</sup> para in natura, 3,095 g/cm<sup>3</sup> a 800°C, 3,118 g/cm<sup>3</sup> a 900°C e 3,153 g/cm<sup>3</sup> a 1000°C, sendo aproximado a massa específica de da Silva et al (2018).

O agregado miúdo (areia), por meio da composição granulométrica foi permitido averiguar a distribuição dos grãos que constitui o agregado determinado como material fino (grãos com diâmetros entre 0,07 e 0,42 mm), segundo a NBR 17054 (ABNT, 2022) a série normal definida pela NBR 7211 (ABNT, 2022). Foi utilizada como parâmetro para avaliar a composição granulométrica do agregado miúdo, atendendo aos critérios passando entre a zona ótima e zona utilizável.

O cimento utilizado foi o cimento Portland CP II-F 32 (Cimento Portland composto com material carbonático Classe 32), de acordo com a NBR 16697 (ABNT, 2018), com massa específica de 2,96 g/cm<sup>3</sup>, o aditivo usado foi o retardador de pega normal e redutor de agua, tipo 2/retardador RA2-R, e água de abastecimento público.

### 3.5. REFERÊNCIAS

- ABAL. **Alumínio.** São Paulo, (2023). Disponível em: <<https://abal.org.br/aluminio/cadeia-primaria/>>. Acesso em: 23 jul. 2023.
- ANTUNES, M.L.P; CONCEIÇÃO, F.T; TOLEDO, S.P; KIYOHARA, P.K. **Bauxita e seu resíduo, caracterização e estudo por microscopia eletrônica.** IX Brazilian Symposium on Glass and Related Materials, Curitiba, PR, junho 2012.
- AQUINO, T. F. **Beneficiamento químico da bauxita de Santa Catarina**, Diss. Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, SC, 2007. 125.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5751: **Materiais pozolânicos - Determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias**. Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5752: **Materiais pozolânicos — Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias**. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211: **Agregados para concreto - Requisitos**. Rio de Janeiro, 2022.

**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 11768-1: **Aditivos químicos para concreto de cimento Portland Parte 1: Requisitos.** Rio de Janeiro, 2019.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** NBR 11768-2: **Aditivos químicos para concreto de cimento Portland Parte 2: Ensaios de desempenho.** Rio de Janeiro, 2019.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** NBR 11768-3: **Aditivos químicos para concreto de cimento Portland Parte 3: Ensaios de caracterização.** Rio de Janeiro, 2019.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** NBR 12653: **Materiais pozolânicos — Requisitos.** Rio de Janeiro, 2015

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

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** NBR 15900-1: **Água para amassamento do concreto Parte 1: Requisitos.** Rio de Janeiro, 2009.

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

**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 16972: **Agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios.** Rio de Janeiro, 2021.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** NBR 17052: **Materiais pozolânicos - Determinação do teor de álcalis disponíveis.** Rio de Janeiro, 2022.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** NBR 17054: **Agregados - Determinação da composição granulométrica - Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2022.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** NBR 17086-5: **Cimento Portland — Análise química Parte 5: Determinação do trióxido de enxofre.** Rio de Janeiro, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 17086-6: **Cimento Portland — Análise química Parte 6: Determinação da perda ao fogo**. Rio de Janeiro, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 17086-9: **Cimento Portland — Análise química Parte 9: Análise química para cimento Portland com adições de materiais pozolânicos**. Rio de Janeiro, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 25: **Materiais pozolânicos - Determinação do teor de álcalis disponíveis**. Rio de Janeiro, 2003.

DANNER, T; JUSTNES, H. **Bauxite Residue as Supplementary Cementitious Material – Efforts to Reduce the Amount of Soluble Sodium**. Nordic Concrete Research. 2020. 2545-2819.

DA SILVA, T. C. G.; PIMENTEL, M. G., MACÊDO, A. N., PICANÇO, M. S., MARTINS, W. S., JUNIOR, A. O., SILVA, A. L. M. F., BRITO, W. S. **Avaliação dos efeitos da temperatura na lama vermelha da região amazônica**. Congresso Brasileiro de engenharia e ciência dos materiais, Nova Iguaçu, PR, 2018.

HARDJITO, D; WIBOWO, A. G. M; CHRISTIANTO, D. **Pozzolanic activity assessment of Iusi (lumpur sidoarjo) mud in semi high volume pozzolanic mortar**. Materials (Basel). Switzerland. 2012. 1654–1660.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). **Gestão e Manejo de Rejeitos da Mineração**, Brasília, 2016. Acesso em: < <https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2021/02/Gestao-e-Manejo-de-Rejeitos-da-Mineracao-2016.pdf>>. Acesso em: 16 jun. 2023.

LAZOU, A. et al. **The Utilization of Bauxite Residue with a Calcite-Rich Bauxite Ore in the Pedersen Process for Iron and Alumina Extraction**. Metallurgical and Materials Transactions B, [s. l.], v. 52, 2021, p. 1255-1266. Acesso em: 23 jun. 2021.

MACÊDO, A. N. et al. **Comportamento de blocos cerâmicos estruturais produzidos a partir da mistura de lama vermelha e argila**. Revista Ambiente Construído, Porto Alegre, v. XI, n. 4, p. 25-36, outubro/dezembro 2011. ISSN 1678-8621.

MAGALHÃES, E. M. **Estudo da extração de compostos de ferro da lama vermelha visando a concentração e/ou extração de compostos de titânio**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Pará- UFPa, Belém/PA, 2012.

MANFROI, E. P. CHERIAF, M. ROCHA, J. C. **Avaliação da lama vermelha como material pozolânico em substituição ao cimento para produção de argamassas**. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

NORSK HYDRO. **Annual report** – 2020. Oslo, Noruega: Norsk Hydro ASA, 2021. Disponível em: <https://www.hydro.com/globalassets/download-center/investor-downloads/ar20/annual-report-2020-new.pdf>. Acesso em: 25 set. 2022.

PEREIRA, C. **Tipos de cimento:** Características e especificações. Escola engenharia, 14 de jan. de 2019. Disponível em: <<https://www.escolaengenharia.com.br/tipos-de-cimento/>>. Acesso em: 28 de jun. de 2023.

REDDY, P. S. et al. **Properties and Assessment of Applications of Red Mud (Bauxite Residue): Current Status and Research Needs.** Waste and Biomass Valorization, [s. l.], v. 12, p. 1185-1217, 2021.

SIKA, Brasil. **Sika Concreto Forte.** Ficha técnica de produto, São Paulo, 2020. Disponível em:< [https://bra.sika.com/content/dam/dms/br01/o/sika\\_concreto\\_forte.pdf](https://bra.sika.com/content/dam/dms/br01/o/sika_concreto_forte.pdf) >. Acesso em: 28 de jun.de 2023.

SILVA, Djalma Ribeiro da. **Estudo de inibidores de corrosão em concreto armado, visando a melhoria na sua durabilidade.** 2006. 195 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2006.

SILVA FILHO, E. B.; ALVES, M. C. M.; MOTTA, M. D. **Lama vermelha da indústria de beneficiamento de alumina: produção, características, disposição e aplicações alternativas.** Revista Matéria, v. XII, n. 2, p. 322-338, 2007. ISSN 1517-7076.

World Aluminium Organization (WAO), **Available from the International Aluminium Institute,** London, 2020. Disponível em: < <https://international-aluminium.org/resource/technology-roadmap-maximizing-the-use-of-bauxite-residue-in-cement/>>. Acesso em: 2 maio. 2023.

ZENG, H. et al. **Progress on the Industrial Applications of Red Mud with a Focus on China. Minerals,** [s. l.], v. 10, n. 9, p. 773, 2020. Acesso em: 6 set. 2022.

## **4- ARTIGO 2 – ANÁLISE DAS PROPRIEDADES DO RESÍDUO DA BAUXITA CALCINADO, COMO MATERIAL EM SUBSTITUIÇÃO DO CIMENTO NA PRODUÇÃO DAS ARGAMASSAS DE ASSENTAMENTO.**

### **RESUMO**

A argamassa é primordial na indústria da construção civil e classificada segundo suas finalidades, devido a isso incorporar novas propriedades e importante para potencializar o envolvimento com o produto. Os ensaios com a argamassa foram executados na Universidade Federal do Pará na tentativa de destinar e reduzir impactos ambientais gerados pelos reservatórios de resíduos do processo Bayer. Este trabalho tem como objetivo uma investigação experimental utilizando o resíduo da bauxita calcinada em temperaturas de 800°C, 900°C e 1000°C, em substituição como filler aproveitando o tamanho de partículas de 75 µm, com percentuais de 10%, 15% e 20% na massa do cimento, em prol de averiguar o desempenho através dos ensaios mecânicos das argamassas de assentamento de alvenaria estrutural no estado endurecido. Os resultados exibiram que os ensaios de massa específica no estado fresco e no estado endurecido a temperatura de 1000°C apresentaram menores valores em massa, a avaliação do tempo de pega das pastas indicou uma aceleração das reações com os compostos de hidratação do cimento, as resistências mecânicas indicaram que a substituição a 1000°C altera as características do cimento e aumentando o seu desempenho mecânico, sendo superior a pasta cimentícia de referência.

**Palavras-chave:** Argamassa. Resíduo da Bauxita. Filler.

### **ABSTRACT**

Mortar is essential in the construction industry and is classified according to its purposes, which is why it incorporates new properties and is important for enhancing involvement with the product. Tests with the mortar were carried out at the Federal University of Pará in an attempt to allocate and reduce environmental impacts generated by waste reservoirs from the Bayer process. This work aims to carry out an experimental investigation using bauxite residue calcined at temperatures of 800°C, 900°C and 1000°C, replacing it as a filler, taking advantage of particle sizes of 75 µm, with percentages of 10%, 15%. and 20% in the mass of the cement, in order to verify the performance through mechanical tests of mortars for laying structural masonry in the hardened state. The results showed that the Especific mass tests in the fresh state and in the hardened state at a temperature of 1000°C presented lower values in mass, the evaluation of the setting time of the pastes indicated an acceleration of the reactions with the cement hydration compounds, the resistances Mechanical tests indicated that replacement at 1000°C changes the characteristics of the cement and increases its mechanical performance, being superior to the reference cement paste.

**Keyword:** Mortar. Bauxite Residue. Filler.

#### 4.1. INTRODUÇÃO

A argamassa é um produto de grande aplicabilidade na construção civil, onde empresas no ramo da engenharia civil procuram aperfeiçoar e inovar seus materiais e métodos em prol de prover uma elevação na qualidade e reduzir o custo, segundo ZUCCHETI et al., (2017), a motivação se deu principalmente pela busca da redução de custos.

A escolha criteriosa dos materiais para aplicação de uma argamassa de qualidade converge em bons resultados no decorrer da execução e o término da construção, provendo em uma redução de gastos e desperdícios de duração com mão de obra. Porém, há fatores necessitam de atenção como o controle no preparo dos materiais e a execução da pasta até aplicação do produto, onde todo processo deve ser regido conforme as normas da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). Recena (2011) aconselha que não é prudente responsabilizar o material empregado pela qualidade final de uma argamassa assim como não é possível responsabilizar exclusivamente o cimento Portland pela qualidade final de um concreto, sempre haverá um proporcionamento mais adequado a cada tipo de material. Recena (2011) complementa que problemas podem ocorrer fundamentalmente pela aplicação de processos incorretos de dosagem e por ser exigida, dos materiais, resposta acima de sua competência técnica.

Entre variados trabalhos existente sobre resíduo da bauxita em argamassa nos últimos anos pode-se citar a avaliação de lama vermelha como material pozolanico em substituição ao cimento para produção de argamassa realizado por (Manfroi, Cherif e Rocha, 2010), avaliação da atividade pozolana de Lusi( Lama Sidoarjo) lama em argamassa pozolana de semi alto volume (Hadjito, Wibowo e Cristiano, 2012) e resíduo de bauxita como material cimentício suplementar- esforços para reduzir a quantidade de sódio solúvel (Danner e Justnes, 2020). As pesquisas voltadas para o resíduo da bauxita apresentam uma viabilidade para trabalhar como substituição no cimento.

O trabalho tem como finalidade uma investigação experimental utilizando o resíduo da bauxita em temperaturas de 800°C, 900°C e 1000°C, em substituição como filler aproveitando o tamanho de partículas de 75 µm, com percentuais de 10%,15% e 20% na massa do cimento, em prol de averiguar o desempenho através dos ensaios

mecânicos das argamassas de assentamento de alvenaria estrutural no estado endurecido.

## 4.2. METODOLOGIA.

### 4.2.1. Materiais

Para confecção das argamassas foram utilizados os seguintes materiais:

#### **Resíduo da Bauxita, Areia, Cimento, Aditivo e Água.**

O resíduo, foi obtido por meio do processo de beneficiamento da bauxita do processo bayer, viabilizada por uma indústria produtora de alumínio, localizada no município de Barcarena/PA. Esse material após a coleta passou pelo beneficiamento, ao qual os materiais foram calcinados isoladamente no forno mufla em temperaturas de 800°C, 900°C e 1000°C, após isso foram moídos com moinho de bolas de eixo horizontal, com jarro de porcelana, com diâmetro de 25 cm, movido por um motor de 40 rpm, compostas por esferas cerâmicas, para obtenção dos materiais com granulometria abaixo da peneira 0,075mm adequada para uso, foi utilizado o tempo de 60 min.

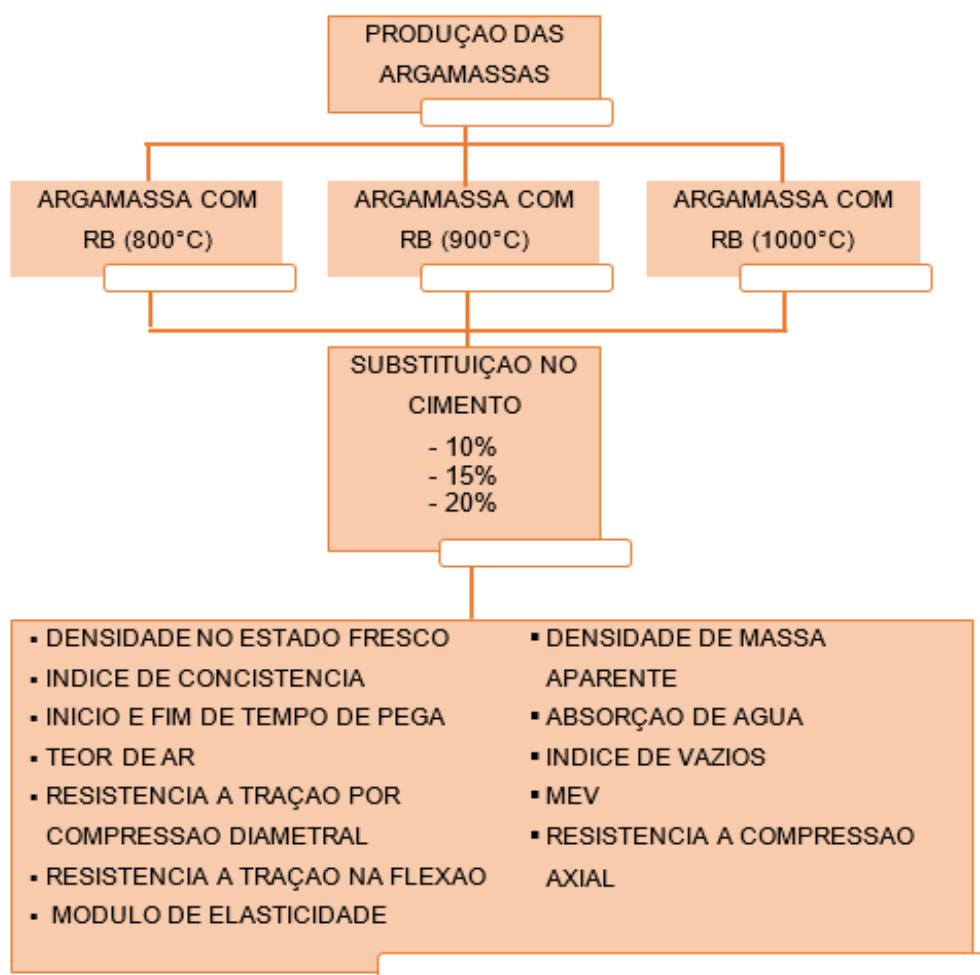
O agregado miúdo foi a areia, extraída da jazida Oriental próxima à Castanhal Km 21. Onde o agregado em questão possui módulo de finura igual a 2,04 já a dimensão máxima característica foi de 1,18 mm, se manteve entre a zona ótima e a zona utilizável, de acordo com os parâmetros exigidos na tabela 2 da NBR 7211 (ABNT, 2022), indicando que é um agregado miúdo adequado na utilização da produção de argamassas.

Juntamente foi utilizado o Cimento Portland CP II-F-32 (Cimento Portland composto com material Carbonático Classe 32), de acordo com a NBR 16697 (ABNT, 2018) e o aditivo líquido retardador de pega normal e redutor de água, usado como plastificante para concreto. Onde se encaixa como redutor de água tipo 2/retardador RA2-R mostrado no tópico 3.29 da NBR 11768-1 (ABNT, 2019).

#### 4.2.2. Métodos

As produções das argamassas foram realizadas no Laboratório de Materiais de construção civil da Universidade Federal do Pará (Campus Belém – Guamá), utilizando uma betoneira de eixo inclinado. Após a produção, foi executado imediatamente, os ensaios de consistência e moldagem dos CP's para a posterior realização dos ensaios no estado endurecido como pode se ver no fluxograma da figura 14.

Figura 14 Fluxograma da etapa de produção das argamassas.



FONTE: AUTOR, 2023

Foram elaboradas argamassas com percentuais de substituição na massa de cimento fabricados a partir do resíduo da bauxita (RB) com temperaturas 800°C, 900°C e 1000°C (10%, 15% e 20%) e referência. A tabela 14 mostra o grupo de argamassas produzidas com suas respectivas siglas.

Tabela 14 Grupos de Argamassas Produzidas

Grupos de argamassa	Siglas
Argamassa de referência com 100% de cimento	ARC
Argamassa produzida com 10% de adição de RB calcinada 800°C e 90% de cimento	ARB10C800
Argamassa produzida com 15% de adição de RB calcinada 800°C e 85% de cimento	ARB15C800
Argamassa produzida com 20% de adição de RB calcinada 800°C e 80% de cimento	ARB20C800
Argamassa produzida com 10% de adição de RB calcinada 900°C e 90% de cimento	ARB10C900
Argamassa produzida com 15% de adição de RB calcinada 900°C e 85% de cimento	ARB15C900
Argamassa produzida com 20% de adição de RB calcinada 900°C e 80% de cimento	ARB20C900
Argamassa produzida com 10% de adição de RB calcinada 1000°C e 90% de cimento	ARB10C1000
Argamassa produzida com 15% de adição de RB calcinada 1000°C e 85% de cimento	ARB15C1000
Argamassa produzida com 20% de adição de RB calcinada 1000°C e 80% de cimento	ARB20C1000

FONTE: AUTORA, 2023

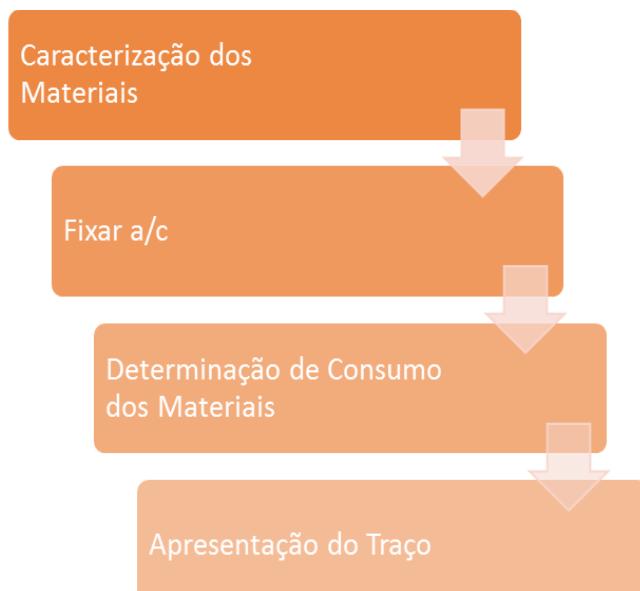
- **Dosagem da argamassa**

Nesta pesquisa utilizou-se o método ABCP de dosagem adaptado, somente para determinar a relação agua/cimento utilizando a curva de Abrans, o qual é baseado no texto da Norma ACI 211.1-91 (2002), trata-se de uma adequação prática do método americano às conjunturas brasileiras, este método utiliza tabelas e gráficos feitos a partir dos valores médios dos resultados experimentais, sendo, portanto, uma ferramenta convencional de dosagem de concreto, adequada para materiais mais comumente usados em várias regiões do Brasil como pode ser visto na figura 15.

Após definidas as características (massa específica, massa unitária, módulo de finura) dos materiais utilizados na produção das argamassas, seguirá a execução

das próximas etapas, visando a obtenção dos traços. As etapas descritas a seguir na figura 15 foram realizadas para os três grupos de argamassa (ARC e ARBC).

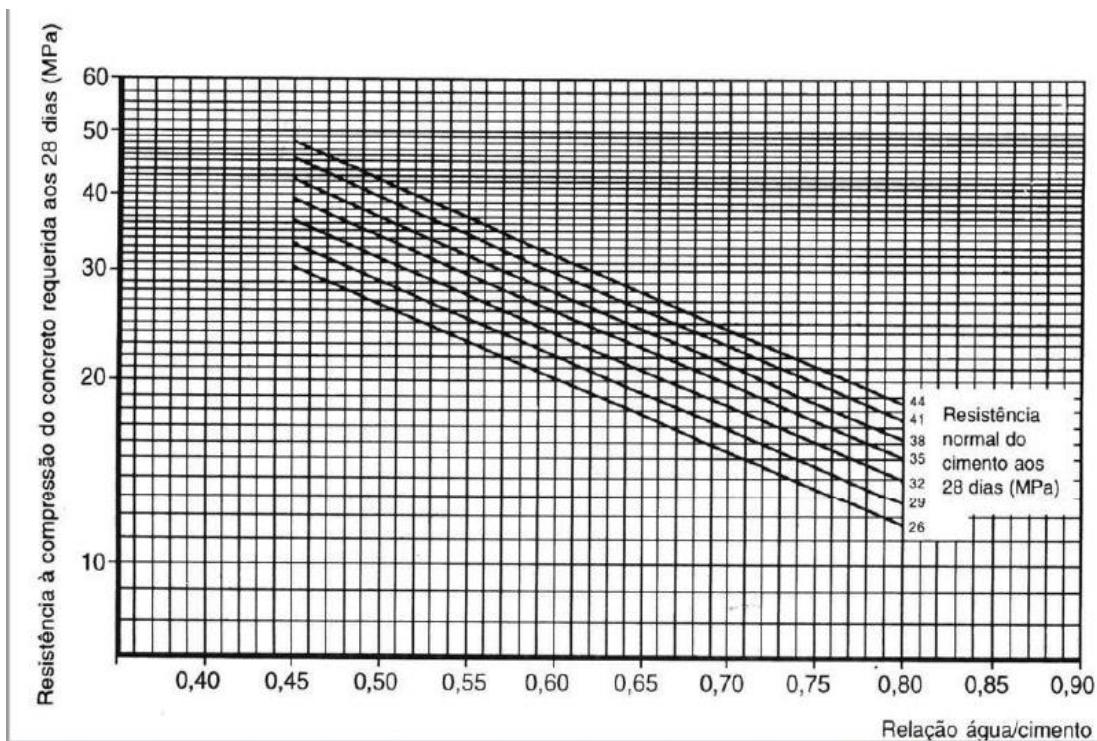
Figura 15 Fluxograma das etapas de execução do método ABCP baseado da ACI 211.1-91 (2002)



FONTE: AUTORA, 2023

Com  $F_{ck}=25$  MPa determinado, a primeira etapa consistiu na determinação da relação água/cimento 0,53, que foi realizada por meio do uso da curva de Abrams do cimento, utilizando os valores existentes de resistência do cimento visto na figura 16.

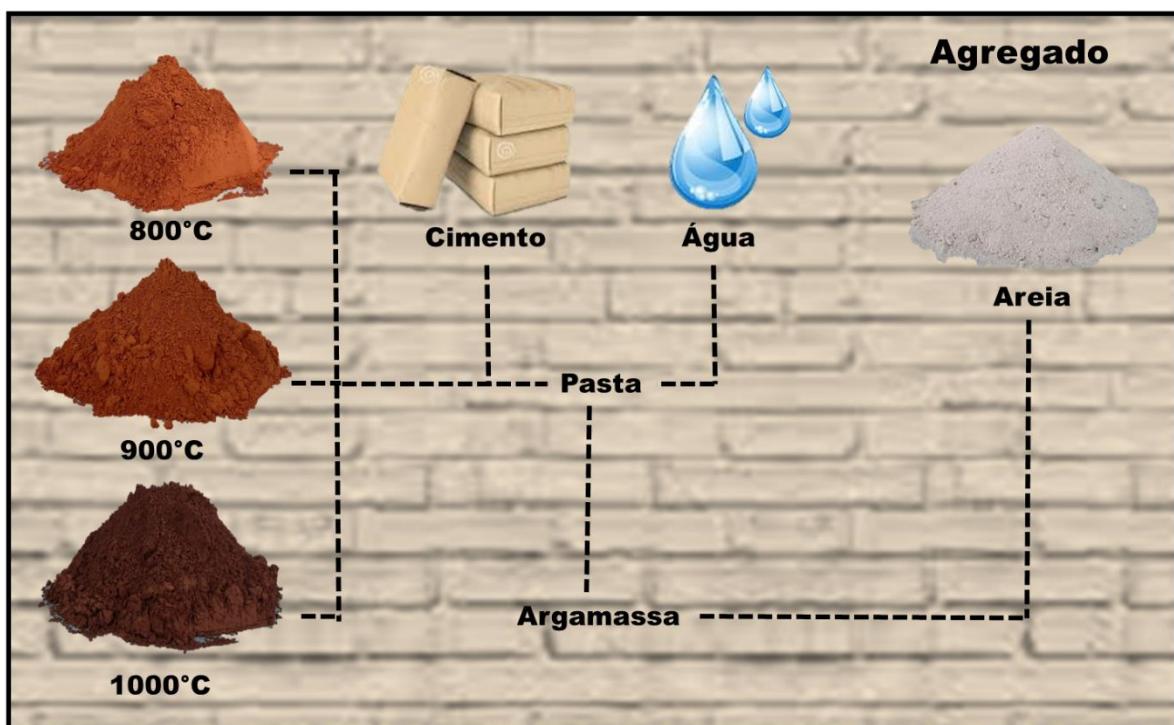
Figura 16 Curva de Abrans do cimento (ABCP)



FONTE: ABCP adaptado ACI – 213R-87,1997

Após as etapas de cálculos, foi determinado o consumo de materiais (cimento cuja massa específica de 2,96 g/cm<sup>3</sup>, resíduo da bauxita com massa específica de 3,095 g/cm<sup>3</sup> a 800°C, 3,118 g/cm<sup>3</sup> a 900°C e 3,153 g/cm<sup>3</sup> a 1000°C e areia com densidade de 2,61 g/cm<sup>3</sup> e massa unitária de 1,69 g/cm<sup>3</sup>, agua e aditivo). Além de usar o traço base de 1:3. O aditivo foi executado como manda o fabricante na ordem de 1% da massa de material cimentício, provendo manter a consistência normal da argamassa. A mistura dos materiais seguiu o fluxograma da figura 17.

Figura 17 Fluxograma da mistura dos materiais da argamassa



FONTE: AUTORA, 2023

- **Processo de análise das argamassas**

Neste item como mostra na tabela 15, está sendo apresentado um resumo dos principais métodos das NBRs, aplicáveis principalmente a argamassas.

**Tabela 15 Procedimentos experimentais para a caracterização das propriedades das argamassas produzidas**

ITEM	Normas
<b>Índice de Consistência</b>	NBR 13276: ABNT, 2016. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência.
<b>Tempo de pega</b>	NBR 16607: ABNT, 2018. Cimento Portland — Determinação dos tempos de pega
<b>Densidade e Teor de Ar no estado fresco</b>	NBR 13278: ABNT, 2005. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado.
<b>Resistência à tração diametral</b>	NBR 7222: ABNT, 2011. Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos
<b>Resistência à tração na flexão e à compressão axial</b>	NBR 13279: ABNT, 2005. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão.
<b>Módulos de elasticidade</b>	NBR 8522-1: ABNT, 2021. Concreto endurecido - Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação Parte 1: Módulos estáticos à compressão
<b>Densidade de massa aparente no estado endurecido</b>	NBR 13280: ABNT, 2005. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido
<b>Absorção de água, índice de vazios</b>	NBR 9778: ABNT, 2005. Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica

FONTE: AUTORA, 2023

A argamassa é composta por aglomerante (cimento), agregado (areia), água com possibilidade de adicionar adições e aditivos, como pode ser visto na tabela 16 expõe o início e final de pega além de porcentagem de água de consistência normal do cimento a ser utilizado, no caso CP II-F 32.

Tabela 16 Cimento Portland

Amostras		CP II-F 32
Área específica ( $m^2 \cdot kg^{-1}$ )		361
Água consistência normal (%)		26,5
Tempo de pega (min)	Inicio	170
	Fim	241

FONTE: adaptado da ABCP, 2016

- **Desenvolvimento do método de dosagem**

Fez-se a mistura conforme a tabela 17, em uma argamassadeira que obedeceu aos parâmetros descritos na NBR 7215 (ABNT, 2019), utilizou-se as proporções estabelecidas, para a execução dos corpos de prova, seguiram-se os seguintes passos:

Misturou a água+aditivo na cuba do misturador da argamassadeira, em velocidade baixa; homogeneizou em um recipiente o cimento e o resíduo da bauxita antes de pôr na cuba do misturador, após esse processo adicionou na cuba e misturou por 1 minuto na velocidade baixa, em seguida adicionou a areia gradualmente a mistura, com o misturador em movimento no tempo de 30 segundos, aumentou a velocidade do misturador para velocidade alta num período de 1 minuto, ao término, o misturador ficou em repouso pelo período 30 segundos, a mistura final ocorreu em velocidade alta durante 1 minuto.

Tabela 17 Fator a/c, Fck, Traço e Aditivo

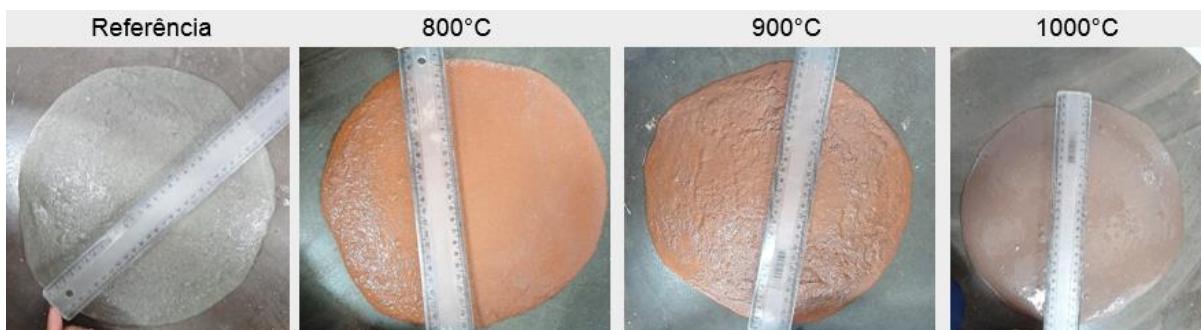
Grupos de Argamassas	FCK (MPa)	A/C	Traço	Aditivo
ARC	25	0,53	1:3:0,53	-
ARB10C800				1% em relação a massa do cimento
ARB15C800				
ARB20C800				
ARB10C900				
ARB15C900				
ARB20C900				
ARB10C1000				
ARB15C1000				
ARB20C1000				

FONTE: AUTORA, 2023

- **Índice de Consistência**

Após a preparação da argamassa foi realizado o índice de consistência, conforme a NBR 13276 (ABNT, 2016), a figura 18 apresenta a execução do ensaio de consistência. Prudêncio Jr. (2007) diz que diversos autores classificam as argamassas segundo a consistência em secas, plásticas ou fluidas. Entretanto, os limites destas consistências não são bem definidos, de uma forma qualitativa, pode-se classificar uma argamassa de consistência seca, como aquela em que é necessário aplicar uma energia significativa para poder conformá-la na sua forma final. Turra (2016), complementa, haverá prejuízo ao desempenho final do revestimento se a argamassa não possuir trabalhabilidade satisfatória, tendo-se em vista que isso influenciaria em sua correta aplicação, afetando diretamente várias propriedades do estado endurecido, como é o caso da aderência.

Figura 18 Determinações de índice de consistência das argamassas



FONTE: AUTORA, 2023

O cálculo do índice de consistência foi determinado através de três medias do diâmetro dado em (mm), a NBR 7215 (ABNT, 2019) institui que para ser considerado consistência normal o intervalo deve ter  $165 \pm 5$ mm, porem houve a necessidade da adição de aditivo por não haver trabalhabilidade na pasta, a média tanto da argamassa de referência quanto as com substituição do resíduo da bauxita no cimento ficaram entre 255mm a 260mm, estando dentro dos limites aceitáveis para índice de consistência, que é de  $255 \pm 10$ mm, segundo Nakamura e Cincotto (2004).

Depois do ensaio do índice de consistência os moldes foram preparados para receber a argamassa, passando uma camada leve de óleo mineral, para facilitar a desmoldagem dos corpos de prova, tanto cilíndricos de 5cm de diâmetro e 10 cm de altura, executados conforme descrito na NBR 7215 (ABNT, 2019), prismáticos com dimensões prova 4 x 4 x 16 (cm) seguindo as orientações da NBR 13279 (ABNT, 2005), e modulo de elasticidade com dimensão de 10cm x 20cm, foram moldados no total 90 prismas e 210 cilíndricos como verificado na tabela 18, imediatamente após a conclusão do amassamento da argamassa.

Tabela 18 Número de amostras moldados

Ensaios	Idade (Dias)	ARC	Nº DE AMOSTRAS									
			ARB10 C800	ARB15 C800	ARB20 C800	ARB10 C900	ARB15 C900	ARB20 C900	ARB10 C1000	ARB15 C1000	ARB20 C1000	
Resistência a compressão	7	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	14	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	28	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Resistência a tração por compressão diametral	28	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Resistência a tração na flexão	7	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	14	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	28	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Absorção por imersão	7	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Módulo de elasticidade	28	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Índice de atividade pozolânica	28	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Total Parcial		31	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
Total Geral												300

FONTE: AUTORA, 2023

Os CP's foram mantidos por 24 horas nos moldes protegidos contra a perda de umidade, posteriormente umidificados com agua e envolvidos com revestimento em filme plástico observado na figura 19, os corpos de prova foram colocados em recipientes e mantidos em câmara úmida durante 7, 14 e 28 dias, Cordeiro (2018) considera, corpos de prova submetidos a cura em câmara úmida com revestimento em filme plástico, chega-se a conclusões semelhantes às apresentadas para os

corpos de prova submetidos a cura submersa. Foi utilizado esse processo de cura com intuito de se promover a homogeneização de sua umidade

Figura 19 Moldes após ser submetido a uma película de água e envolvidos em filme plástico



FONTE: AUTORA, 2023

- **Densidade de massa e teor de ar incorporado no estado fresco**

A determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado das argamassas foram realizadas de acordo com a NBR 13278 (ABNT, 2005). O ensaio consistiu na utilização de um recipiente cilíndrico, rígido, de material não absorvente devidamente pesado, a argamassa foi introduzida no recipiente em três camadas sucessivas, adensadas em cada camada por 20 golpes ao longo de todo o perímetro, rasou-se a superfície com espátula, ao final, o recipiente foi pesado e registrado a junção de molde mais amostra.

- **Início e fim de pega**

A avaliação do início e final de pega foi estudada nas pastas cimentícias, fundamentadas pelas normas brasileiras NBR 16607 (ABNT, 2018), e NBR 16606 (ABNT, 2018) com o teor fixo de resíduo da bauxita de 10%, 15% e 20% (na substituição da massa do cimento) e referencia, objetivando analisar o intervalo de tempo transcorrido desde a adição de água + aditivo ao cimento até o momento em que a agulha de Vicat correspondente penetra 0,5 mm na pasta dando o fim de pega.

- **Absorção de Água e Índice de vazios por imersão em argamassas**

A avaliação da absorção de água por imersão foi realizada nas argamassas produzidas com 10%, 15% e 20% de resíduo da bauxita calcinada à 800°C, 900°C e 1000°C aos 7 dias. E uma argamassa produzida sem resíduo, denominada ARC, o ensaio foi realizado de acordo com a NBR 9778 (ABNT, 2005).

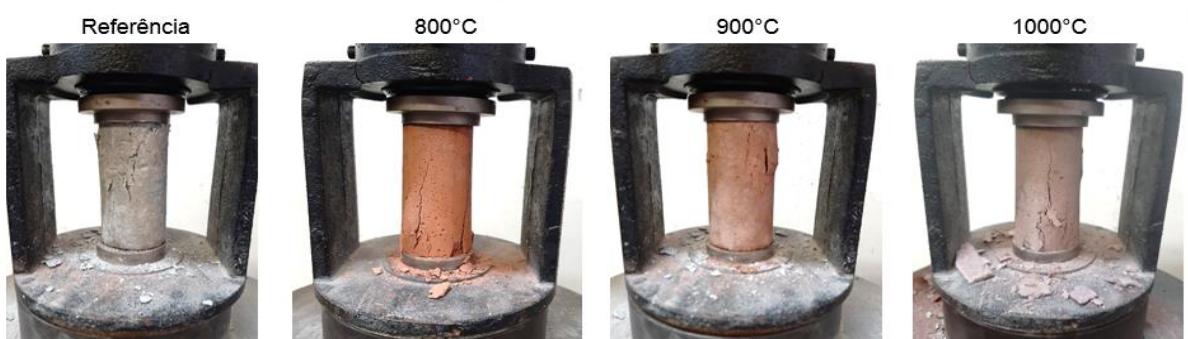
- **Densidade de massa aparente no estado endurecido**

Realizou-se o ensaio de determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido, onde, foram moldados e curados conforme NBR 13279 (ABNT, 2005) e executadas de acordo com as prescrições contidas na NBR 13280 (ABNT, 2005). O ensaio foi realizado aos 28 dias e ensaiados 3 corpos-de-prova prismáticos (4cm x 4cm x 16cm) para cada formulação de substituição da pesquisa.

- **Resistência à compressão axial**

O ensaio de resistência a compressão axial das argamassas estudadas, foram moldados segundo NBR 7215 (ABNT, 2019) e ensaiadas conforme a NBR 13279 (ABNT, 2005). O ensaio foi realizado no laboratório de materiais da Universidade Federal do Pará (Campos Belém- Guamá), onde foram rompidos 90 corpos cilíndricos. A figura 20 exibe a disposição dos corpos de prova no dispositivo de carga para o ensaio de compressão axial conforme a NBR 13279 (ABNT, 2005).

Figura 20 Disposição dos corpos de prova no dispositivo de carga para o ensaio de compressão axial segundo a NBR 13279 (ABNT, 2005)



FONTE: AUTORA, 2023

- **Resistência à tração na flexão**

As resistências mecânicas das argamassas, foram efetuadas pela NBR 13279 (ABNT, 2005), a figura 21 e figura 22 demonstra como foi feito o posicionamento dos roletes, utilizando prismas de 40 mm x 40 mm x160 mm foram posicionados na prensa de flexão (apoios distanciados por 100 mm), de modo a ficar centrado com a força ser aplicada e posicionado a face do provete rugosa (face que não esteve em contato com o molde) na vertical para não influenciar o contato com os apoios. Cada prisma foi ensaiado aplicando uma carga pontual a meio vão do corpo de prova até se atingir a ruptura, sendo 3 amostras por cada composição em 7 e 28 dias. A prensa utilizada foi modelo WAW-1000C, máquina de teste universal eletro-hidráulica controlada por computador.

Figura 21 Dispositivo de carga para ensaio de resistência a tração na flexão

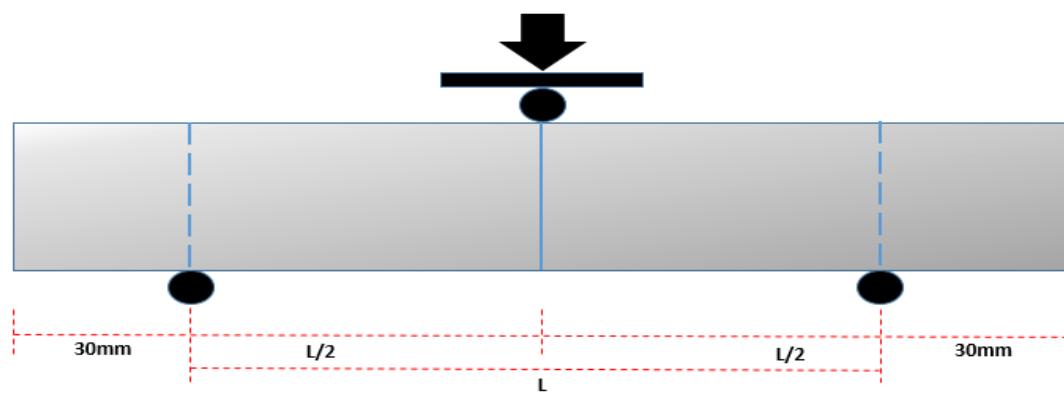


Figura 22 Ensaio de tração na flexão dos prismas de argamassa



FONTE: AUTORA, 2023

- **Compressão a tração diametral**

No ensaio de resistência à tração por compressão diametral foram moldados três corpos de prova com 50 mm por 100 mm para cada mistura e respeitou-se o tempo de cura de 28 dias segundo a ABNT NBR 5738 (ABNT, 2016), e realizado como estabelece a NBR 7222 (ABNT, 2011), neste ensaio são retirados resultados de resistência à tração de forma indireta, também conhecido como ensaio brasileiro de tração.

- **Modulo de elasticidade estático**

O ensaio foi realizado em prol de analisar que através das substituições do resíduo da bauxita no cimento pode influenciar nas propriedades elásticas da argamassa aos 28 dias, para obter os módulos de elasticidade (E), foram moldados corpos de provas cilíndricos com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura NBR 7215 (ABNT, 2019). E o ensaio de compressão axial seguiu as especificações da NBR 5739 (ABNT, 2018) com determinação do módulo de elasticidade E, segundo NBR 8522-1 (ABNT, 2021). Para cada teor de substituição (referencia, 10% 15% e 20%), e foram moldadas 3 repetições, totalizando 30 copos de prova. Para a realização deste ensaio, foi utilizada a máquina universal de ensaios (EMIC) que permite a medição das deformações e deslocamento vertical com extensômetros acoplados em faces diametralmente opostas aos corpos de prova.

O módulo de elasticidade ou módulo de Young é considerado como a relação entre a tensão e a deformação, ou seja, o parâmetro mecânico que retrata a rigidez do material, caracterizando a sua maior ou menor capacidade de deformação, fundamentado por (ASHBY e JONES, 1996; MEHTA e MONTEIRO, 2014; VIEIRA et al., 2019). Nos ensaios estáticos de compressão, a prensa registrou os dados do carregamento (tempo, força e deslocamento do braço da prensa, considerado como sendo o deslocamento “ $\delta$ ” no meio do corpo-de-prova), força máxima (de ruptura) e deslocamento máximo (na ruptura).

- **Análise Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)**

Analisou-se as amostras no laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) do Programa de Pós-Graduação em Física da Universidade Federal do Pará (LABMEV-PPFG-UFPA), com 240 dias e um aumento de imagem de 200 e 5000 vezes, através de microscopia de imagem onde um feixe de elétrons focalizado analisa a superfície, gerando uma visão morfologia direta do fragmento, juntamente com a análise da composição química elementar desempenhada pela espectroscopia por energia dispersiva (EDS).

Rosário (2013), o princípio de funcionamento do MEV consiste em realizar o varrimento da superfície de uma amostra com um feixe eletrônico finamente focado em sincronismo com um varrimento de um monitor de visualização, os autores ainda completam que modulando o brilho em cada ponto, pela intensidade de um sinal emitido pela amostra.

Por fim a análise Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foi realizada para todos os protótipos produzidos um total geral de 10 amostras que foram moldadas.

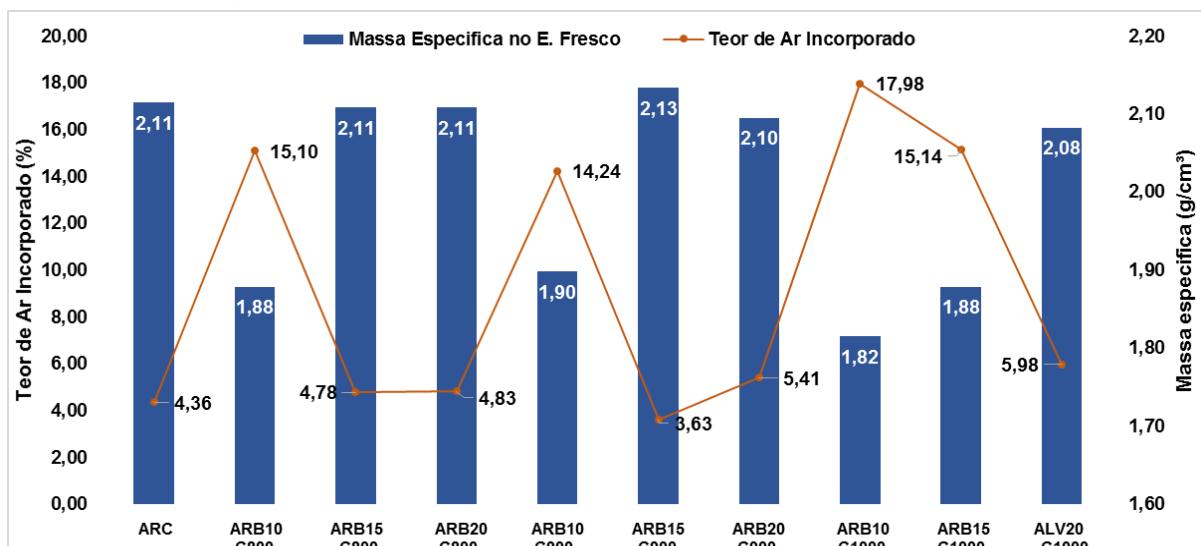
#### 4.3- ANÁLISE DE RESULTADOS

No capítulo em questão foram dissertados os resultados alcançados com as análises das argamassas moldadas com traço 1:3:0,53 relação a/agl igual a 1% de aditivo. O tópico foi dividido em três fases: propriedades no estado fresco como Índice de consistência, densidade de massa e teor de ar incorporado no estado fresco e Início e fim de pega, as propriedades no estado endurecido foi utilizada a prensa hidráulica da EMIC disponível no laboratório de engenharia civil da Universidade Federal do Pará – UFPA (Campus Belém - Guamá) segundo a normas NBR 13279 (ABNT, 2005) e NBR 7222 (ABNT, 2011), entre tantas destaca-se as propriedades mecânicas, como a resistência à compressão axial, resistência a tração por compressão diametral, resistência à tração na flexão, Absorção de Água e Índice de vazios por imersão em argamassas, Densidade de massa aparente no estado endurecido, carbonatação natural, módulo de elasticidade e análise microestrutural., visto que estas propriedades são de suma importância para esse trabalho.

#### 4.3.1. Massa específica e teor de ar incorporado no estado fresco

A massa específica varia com os materiais constituintes da argamassa e com o teor de ar incorporado, que é a porção de ar contida na argamassa. Quanto menor a massa específica, mais leve será a argamassa, consequentemente, será mais trabalhável a longo prazo (CARASEK, 2010). Analisando a figura 23 através dos dados obtidos, as argamassas ARC, ARB15C800, ARB20C800, ARB15C900, ARB20C900 e ARB20C1000, foram os que expuseram maior densidade e menor teor de ar incorporado.

Figura 23 Massa Específica no estado fresco e Teor de ar



FONTE: AUTORA, 2023

Os maiores valores de teor de ar incorporado foram alcançados nos traços ARB10C800, ARB10C900, ARB10C1000 e ARB15C1000, que, conforme o esperado, apresentaram os menores valores de massa específica, inferindo-se que a presença de bolhas de ar na estrutura, por serem mais leves, tornam a estrutura da argamassa menos densa, além de que o ar incorporado corresponde aos vazios formados pela entrada de ar observados no interior da argamassa, de forma geral o teor de ar incorporado com 10% é maior quando comparadas com argamassas com maior substituição de resíduo da bauxita.

Segundo Medeiros (2016), a propriedade da massa específica das argamassas, também denominada de massa específica, varia com o teor de ar, quanto mais leve for a argamassa, mais trabalhável será a longo prazo, resultando em

um aumento de produtividade. Medeiros (2016) complementa, que a massa específica da argamassa endurecida é um pouco menor do que o valor no estado fresco, devido à saída de parte da água, argamassa endurecida reduzem de 7% a 9% em relação ao valor inicial no estado fresco. Diante dos resultados expostos as argamassas foram assim classificadas no estado fresco conforme a NBR 13281-1 (ABNT, 2023), avaliada na tabela 19 as argamassas ARB10C800, ARB10C900, ARB10C1000 e ARB15C1000, e as argamassas ARC, ARB15C800, ARB20C800, ARB15C900, ARB20C900, ARB20C1000. São de classe DF3 e DF4 respectivamente, e teor de ar incorporado como argamassa de assentamento de alvenaria estrutural, AAE, estando abaixo ao estabelecido pela norma.

Tabela 19 Parâmetros de Massa específica e teor de ar no estado fresco

Classe	Massa Especifica no estado fresco (DF) Kg/m <sup>3</sup>	Teor de Ar Incorporado (%)		Método de ensaio
		AAV	AAE	
DF0	DF<1400	$\leq 22$	$\leq 18$	NBR 13278 (ABNT,2005)
DF1	$1400 \leq DF < 1600$			
DF2	$1600 \leq DF < 1800$			
DF3	$1800 \leq DF < 2000$			
DF4	$DF \geq 2000$			

FONTE: NBR 13281-1 (ABNT, 2023)

#### 4.3.2. Início e fim de pega

Os resultados observados demonstram que o processo de hidratação da argamassa de referência (ARC) deu início aos 2:33hr e finalizando aos 4:23hr, estando dentro dos parâmetros da NBR 16697 (ABNT, 2018) e o consumo de agua manteve inalterada, a tabela 20, está exposto as leituras das porcentagens da temperatura a 800°C, onde 10% de substituição iniciou-se a 0:50hr e finalizou a 5:06hr, 15% em 1:00hr findando as 3:31hr e 20% nos 0:10hr e encerrando nas 3:50hr.

Tabela 20 Início e Fim de Pega das argamassas

Argamassas		

	<b>Tempo de Início de Pega (h:min)</b>	<b>Tempo de Fim de Pega (h:min)</b>
ARC	2:33	4:23
ARB10C800	0:50	5:06
ARB15C800	1:00	3:31
ARB20C800	0:10	3:50
ARB10C900	2:16	3:15
ARB15C900	1:10	2:33
ARB20C900	0:40	4:50
ARB10C1000	1:00	5:15
ARB15C1000	0:40	3:58
ARB20C1000	0:40	4:41

FONTE: AUTORA, 2023

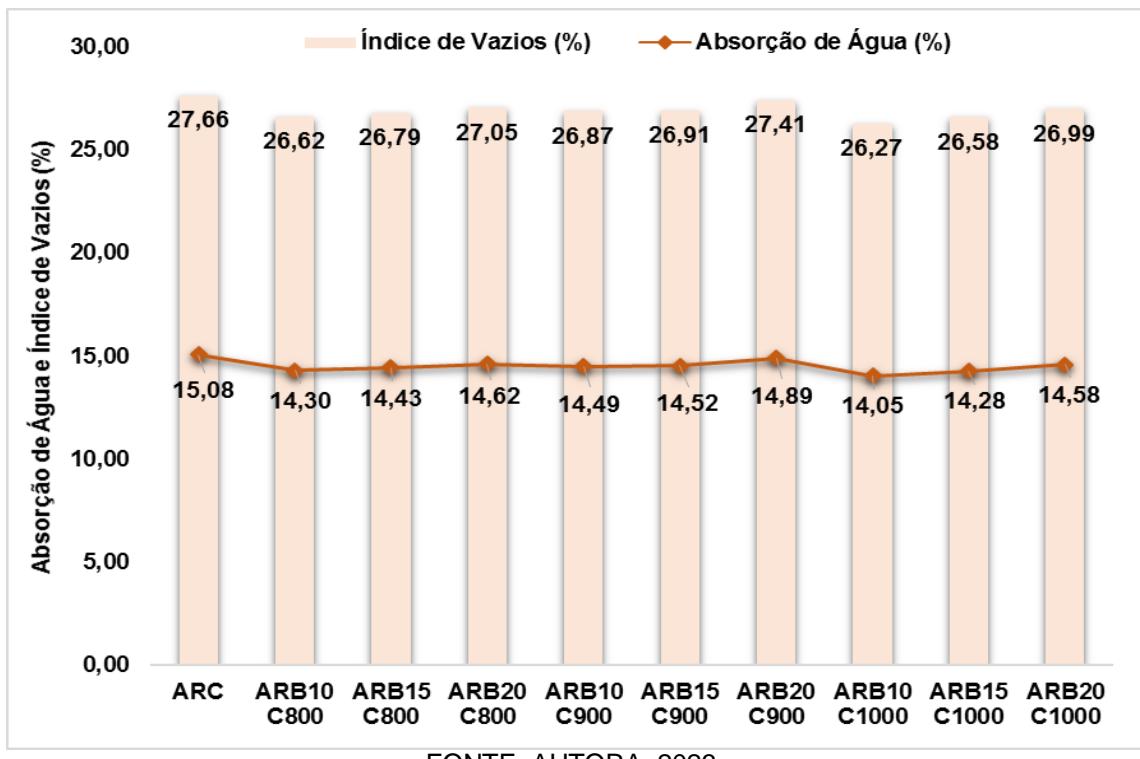
Dando segmento na tabela 20, na temperatura de 900°C, há 10%, o inicio de pega foi de 2:16hr e sessou as 3:15hr, para as porcentagens de 15% e 20% o processo de endurecimento ocorreu respectivamente de inicio ao final de hidratação de 1:10hr a 2:33hr e 0:40hr a 4:50hr respectivamente, e encerrando e possível observar que a tabela 20, a 10% o percentual de 1:00hr a 5:15hr, 15% de 0:40hr a 3:58hr e 20% que vai de 0:40hr a 4:41hr. Nas argamassas que houveram substituição do resíduo da bauxita foi adicionado aditivo retardador de pega que ajuda a manter a trabalhabilidade.

As acelerações das reações de hidratação nas pastas com resíduo de bauxita calcinada à 800°C e 1000°C diminuíram o tempo de início de pega, aceleram as reações de hidratação, modificando também a cinética de hidratação das pastas, as argamassas produzidas com RB calcinada à 900°C com 10% apresentou tempo de início de pega próximo do tempo de início de pega da pasta de referência. Segundo Manfroi, Cherif e Rocha (2010), entre os fatores que poderiam modificar as reações de hidratação, destacam-se a finura do cimento/ resíduo da bauxita e a presença de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Na<sub>2</sub>O na composição química do resíduo da bauxita. Além de que com maiores teores de resíduo da bauxita necessitam de uma maior adição de aditivo, ficou evidente que ocorreram reações na hidratação da pasta, porém não houve contribuição significativa do aditivo retentor de água no prolongamento das reações de hidratação.

### 4.3.3. Absorção de Água e Índice de vazios por imersão em argamassas

Os valores de absorção de água das amostras variaram em média entre 5,30%, 4,44% e 2,54%, nas argamassas de 10%, 15% e 20% comparadas com a ARC. A figura 24 apresenta os resultados em média, obtidos da absorção de água por imersão e índice de vazios, expondo uma abordagem do seu comportamento.

Figura 24 Relação entre índice de vazios e absorção de água das argamassas



FONTE: AUTORA, 2023

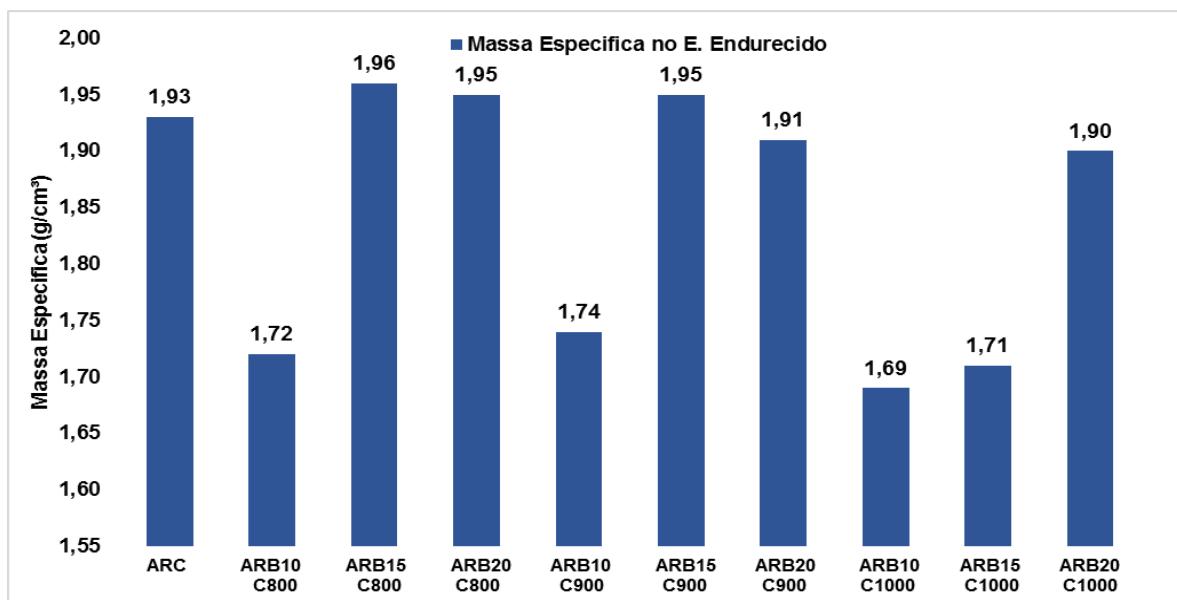
Ao analisar os resultados percebeu-se que a argamassa de referência foi superior em comparação as demais, o comportamento de absorção desses coeficientes terem sido maiores foi que os ensaios de absorção de água e do índice de vazios estão mais associados à porosidade total da argamassa endurecida. Luukkonena et al. (2018) declara, que a absorção de água depende da estrutura dos poros abertos do material. Nas amostras de 10% a sensível diminuição que ocorreu com a absorção de água e com o índice de vazios foi explanada por Manfroi, Cherif e Rocha (2010), as menores sorptividades nas argamassas de resíduo da bauxita parecem estar relacionadas com a propriedade pozolânica e um possível efeito filler, onde reduzindo a conectividade dos poros e diminuído a quantidade de água

absorvida. Uma leve estabilização foi identificada no comportamento das proporções de substituição de resíduo da bauxita de 15% e 20%, Olsson et al. (2013) complementa, que pode estar relacionado à tortuosidade dos poros, nesse caso, maiores teores de substituição por pozolanas induzem a poros mais tortuosos. Porém menos tortuosos em comparação com ARC.

#### 4.3.4. Massa Específica no estado endurecido

É notório o crescente aumento da massa específica com o aumento do teor de substituição do resíduo de bauxita, isto pode ser explicado que à medida que se aumenta a relação resíduo/cimento, diminui a massa específica no estado endurecido comparadas de mesma temperatura. Contudo a temperatura a 1000°C comportou-se como mais leve.

Figura 25 Massa Específica no Estado Endurecido



FONTE: AUTORA, 2023

Comparativamente, a massa específica no estado endurecido das argamassas ARB10C1000, ARB15C1000 e ARB20C1000 foi menor do que as demais argamassas, observado na figura 25, utilizando-se o mesmo traço de materiais, as variações das massas específicas em comparação a ARC foi de média 8,02%, 8,2% e 8,4% para 10%, 15% e 20% de substituição respectivamente, afirmindo o que. Medeiros (2016) diz, que ocorre a redução da massa específica no estado endurecido

em comparação ao valor inicial no estado fresco variando entre 7% a 9%, estas propriedades foram utilizadas para caracterização das argamassas relacionadas à presença de vazios e às resistências mecânicas. Com base nos resultados, consequentemente todas as argamassas foram classificadas no estado endurecido conforme a NBR 13281-1 (ABNT, 2023), prevista na tabela 21, com classe DF0.

Tabela 21 Massa Especifica no estado endurecido

Classe	Massa especifica no estado endurecido (DE) Kg/m <sup>3</sup>	Método de ensaio
DF0	DE <1200	NBR 13280 (ABNT, 2005)
DF1	1200≤ DE <1400	
DF2	1400≤ DE <1600	
DF3	1600≤ DE <1800	
DF4	DE ≥1800	

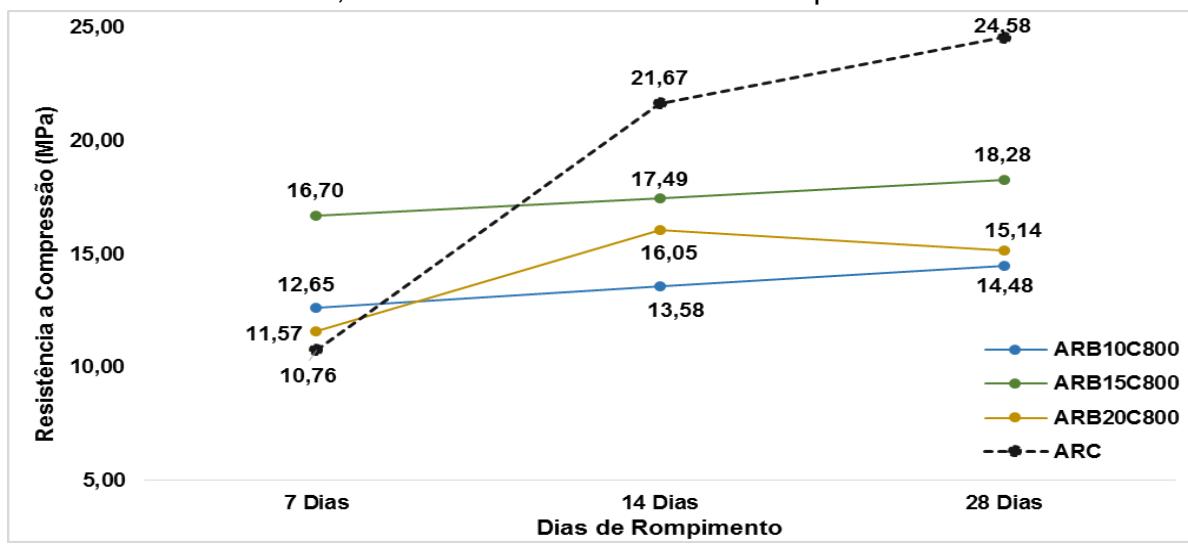
FONTE: NBR 13281-1 (ABNT, 2023)

#### 4.3.5. Resistencia à compressão axial

Nas figuras 26, 27 e 28 são apresentados o desempenho mecânico com valores de resistência à compressão axial em comparação a resistência a compressão das argamassas de referência ARC.

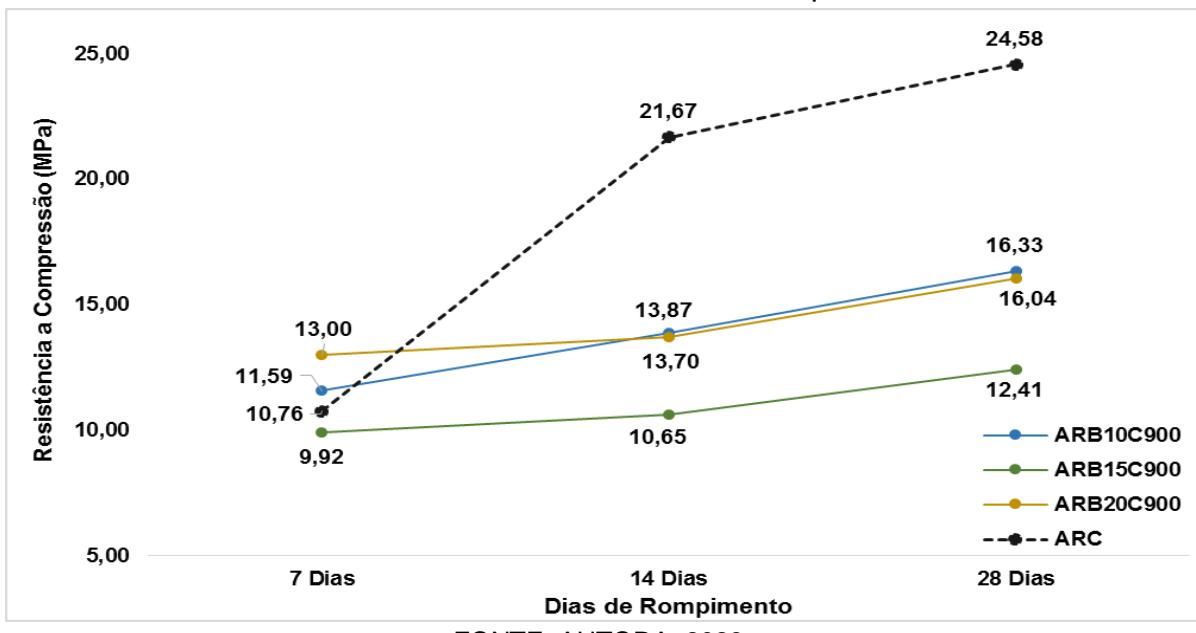
As argamassas confeccionadas com substituições de cimento por 10 e 15% e 20% de resíduo da bauxita calcinada a 800°C, 900°C e 1000°C apresentaram resistência superior aos 7 dias ao correlacionar com a ARC, aos 14 e 28 dias as resistências de ARB10C800 ARB15C800 ARB20C800 e ARB10C900 ARB15C900 ARB20C900 foram inferiores à amostra de referência.

Figura 26 Resistências a compressão Axial em CP's 5x10cm de argamassas ARB10C800, ARB15C800 e ARB20C800 comparadas a ARC



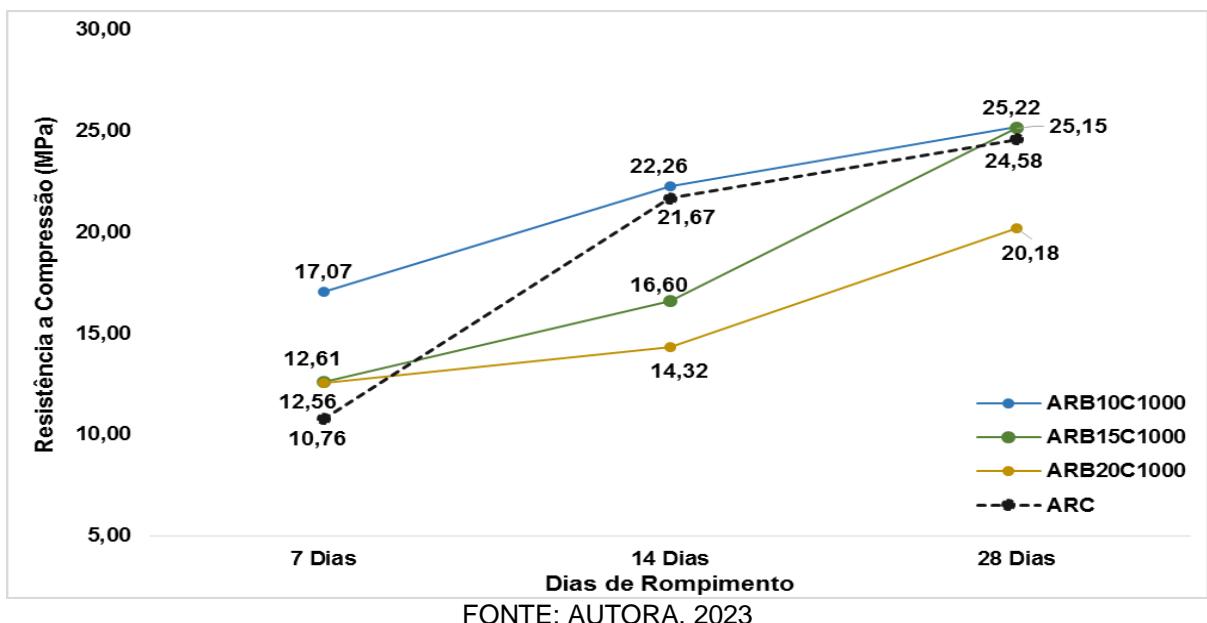
FONTE: AUTORA, 2023

Figura 27 Resistências a compressão Axial em CP's 5x10cm de Argamassas de ARB10C900, ARB15C900 e ARB20C900 comparadas a ARC.



FONTE: AUTORA, 2023

Figura 28 Resistências a compressão Axial em CP's 5x10cm de Argamassas de ARB10C1000, ARB15C1000 e ARB20C1000 comparadas a ARC.



Somente a ARB10C1000 e ARB15C1000, são semelhantes nos resultados de resistência à compressão axial das argamassas de referência (ARC) sem resíduo da bauxita aos 28 dias, isso ocorrer devido efeito pozolânico de RB calcinada nesta temperatura, um maior efeito filler parece ter melhorado a resistência à compressão destas amostras a tabela 22 apresenta classes de resistências onde, as de 800°C ficaram entre classe AAE12 e AAE16 as de 900°C permaneceram somente na classe AAE12 e substituídas a 1000°C na classe AAE20 e AAE (especial), e verificou-se que dentro do desvio-padrão não houve mudança significativa na resistência à compressão, o que mostra que a substituição parcial do cimento pelo resíduo não afetou esse parâmetro. Na dissertação de Manfroi, Cherif e Rocha (2010), estabelece a avaliação de compressão das argamassas com 10% e 15% a 800°C foi abaixo da argamassa de referência a argamassa com superplasticificante foi satisfatória sendo superior a argamasse base.

**Tabela 22 Classe de uso e critérios de resistências a compressão axial de argamassa para alvenaria estrutural**

Classe de Uso <sup>a</sup>	Classe de resistência a compressão da argamassa ( $fa$ ) <sup>b</sup> MPa	Sugeridas para seguintes faixas de uso em relação a resistência do bloco ( $fbk$ ) MPa
AAE 5	$5,0 \leq fa < 8,0$	$3 \leq fbk \leq 6$
AAE 8	$8,0 \leq fa < 12,0$	$8 \leq fbk \leq 10$
AAE 12	$12,0 \leq fa < 16,0$	$12 \leq fbk \leq 16$
AAE 16	$16,0 \leq fa < 20,0$	$18 \leq fbk \leq 20$
AAE 20	$20,0 \leq fa < 24,0$	$22 \leq fbk \leq 24$
AAE (especial)	$fa \geq 24,0$	C

a) Valores de resistência estabelecidos considerando situações de uso em alvenaria de edifícios com paredes revestidas. Para outras situações de uso não consideradas nessas classes por exemplo, alvenarias não revestidas, arrimos e reservatórios, recomenda utilizar argamassas com resistências superior ao considerado.  
 b) Resistencia a compressão ( $fa$ ) especificada pelo valor médio e coeficiente de variação inferior a 20%.  
 c) Argamassas acima de 24 Mpa são consideradas especiais, ficando sujeita a especificações para cada obra por especialistas.

FONTE: NBR 13281-2 (ABNT, 2023)

#### **4.3.6. Resistencia a tração na flexão**

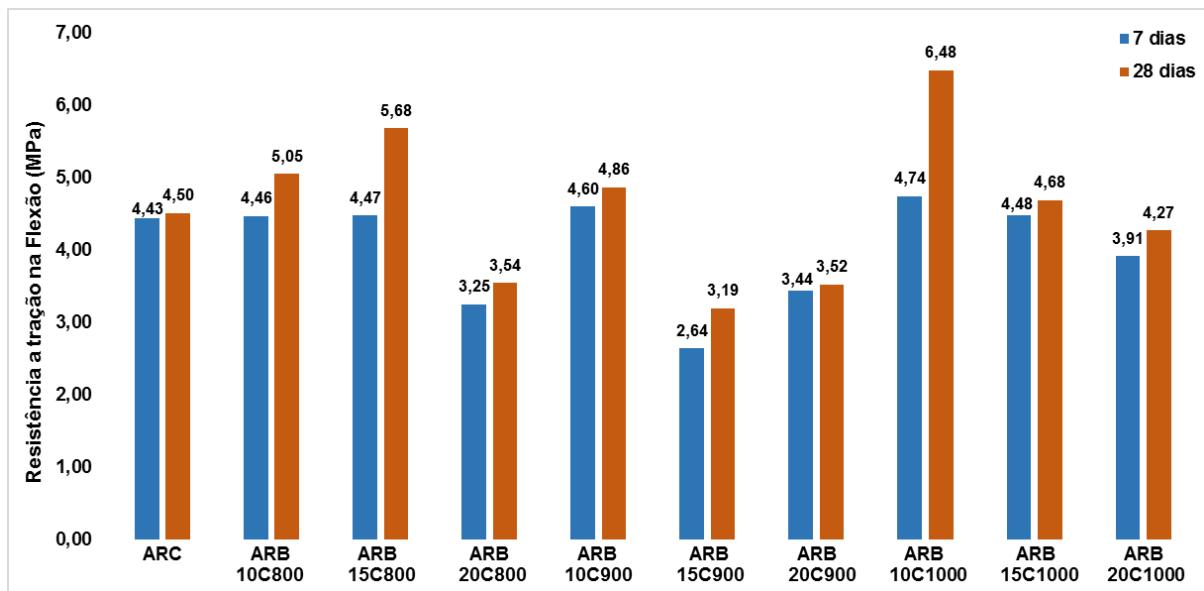
Na tabela 23, os desvios padrões estão dentro da faixa de 0,3 Mpa estipulado pela NBR 13279 (ABNT, 2005), observou-se através do figura 29, os resultados obtidos através do ensaio de tração na flexão apresentaram aos 7 dias abaixo ou parelho a resistência ARC, ao 28 dias houve um aumento na resistência mecânica nas argamassas que foram submetidas a substituição de cimento, o valor de 6,48 Mpa de ARB10C1000 obteve maior relevância, o traço ARB10C900 atingiu uma resistência 1% inferior ao traço ARB10C800, as resistências aproximadas, com diferença de valores considerada pequena, uma das explicações é o aumento da porosidade dos compósitos conforme aumenta-se a proporção de resíduos dentro da matriz cimentícia.

Tabela 23 Resistência a Tração na Flexão com desvio padrão aos 7 e 28 dias em (MPa)

Concretos	7 dias				DP	28 dias				DP
	CP1	CP2	CP3	Média		CP1	CP2	CP3	Média	
ARC	4,57	4,12	4,61	4,43	0,22	4,32	4,78	4,41	4,50	0,20
ARB10C800	4,32	4,61	4,46	4,46	0,12	4,72	5,21	5,21	5,05	0,23
ARB15C800	4,76	4,17	4,49	4,47	0,24	5,95	5,66	5,42	5,68	0,22
ARB20C800	3,11	3,35	3,29	3,25	0,10	3,64	3,27	3,72	3,54	0,20
ARB10C900	4,46	4,57	4,76	4,60	0,12	5,06	4,76	4,76	4,86	0,14
ARB15C900	2,38	2,55	2,98	2,64	0,25	3,18	2,83	3,57	3,19	0,30
ARB20C900	3,27	3,32	3,72	3,44	0,20	3,61	3,12	3,83	3,52	0,30
ARB10C1000	4,85	4,71	4,66	4,74	0,08	6,12	6,46	6,85	6,48	0,30
ARB15C1000	4,68	4,21	4,54	4,48	0,20	4,46	4,72	4,87	4,68	0,17
ARB20C1000	3,54	3,95	4,25	3,91	0,29	4,32	4,61	3,88	4,27	0,30

FONTE: AUTORA, 2023

Figura 29 Resistência a Tração na Flexão dos prismas de argamassa



FONTE: AUTORA, 2023

A comparação com substituição na massa do cimento por resíduo da bauxita está dentro da margem da dissertação de Martins (2019) onde, os resultados de resistência à tração na flexão foram avaliados apenas para a idade de 28 dias, a resistência é influenciada pela composição. Por mais que o autor tenha usado outras proporções e metodologia de ensaio a resistência foi aproximada 6,5 Mpa.

Os traços foram classificados conforme tabela 24 de resistência à tração na flexão, contida na NBR 13281-1 (ABNT, 2023), de acordo com os resultados obtidos,

todos os traços se encaixam na mesma classificação, R4 aos 28 dias, por terem atingido resultados superior a 3 MPa de resistência a tração na flexão.

Tabela 24 Critério classificação de resistência a tração na flexão

Classe	Resistencia a tração na flexão (Rf) MPa	Método de ensaio
R1	$R_f < 0,5$	NBR 13279 (ABNT, 2023)
R2	$0,5 \leq R_f < 1,5$	
R3	$1,5 \leq R_f < 3$	
R4	$R_f > 3$	

FONTE: NBR 13281-1 (ABNT, 2023)

#### 4.3.7. Compressão a tração diametral

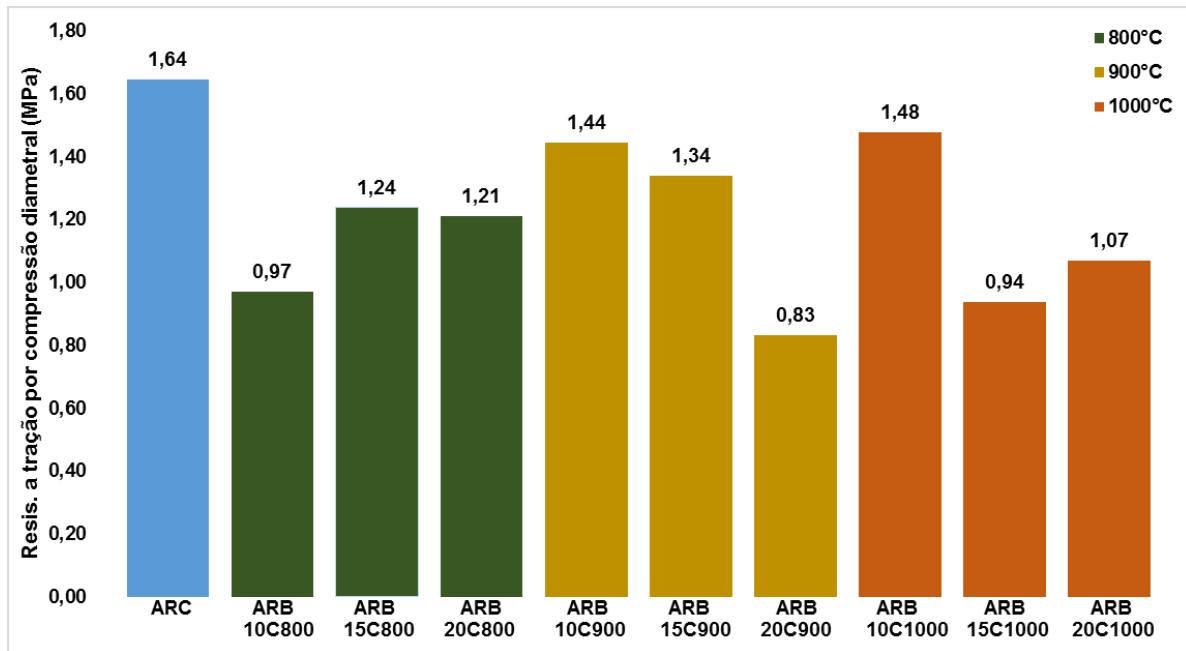
Os resultados da resistência à tração por compressão diametral demonstram que as argamassas com substituição, remetidas na tabela 25, apresentam um decréscimo conforme o aumento na porcentagem de substituição do resíduo. Porém, entre as frações substituídas, a ARB10C800 e a ARB15C1000 não há continuidade no comportamento como visto na figura 30, variando-as, isso pode ocorrer devido a espaços de vazios na matriz de cimento, onde a deformação no corpo de prova não está apenas sujeita a tração requisitante, os melhores comportamentos estão nos picos de ARB10C900 e ARB10C1000 em comparação com ARC.

Tabela 25 Resistências a Tração por Compressão Diametral (MPa)

Concretos	28 dias				DP
	CP1	CP2	CP3	Média	
ARC	1,70	1,59	1,64	1,64	0,045
ARB10C800	1,09	0,90	0,93	0,97	0,083
ARB15C800	1,17	1,32	1,22	1,24	0,062
ARB20C800	1,15	1,27	1,21	1,21	0,049
ARB10C900	1,40	1,49	1,44	1,44	0,037
ARB15C900	1,68	1,11	1,23	1,34	0,245
ARB20C900	0,80	0,85	0,84	0,83	0,022
ARB10C1000	1,42	1,52	1,49	1,48	0,042
ARB15C1000	0,92	0,96	0,93	0,94	0,017
ARB20C1000	0,97	1,15	1,08	1,07	0,074

FONTE: AUTORA, 2023

Figura 30 Resistência a Tração por Compressão Diametral aos 28 dias



FONTE: AUTORA, 2023

Já na mistura de referência existe uma aderência completa entre a matriz de cimentícia e os agregados naturais. Segundo Sena (2013) explica a variações da execução do ensaio, a deformação não depende apenas da tensão de tração atuante, pois a tensão de tração ocorre de maneira constante por todo diâmetro solicitado, já a deformação máxima na extremidade e mínima no centro do corpo de prova. Isso

acontece porque a deformação possui influência da tensão de compressão que age transversalmente à superfície.

#### **4.3.8. Modulo de elasticidade estático**

Os dados referentes a força e deslocamento foram transferidos para uma planilha eletrônica observado na tabela 26, as informações foram transpassadas para a figura 31, afim de melhor entendimento.

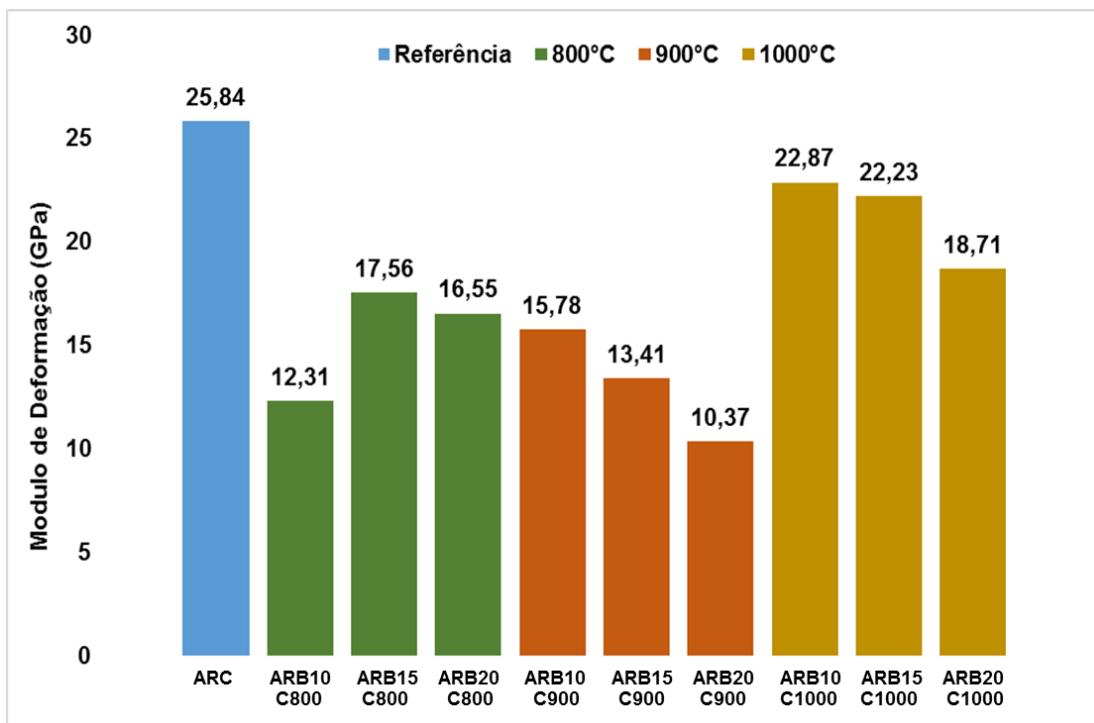
Verificou-se de forma geral que conforme a substituição do resíduo da bauxita no cimento houve a redução na resistência, porem a ARB10C800 apresentou um resultado distinto, como pode ser visto na figura 31 baseado nas proporções das demais temperaturas, esse fator pode estar ligado a defeitos no corpo-de-prova como vazios localizados originados na moldagem ondulação ou empenamento na superfície do corpo-de-prova por falha na moldagem, que leva a uma má acomodação na prensa e consequente concentração de esforços na placa, alterando o resultado.

Tabela 26 Resultados das resistências a compressão, massa específica e efeito das variáveis do modulo de deformação.

<b>Argamassa</b>	<b>Resistencia a compressão aos 28 dias (MPa)</b>	<b>Massa específica (g/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Modulo de Deformação (GPa)</b>
ARC	24,58	1,83	25,84
ARB10C800	14,48	1,86	12,31
ARB15C800	18,28	1,86	17,56
ARB20C800	15,14	1,85	16,55
ARB10C900	16,33	1,85	15,78
ARB15C900	12,41	1,85	13,41
ARB20C900	16,04	1,84	10,37
ARB10C1000	25,22	1,87	22,87
ARB15C1000	25,15	1,86	22,23
ARB20C1000	20,18	1,85	18,71

FONTE: AUTORA, 2023

Figura 31 Módulo de deformação dos corpos de prova aos 28 dias



FONTE: AUTORA, 2023

O decréscimo é fundamentado para os diferentes módulos de deformação submetidos a influência do resíduo poroso do resíduo da bauxita nas argamassas, o que prejudica o desempenho mecânico devido à redução na proporção do cimento além que as temperaturas de 800°C e 900 °C não apresentaram pozolanicidade, consequentemente desenvolve o aumento do teor de vazios e redução da resistência das argamassas.

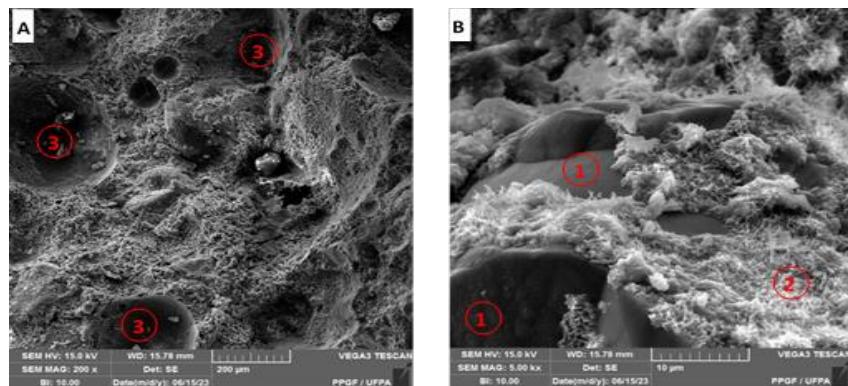
Segundo Tavares Junior (2018), partículas finas podem prejudicar a trabalhabilidade das misturas, uma vez que essas partículas possuem maior área específica. Mehdipour e Khayat (2017) complementa, a presença de finos pode acarretar uma maior porosidade devido à elevada necessidade de aditivo ou/ de agua. Podendo influenciar na resistência e no módulo de elasticidade dos compósitos. Ferreira (2016) faz menção que este comportamento não pode ser considerado como prejudicial se avaliar que estes tipos de argamassas (assentamento de alvenarias e revestimento de paredes e tetos) são expostos às deformações excessivas durante sua vida útil, consequência das largas faixas de variações térmicas e de acomodação do substrato, tal comportamento exige maiores deformações em um mesmo intervalo de tensões, o que resulta em módulos de elasticidade menores.

#### 4.3.9. Análise Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Através da análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV) utilizando equipamento com capacidade de produzir imagens de alta ampliação e resolução foi possível visualizar a estrutura morfológica das amostras revelando informações sobre sua homogeneidade derivada da mistura da pasta e a topografia da superfície estudada.

As Figuras 32, A e B mostram as micrografias obtidas por MEV da argamassa de referência (ARC), é possível observar que a amostra possui um bom cobrimento da pasta (2) com as partículas de areia (1), contudo existem espaços vazios (3).

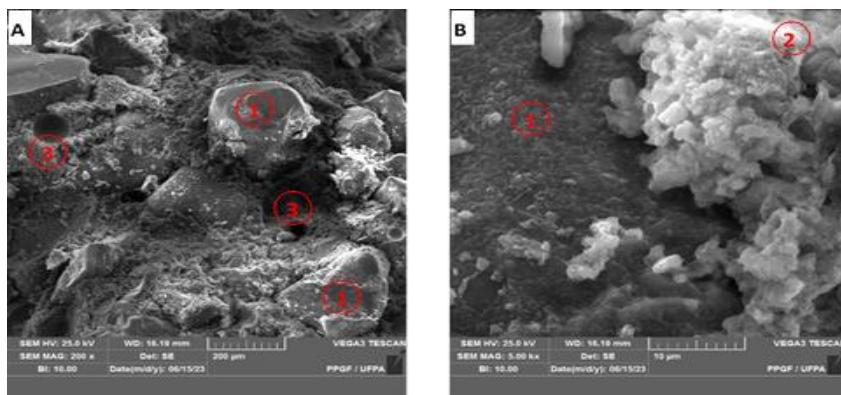
Figura 32 Micrografia da argamassa ARC 200X (A) e 5000X (B)



FONTE: AUTORA, 2023

As Figuras 33, A e B mostram as micrografias obtidas por MEV da argamassa ARB10C800, é possível presenciar que a amostra possui um bom cobrimento e homogeneidade (2) com as partículas de areia (1), contudo existem alguns espaços de vazios (3), mesmo com plasticidade dentro dos parâmetros estabelecidos pela norma NBR 7215 (ABNT, 2019) e Nakamura e Cincotto (2004), a argamassa apresentou uma porosidade, pode ser ocasionado pelo processo de hidratação.

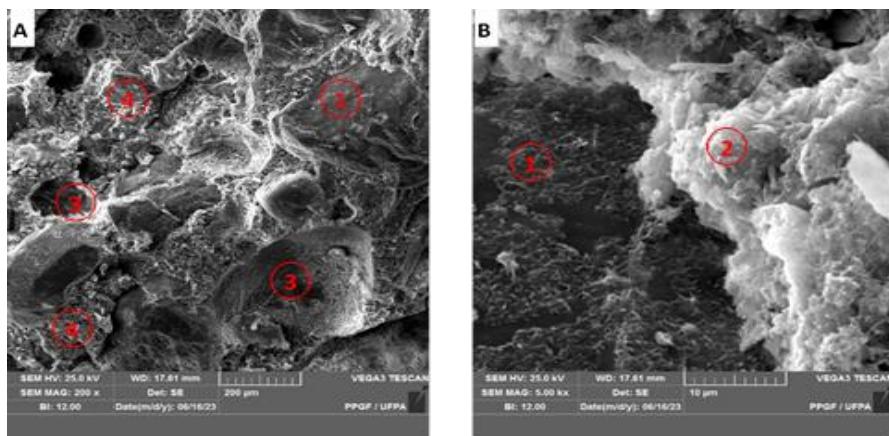
Figura 33 Micrografia da argamassa ARB10C800 200X (A) e 5000X (B)



FONTE: AUTORA, 2023

As Figuras 34, A e B mostram as micrografias obtidas por MEV da argamassa ARB15C900, é possível presenciar que a amostra possui um bom cobrimento (2) com as partículas de areia (1), porém existem espaços porosos (3), provocado pelo processo de hidratação da pasta ou relacionada a porcentagem de substituição do resíduo da bauxita no cimento.

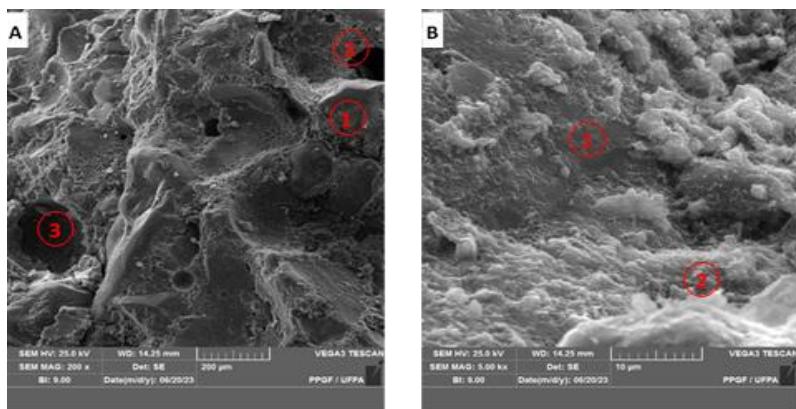
Figura 34 Micrografia da argamassa ARB15C900 200X (A) e 5000X (B)



FONTE: AUTORA, 2023

As Figuras 35, A e B mostram as micrografias obtidas por MEV da argamassa ARB15C1000, é possível presenciar que a amostra possui um excelente cobrimento (2) com as partículas de areia (1), com existência de poucos poros (3), obteve uma homogeneização e hidratação notável, além de uma influenciar nos resultados das propriedades mecânicas, conduzindo a um desempenho superior as demais temperaturas.

Figura 35 Micrografia da argamassa ARB15C1000 200X (A) e 5000X (B)



FONTE: AUTORA, 2023

#### 4.4. CONCLUSÃO

Os resultados em geral das análises, a partir dos valores obtidos, observou-se que no processo de produção da argamassa por substituição do resíduo de bauxita em comparação ARC ocorreu a necessidade de complementação com aditivo na mistura por não haver trabalhabilidade na pasta, alcançando a média entre 255mm a 260mm, estando dentro dos limites aceitáveis para índice de consistência, que é de  $255 \pm 10$ mm, os maiores valores de teor de ar incorporado foram alcançados nos traços ARB10C800, ARB10C900, ARB10C1000 e ARB15C1000, que, conforme o esperado, apresentaram os menores valores de massa específica, inferindo-se que a presença de bolhas de ar na estrutura, por serem mais leves, tornam a estrutura da argamassa menos densa, além de que o ar incorporado corresponde aos vazios formados pela entrada de ar observados no interior da argamassa, de forma geral o teor de ar incorporado com 10% é maior quando comparadas com argamassas com maior substituição de resíduo de bauxita. Diante dos resultados expostos as argamassas foram assim classificadas no estado fresco conforme a NBR 13281-1 (ABNT, 2023), as argamassas ARB10C800, ARB10C900, ARB10C1000 e ARB15C1000, e as argamassas ARC, ARB15C800, ARB20C800, ARB15C900, ARB20C900, ARB20C1000. São de classe DF3 e DF4 respectivamente, e teor de ar incorporado como argamassa de assentamento de alvenaria estrutural, AAE, estando abaixo ao estabelecido pela norma. A massa específica no estado endurecido com o aumento do teor de substituição do resíduo do processo Bayer, isto pode ser explicado que à medida que se aumenta a relação resíduo de bauxita/cimento, diminui a massa específica no estado endurecido comparadas de mesma temperatura. Contudo a

temperatura a 1000°C comportou-se como mais leve, das argamassas utilizando-se o mesmo traço de materiais.

A avaliação da absorção de água por imersão percebeu-se que a argamassa de referência foi superior em comparação as demais, o comportamento de absorvidade desses coeficientes terem sido maiores foi que os ensaios de absorção de água e do índice de vazios estão mais associados à porosidade total da argamassa endurecida.

As resistências à compressão das argamassas confeccionadas com Somente a ARB10C1000 ARB15C1000, são semelhantes nos resultados de resistência à compressão das argamassas sem resíduo da bauxita aos 28 dias, isso ocorrer devido efeito pozolânico do resíduo do processo Bayer calcinada nesta temperatura, um maior efeito fíler parece ter melhorado a resistência à compressão destas amostra apresenta classes de resistências onde, as de 800°C ficaram entre classe AAE12 e AAE16 as de 900°C permaneceram somente na classe AAE12 e substituídas a 1000°C na classe AAE20 e AAE (especial), na classe de uso de argamassa para alvenaria estrutural.

As resistências a tração na flexão os resultados obtidos através do ensaio de tração na flexão apresentaram ao 28 dias um aumento na resistência mecânica nas argamassas que foram submetidas a substituição de cimento, o valor de 6,48 MPa de ARB10C1000 obteve maior relevância, o traço ARB10C900 atingiu uma resistência inferior ao traço ARB10C800, as resistências aproximadas, com diferença de valores considerada pequena, uma das explicações é o aumento da porosidade dos compósitos conforme aumenta-se a proporção de resíduos dentro da matriz cimentícia. De acordo com os resultados obtidos, todos os traços se encaixam na mesma classificação, R4 aos 28 dias, por terem atingido resultados superior a 3 MPa de resistência a tração na flexão.

No ensaio de resistência à tração por compressão diametral os resultados demonstraram que para as argamassas com substituição, apresentaram um decréscimo conforme o aumento na porcentagem de substituição do resíduo. Porém, entre as frações substituídas, a ARB10C800 e a ARB15C1000 não há continuidade no comportamento, variando-as, isso pode ocorrer devido a espaços de vazios na matriz de cimento, onde a deformação no corpo de prova não está apenas sujeita a

tração requisitante, os melhores comportamentos estão nos picos de ARB10C900 e ARB10C1000 em comparação com ARC.

O ensaio de modulo de elasticidade estatístico da argamassa aos 28 dias, refletem também um possível potencial, comparados aos resultados da argamassa de referência, no estado endurecido as argamassas com substituição ARB10C1000 e ARB15C1000 atenderam aos 25 MPa calculado, mas em sua maioria os resultados obtidos foram abaixo dos 25 MPa pré-estabelecidos , mesmo não alcançando a resistência estipulada, todas possuíram uma classificação excelente, argamassas podem ser utilizadas para assentamento de alvenaria estrutural.

O ensaio de carbonatação por pulverização de solução de fenolftaleína estabelecida pela DIN EN 14630 (2007) na maioria das observações foi possível verificar um comportamento próximo entre as argamassas. Pela análise individual de mesma idade, as amostras com 20% de resíduo de bauxita apresentaram uma variação maior entre as demais argamassas, porém, de modo geral, elas sugerem uma taxa de crescimento superior a amostra de referência.

#### 4.5. REFERÊNCIAS

ABCP. **Associação Brasileira de Cimento Portland**, 2016. Disponível em: Disponível em: < [www.abcp.org.br](http://www.abcp.org.br)>. Acesso em: 28 jun. 2023.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE – ACI. Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete. ACI – 211.1-91. ACI Manual of Concrete Practice, 2002.

ASHBY, M.F; JONES, D. R. H. **Engineering Materials 1: An Introduction to Their Properties & Applications**. 2. ed. Great Britain: Butterworth Heinemann, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 5738: **Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: **Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211: **Agregados para concreto - Requisitos**. Rio de Janeiro, 2022.

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 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 8522-1: **Concreto endurecido - Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação Parte 1: Módulos estáticos à compressão**. Rio de Janeiro, 2021.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9778: **Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11768-1: **Aditivos químicos para concreto de cimento Portland Parte 1: Requisitos**. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 13276: **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência**. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 13278: **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado**. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 13279: **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão**. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 13280: **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido**. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 13281-1: **Argamassas inorgânicas — Requisitos e métodos de ensaios Parte 1: Argamassas para revestimento de paredes e tetos**. Rio de Janeiro, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 13281-2: **Argamassas inorgânicas — Requisitos e métodos de ensaios Parte 2: Argamassas para assentamento e argamassas para fixação de alvenaria**. Rio de Janeiro, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16606: **Cimento Portland — Determinação da pasta de consistência normal**. Rio de Janeiro, 2018.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16697: **Cimento Portland - Requisitos**. Rio de Janeiro, 2018.

CARASEK, Helena. Argamassas. In. ISAIA, Geraldo Cechella. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2010. p. 893-941.

CORDEIRO, P.C. **Estudo do avanço da frente de carbonatação em compósitos cimentícios produzidos com baixos teores de aditivos incorporadores de ar**. Belo Horizonte, 2018.

DANNER, T; JUSTNES, H. **Bauxite Residue as Supplementary Cementitious Material – Efforts to Reduce the Amount of Soluble Sodium**. Nordic Concrete Research. 2020. 2545-2819.

FERREIRA, G. C. S. SARRO, W. S. ROCHA, H. L. BUENO, G. M. CARNIN, R. L. P. **Comportamento elástico de argamassas com areia descartada de fundição**. São Paulo, 2016.

HARDJITO, D; WIBOWO, A. G. M; CHRISTIANTO, D. **Pozzolanic activity assessment of lusi (lumpur sidoarjo) mud in semi high volume pozzolanic mortar**. Materials (Basel). Switzerland. 2012. 1654–1660.

LUUKKONENA, T.; ABDOLLAHNEJADA, Z.; YLINIEMIA, J.; KINNUNENA, P.; ILLIKAINEN, M. One-part alkali-activated materials: A review. **Cement and Concrete Research**, v. 103, p. 21–34, 2018.

MANFROI, E. P. CHERIAF, M. ROCHA, J. C. **Avaliação da lama vermelha como material pozolânico em substituição ao cimento para produção de argamassas**. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

MARTINS, M. L. F. **Subprodutos da fabricação de magnésio metálico e refino da bauxita como substituintes ao cimento Portland**. Belo Horizonte, 2019.

MEDEIROS, M. **Estudo de argamassas de revestimento com resíduo de scheelita**. 2016. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Natal, RN, 2016.

MEHDIPOUR, I.; KHAYAT, K. H. **Effect of particle-size distribution and specific surface area of different binder systems on packing density and flow characteristics of cement paste**. **Cement and Concrete Composites**, 2017. Disponível em: doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.01.005. Acesso em: maio, 2023.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2 ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

NAKAMURA, E. H.; CINCOTTO, M. A. **Análise dos requisitos de classificação de argamassas de assentamento e revestimento**. [São Paulo], 2004.

OLSSON, N., BAROGHEL-BOUNY, V., NILSSON, L. O., THIERY, M. **Non-saturated ion diffusion in concrete – A new approach to evaluate conductivity measurements.** Cement and Concrete Composites. (2013). Disponível em <<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2023.05.001>>. Acesso em 24 março. 2023.

PRUDÊNCIO JR., L.R. **Materiais de construção civil.** Notas de aula, Curso de Graduação em Engenharia Civil – UFSC, 2007.

RECENA, F. A. P. **Conhecendo argamassa.** - 2<sup>a</sup> ed. - Porto Alegre: EDIPUCRS, 188 p, 2011.

ROSÁRIO, K. A. **Concreto com utilização de agregado graúdo sintético produzido a partir da lama vermelha: estudos de dosagem, propriedades e microestrutura.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil PPGEC, Belém, 2013.

SENA, L. V. T. **Análise Do Comportamento Mecânico do Concreto Submetido ao Ensaio de Compressão Diametral: Análise Experimental com o Uso da Técnica da Correlação de Imagens.** TCC (Graduação) - Curso de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal Rural do Semiárido, Mossoró, 2013. 76p.

TAVARES JUNIOR, J. F. **Influência do empacotamento da areia no desempenho dos compósitos cimentícios.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia de Materiais e Construção – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

TURRA, Daniel G. **Contribuições para o estudo de algumas propriedades nos estados fresco e endurecido da argamassa estabilizada por 72 horas.** 2016. 72 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre, 2016. Disponível em: Acesso em: 11 de junho de 2023.

VIEIRA, M. SOUSA, L. BRITO, I. L. SALES, V. CUNHA, D. CRUZ, W. MEDEIROS, J. BRASILEIRO, L. **Comparativo do efeito umidade no módulo de elasticidade dinâmico de argamassas.** In. Simpósio brasileiro sobre reabilitação das construções 2, Fortaleza, 2019. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/333982169\\_COMPARATIVO\\_DO\\_EFEITO\\_UMIDADE\\_NO\\_MODULO\\_DE\\_ELASTICIDADE\\_DINAMICO\\_DE\\_ARGAMASSAS](https://www.researchgate.net/publication/333982169_COMPARATIVO_DO_EFEITO_UMIDADE_NO_MODULO_DE_ELASTICIDADE_DINAMICO_DE_ARGAMASSAS). Acesso em: maio, 2023.

ZUCCHETI, G.C; NETO, R.S; DAL BELLO; A.C; STOTZ; C.M; MASUERO; A.B. **Identificação de boas práticas e oportunidades de melhoria no processo de produção de revestimentos de argamassa projetada.** In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia das argamassas. Anais do Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas. São Paulo, 2017.

## **5- CONCLUSÃO GERAL**

Os experimentos tiveram como finalidade, analisar a reação da composição mineralógica do resíduo da bauxita na substituição parcial do cimento, em prol de averiguar o desempenho das propriedades mecânicas na formação da argamassa no estado endurecido. A partir dos dados obtidos, pode-se chegar às seguintes conclusões.

O resíduo da bauxita proveniente do processo Bayer, reduzida a uma granulometria Filler, utilizada para a produção das argamassas, possuiu a mesma distribuição granulométrica do cimento, o que ocasionou numa melhoria de algumas das propriedades das argamassas estudadas, como as resistências mecânicas e módulos de elasticidade. No estado fresco, as determinações da massa específica das argamassas apresentaram resultados menores ou proporcionais em relação a argamassa de referência variando com o teor de substituição, consistindo em uma argamassa mais leve ou densa, o teor de ar incorporado, deduz que a presença de bolhas de ar na estrutura aumenta com a diminuição da massa específica, além de que o ar incorporado corresponde aos vazios formados pela entrada de ar no interior da argamassa, interferindo diretamente na trabalhabilidade da pasta cimentícia.

As análises por Fluorescência de raios-X (FRX) e Difração de raios-X (DRX) demonstram uma propensão para que o resíduo da bauxita se comporte como material pozolânico, o resíduo calcinado demonstrou que a mesma possui em sua composição química sílica e alumina, compostos estes que certifica a propriedade pozolânica. Através dos resultados adquiridos, pode-se dizer que o resíduo da bauxita calcinada em temperaturas de 800°C, 900°C e 1000°C, executados através da metodologia da NBR 5752 (ABNT, 2014), e obedecendo os requisitos da NBR12653 (ABNT, 2015), classificou as de 800°C e 900°C como material não pozolânico, sendo que o único que apresentou um teor de índice de atividade pozolânica igual a 90% ao desempenho do cimento Portland aos 28 dias foi 1000°C. A avaliação do início e final de pega foi estudada nas pastas cimentícia, onde a cinética de hidratação das pastas, foi transfigurado quando se substituiu parte do cimento (10%, 15% e 20%) por resíduo da bauxita calcinada, todas as pastas produzidas apresentaram menor tempo de início de pega, indicando uma aceleração das reações dos compostos aluminosos do resíduo com os compósitos de hidratação do cimento, o tempo de fim de pega variaram de 0% até 50,88% condizente ou abaixo ao da pasta de referência.

As resistências mecânicas apresentaram-se maiores em significância comparadas com argamassa de referência somente a 1000°C. Tanto para os ensaios de resistência à compressão quanto para os de resistência à tração na flexão e tração diametral. Este comportamento está relacionado a reatividade pozolânica do resíduo. Enfatizando que os melhores resultados foram para as argamassas com 10% de substituição da massa do cimento pelo resíduo. A densidade de massa no estado endurecido ocorreu uma redução dos resultados, comparados a densidade de massa no estado fresco, esta propriedade está relacionada a minoração do índice de vazios que influencia na resistência mecânica. Os resultados da absorção de água por imersão, foram menores que a argamassa de referência, e índice de vazios pareados ao de referência, com mínima diferença.

As apurações sobre o módulo de elasticidade das argamassas refletem também um possível potencial pozolânico destes resíduos presente na temperatura de 1000°C, os apuramentos encontrados nas avaliações em comparação das argamassas são satisfatórios, comparados aos resultados da argamassa de referência, no estado endurecido as argamassas com substituição ARB10C1000 e ARB15C1000 atenderam aos 25 MPa calculado, mas em sua maioria os resultados obtidos foram abaixo dos 25 MPa pré-estabelecidos , mesmo não alcançando a resistência estipulada, todas possuíram uma classificação excelente, argamassas podem ser utilizadas para assentamento de alvenaria estrutural.

Por fim, a utilização do resíduo da bauxita como material fíler, para produção de argamassas poderão minimizar o armazenamento do resíduo no meio ambiente, além moderar os custos para as indústrias produtoras de alumina e cimento.

## **5.1 Sugestões para trabalhos futuros**

A produção de argamassas cimentícias com substituições de resíduo da bauxita é outra aplicação que vem sendo bastante estudada, a proposta seria realizar ensaios como:

- a) Realizar o ensaio retenção de agua, a favor de analisar a porcentagem de reter a água de amassamento que serve tanto para lubrificar os materiais secos quanto para garantir a hidratação do cimento.
- b) Realizar e analisar o comportamento do teor de cloretos, para determinação da profundidade de penetração dos íons de cloreto.

- c) Realizar o ensaio de durabilidade a sulfatos em prol de analisar as variáveis de sua degradação.
- d) Realizar o ensaio de reação álcali- sílica, com intuito de averiguar as reações químicas que ocorre internamente em uma estrutura de argamassa entre os hidróxidos alcalinos.
- e) Trabalhar com outras proporções em substituição no cimento e variadas temperaturas.

## **6- REFERÊNCIAS GERAIS**

ABAL. **Alumínio.** São Paulo, (2023). Disponível em: <<https://abal.org.br/aluminio/cadeia-primaria/>>. Acesso em: 23 jul. 2023.

ABCP. **Associação Brasileira de Cimento Portland**, 2016. Disponível em: Disponível em: <[www.abcp.org.br](http://www.abcp.org.br)>. Acesso em: 28 jun. 2023.

ABOAGYE, A. et al. **Advances in control of thihydrate classification using high performance flocculation**. Proceedings of the 9th International Alumina Quality Workshop. [S.I.]: [s.n.]. 2012. p.71-74.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE – ACI. **Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete**. ACI – 213R-87. ACI Manual of Concrete Pratice, 1997.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE – ACI. Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete. ACI – 211.1-91. ACI Manual of Concrete Pratice, 2002.

ANTUNES, M.L.P; CONCEIÇÃO, F.T; TOLEDO, S.P; KIYOHARA, P.K. **Bauxita e seu resíduo, caracterização e estudo por microscopia eletrônica**. IX Brazilian Symposium on Glass and Related Materials, Curitiba, PR, junho 2012.

AQUINO, T. F. **Beneficiamento químico da bauxita de Santa Catarina**, Diss. Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, SC, 2007. 125.

ASHBY, M.F; JONES, D. R. H. **Engineering Materials 1: An Introduction to Their Properties & Applications**. 2. ed. Great Britain: Butterworth Heinemann, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 5738: **Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: **Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5751: **Materiais pozolânicos - Determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias**. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5752: **Materiais pozolânicos — Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias**. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211: **Agregados para concreto - Requisitos**. Rio de Janeiro, 2022.

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 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 8522-1: **Concreto endurecido - Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação Parte 1: Módulos estáticos à compressão.** Rio de Janeiro, 2021.

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

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** NBR 9778: **Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica.** Rio de Janeiro, 2005.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** NBR 11768-1: **Aditivos químicos para concreto de cimento Portland Parte 1: Requisitos.** Rio de Janeiro, 2019.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** NBR 11768-2: **Aditivos químicos para concreto de cimento Portland Parte 2: Ensaios de desempenho.** Rio de Janeiro, 2019.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** NBR 11768-3: **Aditivos químicos para concreto de cimento Portland Parte 3: Ensaios de caracterização.** Rio de Janeiro, 2019.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** NBR 12653: **Materiais pozolânicos — Requisitos.** Rio de Janeiro, 2015

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** 13276: **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência.** Rio de Janeiro, 2016.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** 13278: **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado.** Rio de Janeiro, 2005.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** 13279: **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão.** Rio de Janeiro, 2005.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** 13280: **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido.** Rio de Janeiro, 2005.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** 13281-1: **Argamassas inorgânicas — Requisitos e métodos de ensaios Parte 1: Argamassas para revestimento de paredes e tetos.** Rio de Janeiro, 2023.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** 13281-2: **Argamassas inorgânicas — Requisitos e métodos de ensaios Parte 2: Argamassas para assentamento e argamassas para fixação de alvenaria.** Rio de Janeiro, 2023.

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

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** NBR 15900-1: **Água para amassamento do concreto Parte 1: Requisitos.** Rio de Janeiro, 2009.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** NBR 16372: **Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine).** Rio de Janeiro, 2015.

**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 16606: **Cimento Portland — Determinação da pasta de consistência normal.** Rio de Janeiro, 2018.

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

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** NBR 16697: **Cimento Portland - Requisitos.** Rio de Janeiro, 2018.

**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 16972: **Agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios.** Rio de Janeiro, 2021.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** NBR 17052: **Materiais pozolânicos - Determinação do teor de álcalis disponíveis.** Rio de Janeiro, 2022.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** NBR 17054: **Agregados - Determinação da composição granulométrica - Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2022.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** NBR 17086-5: **Cimento Portland — Análise química Parte 5: Determinação do trióxido de enxofre.** Rio de Janeiro, 2023.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS.** NBR 17086-6: **Cimento Portland — Análise química Parte 6: Determinação da perda ao fogo.** Rio de Janeiro, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 17086-9: **Cimento Portland — Análise química Parte 9: Análise química para cimento Portland com adições de materiais pozolânicos.** Rio de Janeiro, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 1920-12 **Testing of concrete — Part 12: Determination of the carbonation resistance of concrete — Accelerated carbonation method.** Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 11-2: **Cimento Portland - Análise química - Determinação de óxidos principais por complexometria Parte 2: Método ABNT.** Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 13: **Cimento Portland - Análise química - Determinação de óxido de cálcio livre pelo etileno glicol.** Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 25: **Materiais pozolânicos - Determinação do teor de ácalis disponíveis.** Rio de Janeiro, 2003.

CARASEK, Helena. Argamassas. In. ISAIA, Geraldo Cechella. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais.** 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2010. p. 893-941.

CORDEIRO, P.C. **Estudo do avanço da frente de carbonatação em compósitos cimentícios produzidos com baixos teores de aditivos incorporadores de ar.** Belo Horizonte, 2018.

DANNER, T; JUSTNES, H. **Bauxite Residue as Supplementary Cementitious Material – Efforts to Reduce the Amount of Soluble Sodium.** Nordic Concrete Research. 2020. 2545-2819.

DA SILVA, T. C. G.; PIMENTEL, M. G., MACÊDO, A. N., PICANÇO, M. S., MARTINS, W. S., JUNIOR, A. O., SILVA, A. L. M. F., BRITO, W. S. **Avaliação dos efeitos da temperatura na lama vermelha da região amazônica.** Congresso Brasileiro de engenharia e ciência dos materiais, Nova Iguaçu, PR, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL (DNPM). **Anuário Mineral Brasileiro.** Brasília, DF, 2017. Disponível em: < [https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro/amb\\_metalicos2017](https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/anuario-mineral/anuario-mineral-brasileiro/amb_metalicos2017)>. Acesso em: 23 jun. 2023.

FARIA, M; BARRETO, O. **Caracterização micro-nanoestrutural e química de argamassas de cimento Portland,** fev 2014.

FERREIRA, G. C. S. SARRO, W. S. ROCHA, H. L. BUENO, G. M. CARNIN, R. L. P. **Comportamento elástico de argamassas com areia descartada de fundição.** São Paulo, 2016.

FURCAS, C. et al. **Evaluation of CO<sub>2</sub> Uptake under Mild Accelerated Carbonation Conditions in Cement-Based and Lime-Based Mortars.** Advanced Materials Research, v. 980, n. 2, p. 57–61, 2014.

HARDJITO, D; WIBOWO, A. G. M; CHRISTANTO, D. **Pozzolanic activity assessment of lusi (lumpur sidoarjo) mud in semi high volume pozzolanic mortar.** Materials (Basel). Switzerland. 2012. 1654–1660.

HUDSON, L. K. MISRA, C. PERROTTA, A. J. WEFERS, K. WILLIAMS, F. S. **Aluminium Oxide.** In: \_\_ Ulmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. [S.I.]: [s.n.], 2012

HYDRO. **Relatório Anual,** (2020). Disponível em: <<https://www.hydro.com/pt-BR/sobre-a-hydro/a-hydro-no-mundo/south-america/brazil/paragominas/mineracao-paragominas/barragens/>>. Acesso em: 08 jun. 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO (IBRAM). **Gestão e Manejo de Rejeitos da Mineração,** Brasília, 2016. Acesso em: < <https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2021/02/Gestao-e-Manejo-de-Rejeitos-da-Mineracao-2016.pdf>>. Acesso em: 16 jun. 2023.

JAMIESON, Evan John. **Development and Utilisation of Bayer process By-products.** School of Civil and Mechanical Engineering, Department of Civil Engineering, 2013.

LAZOU, A. et al. **The Utilization of Bauxite Residue with a Calcite-Rich Bauxite Ore in the Pedersen Process for Iron and Alumina Extraction.** Metallurgical and Materials Transactions B, [s. l.], v. 52, 2021, p. 1255-1266. Acesso em: 23 jun. 2021.

LOTHENBACH, B., SCRIVENER, K., HOOTON, R. D. **Supplementary cementitious materials,** Cement and Concrete Research, v. 41, n. 12, pp. 1244-1256, December 2011.

LUUKKONENA, T.; ABDOLLAHNEJADA, Z.; YLINIEMIA, J.; KINNUNENA, P.; ILLIKAINEN, M. One-part alkali-activated materials: A review. **Cement and Concrete Research,** v. 103, p. 21–34, 2018.

MACÊDO, A. N. et al. **Comportamento de blocos cerâmicos estruturais produzidos a partir da mistura de lama vermelha e argila.** Revista Ambiente Construído, Porto Alegre, v. XI, n. 4, p. 25-36, outubro/dezembro 2011. ISSN 1678-8621.

MAGALHÃES, E. M. **Estudo da extração de compostos de ferro da lama vermelha visando a concentração e/ou extração de compostos de titânio.** Tese de Doutorado. Universidade Federal do Pará- UFFPA. Belém/PA, 2012.

MANFROI, E. P. CHERIAF, M. ROCHA, J. C. **Avaliação da lama vermelha como material pozolânico em substituição ao cimento para produção de argamassas.** Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

MARTINS, M. L. F. **Subprodutos da fabricação de magnésio metálico e refino da bauxita como substituintes ao cimento Portland.** Belo Horizonte, 2019.

MAZURANA, L. **Captura de CO<sub>2</sub> em argamassas de revestimento através da carbonatação natural,** Paraná, 2019.

MEDEIROS, M. **Estudo de argamassas de revestimento com resíduo de scheelita.** 2016. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Natal, RN, 2016.

MEHDIPOUR, I.; KHAYAT, K. H. **Effect of particle-size distribution and specific surface area of different binder systems on packing density and flow characteristics of cement paste.** Cement and Concrete Composites, 2017. Disponível em: [doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.01.005](https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.01.005). Acesso em: maio, 2023.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais.** 2 ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

NAKAMURA, E. H.; CINCOTTO, M. A. **Análise dos requisitos de classificação de argamassas de assentamento e revestimento.** [São Paulo], 2004.

NORSK HYDRO. **Annual report – 2020.** Oslo, Noruega: Norsk Hydro ASA, 2021. Disponível em: <https://www.hydro.com/globalassets/download-center/investor-downloads/ar20/annual-report-2020-new.pdf>. Acesso em: 25 set. 2022.

OLSSON, N., BAROGHEL-BOUNY, V., NILSSON, L. O., THIERY, M. **Non-saturated ion diffusion in concrete – A new approach to evaluate conductivity measurements.** Cement and Concrete Composites. (2013). Disponível em <<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.05.001>>. Acesso em 24 março. 2023.

PADE, C.; GUIMARAES, M. **The CO<sub>2</sub> uptake of concrete in a 100 year perspective.** Cement and Concrete Research, v. 37, n. 9, p. 1348–1356, 2007.

PEREIRA, C. **Tipos de cimento:** Características e especificações. Escola engenharia, 14 de jan. de 2019. Disponível em: <<https://www.escolaengenharia.com.br/tipos-de-cimento/>>. Acesso em: 28 de jun. de 2023.

PETRUCCI, E.G. R. **Concreto de cimento Portland.** 13. ed. São Paulo: Globo, 1998.

PRUDÊNCIO JR., L.R. **Materiais de construção civil.** Notas de aula, Curso de Graduação em Engenharia Civil – UFSC, 2007.

RECENA, F. A. P. **Conhecendo argamassa.** - 2<sup>a</sup> ed. - Porto Alegre: EDIPUCRS, 188 p, 2011.

REDDY, P. S. et al. **Properties and Assessment of Applications of Red Mud (Bauxite Residue): Current Status and Research Needs.** Waste and Biomass Valorization, [s. l.], v. 12, p. 1185-1217, 2021.

RIBEIRO, V. A.L.; AFONSO, J. C. **Extração líquido-líquido de urânio (VI) do colofanito de Itataia (Santa Quitéria, Ceará) por extratantes orgânicos em presença de ácido fosfórico.** Química Nova, v. 31, n. 8, p. 2159-2164, 2006.

RODRIGUES, D. de A. C. **Modelagem do processo de autoprecipitação de gibsita em decantadores do processo Bayer**, Natal/RN, 2018.

ROSÁRIO, K. A. **Concreto com utilização de agregado graúdo sintético produzido a partir da lama vermelha: estudos de dosagem, propriedades e microestrutura.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil PPGEc, Belém, 2013.

SANTOS, L.J.C.; BERRIER, J.; GRIMALDI, M.; CASTRO, S.S. **Utilização do microscópio eletrônico de varredura (mev) para o reconhecimento de revestimentos argilosos**, Paraná, 2003.

SENA, L. V. T. **Análise Do Comportamento Mecânico do Concreto Submetido ao Ensaio de Compressão Diametral: Análise Experimental com o Uso da Técnica da Correlação de Imagens.** TCC (Graduação) - Curso de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal Rural do Semiárido, Mossoró, 2013. 76p.

SIKA, Brasil. **Sika Concreto Forte.** Ficha técnica de produto, São Paulo, 2020. Disponível em:< [https://bra.sika.com/content/dam/dms/br01/o/sika\\_concreto\\_forte.pdf](https://bra.sika.com/content/dam/dms/br01/o/sika_concreto_forte.pdf) >. Acesso em: 28 de jun.de 2023.

SILVA, Djalma Ribeiro da. **Estudo de inibidores de corrosão em concreto armado, visando a melhoria na sua durabilidade.** 2006. 195 f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2006.

SILVA FILHO, E. B.; ALVES, M. C. M.; MOTTA, M. D. **Lama vermelha da indústria de beneficiamento de alumina: produção, características, disposição e aplicações alternativas.** Revista Matéria, v. XII, n. 2, p. 322-338, 2007. ISSN 1517-7076.

TAVARES JUNIOR, J. F. **Influência do empacotamento da areia no desempenho dos compósitos cimentícios.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia de Materiais e Construção – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

TURRA, Daniel G. **Contribuições para o estudo de algumas propriedades nos estados fresco e endurecido da argamassa estabilizada por 72 horas.** 2016. 72 f. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, Porto Alegre, 2016. Disponível em: Acesso em: 11 de junho de 2023.

U.S.G.S, **Mineral Commodity Summaries**, jan. 2020. Disponível em: <<https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2020/mcs2020.pdf>>. Acesso em: 23 jun. 2023.

VIEIRA, M. SOUSA, L. BRITO, I. L. SALES, V. CUNHA, D. CRUZ, W. MEDEIROS, J. BRASILEIRO, L. **Comparativo do efeito umidade no módulo de elasticidade**

**dinâmico de argamassas.** In. Simpósio brasileiro sobre reabilitação das construções 2, Fortaleza, 2019. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/333982169\\_COMPARATIVO\\_DO\\_EFEITO\\_UMIDADE\\_NO\\_MODULO\\_DE\\_ELASTICIDADE\\_DINAMICO\\_DE\\_ARGAMASSAS](https://www.researchgate.net/publication/333982169_COMPARATIVO_DO_EFEITO_UMIDADE_NO_MODULO_DE_ELASTICIDADE_DINAMICO_DE_ARGAMASSAS). Acesso em: maio, 2023.

WANG, Q.; YUEHUA, J. **Optimization of precipitation process of chinese refinery.** Proceedings of the 10th International alumina quality workshop. 2015: [s.n.]. 2015. p. 53-58.

World Aluminium and the European Aluminium Association “**Bauxite Residue Management: Best Practice**”, available from the International Aluminium Institute, London, 2015. Disponível em: < [https://bauxite.world-aluminium.org/fileadmin/\\_migrated/content\\_uploads/Bauxite\\_Residue\\_Management\\_-\\_Best\\_Practice\\_\\_English\\_.pdf](https://bauxite.world-aluminium.org/fileadmin/_migrated/content_uploads/Bauxite_Residue_Management_-_Best_Practice__English_.pdf) >. Acesso em: 23 jul. 2023.

World Aluminium Organization (WAO), **Available from the International Aluminium Institute**, London, 2020. Disponível em: < <https://international-aluminium.org/resource/technology-roadmap-maximizing-the-use-of-bauxite-residue-in-cement/> >. Acesso em: 2 maio. 2023.

World Aluminium Organization (WAO), **Sustainable Bauxite Residue Management Guidance**, London, 2022. Disponível em: < <https://international-aluminium.org/resource/sustainable-bauxite-mining-guidelines-second-edition-2022-2/> >. Acesso em: 4 jul. 2023.

ZENG, H. et al. **Progress on the Industrial Applications of Red Mud with a Focus on China. Minerals**, [s. l.], v. 10, n. 9, p. 773, 2020. Acesso em: 6 set. 2022.

ZUCCHETI, G.C; NETO, R.S; DAL BELLO, A.C; STOTZ, C.M; MASUERO, A.B. **Identificação de boas práticas e oportunidades de melhoria no processo de produção de revestimentos de argamassa projetada.** In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia das argamassas. Anais do Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas. São Paulo, 2017.