

UFPA

PPGEC

Universidade Federal do Pará



Leandro Henrique Costa Barros

**ANÁLISE DO USO DE REJEITO DE BAUXITA COMO
ADIÇÃO POZOLÂNICA PARA CIMENTO PORTLAND**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Instituto de Tecnologia
Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil

Dissertação Orientada pelo Professor Alcebíades Negrão Macedo

Belém – Pará – Brasil
2024

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



Leandro Henrique Costa Barros

**Análise do Uso de Rejeito de Bauxita como Adição Pozolânica para
Cimento Portland**

Dissertação de Mestrado

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

Orientador: Prof. Alcebíades Negrão Macedo

Belém/Pará
Maio de 2024

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)

B277a BARROS, LEANDRO HENRIQUE COSTA BARROS.
ANÁLISE DO USO DE REJEITO DE BAUXITA COMO
ADIÇÃO POZOLÂNICA PARA CIMENTO PORTLAND /
LEANDRO HENRIQUE COSTA BARROS BARROS. — 2024.
3 f.

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

1. REJEITO DE BAUXITA. 2. CARACTERIZAÇÃO. 3.
CIMENTO PORTLAND. 4. ADIÇÕES MINERAIS. I. Título.

CDD 624

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



Leandro Henrique Costa Barros

Análise do Uso de Rejeito de Bauxita Como Adição Pozolânica para Cimento Portland

Prof. Dr. Alcebíades Negrão Macedo

Orientador

Faculdade de Engenharia Civil – UFPA

Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço

Faculdade de Engenharia Civil – UFPA

Prof. Dr. Rodrigo Rodrigues da

Cunha

Faculdade de Engenharia Civil – IFPA

Prof. Dra. Nailde de Amorim Coelho

Universidade Federal do Vale do São Francisco -UNIVASF

Belém, 07 de maio de 2024.

ANÁLISE DO USO DE REJEITO DE BAUXITA COMO ADIÇÃO POZOLÂNICA PARA CIMENTO PORTLAND

AUTOR:

LEANDRO HENRIQUE COSTA BARROS

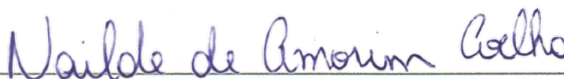
DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À BANCA
EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA CIVIL DO INSTITUTO DE
TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO
PARÁ, COMO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO
GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL NA
ÁREA DE ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL.

APROVADO EM: 07 / 05 / 2024.

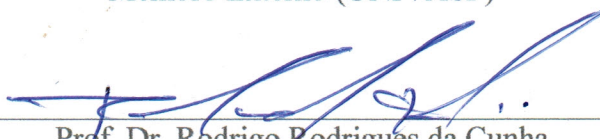
BANCA EXAMINADORA:



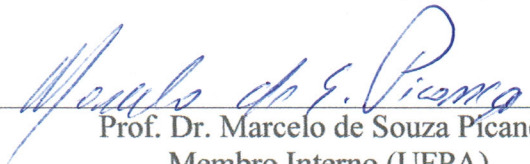
Prof. Dr. Alcebíades Negrão Macêdo
Orientador (UFPA)



Prof. Dra. Nailde de Amorim Coelho
Membro Externo (UNIVASF)



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



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

Visto:



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

*“Pois o Senhor é quem dá sabedoria e de sua boca procedem o
conhecimento e o discernimento.”
(Provérbios 2:6)*

RESUMO

As atividades de mineração de bauxita, desde a fase de extração até o beneficiamento, geram um grande volume de resíduos, que representa um sério problema para as fontes geradoras, dada a dificuldade encontrada para uma destinação final ambientalmente adequada e com custos reduzidos. Neste sentido, as empresas de mineração têm buscado investir em estudos que apontem uma alternativa para a realização da logística reversa deste subproduto. Até então, a maioria das pesquisas desenvolvidas estava voltada para o emprego deste material na produção de agregados sintéticos, existindo um grande leque de opções que foram pouco exploradas. Desta forma, no intuito de ampliar a gama de pesquisa, o objetivo deste trabalho é avaliar a possibilidade de utilização do resíduo proveniente do beneficiamento da bauxita para a produção de adição pozolânica para cimento Portland. Para tanto, o resíduo de bauxita foi testado em três diferentes condições de estudo, o resíduo *in natura*, e o que foi calcinado a temperaturas de 600°C e 700°C. Foram produzidos corpos de prova com composições de argamassa de cimento Portland com a substituição de 14% do cimento CPV pelo resíduo de bauxita, os quais foram submetidos aos ensaios de absorção por capilaridade, resistência à compressão e análise microestrutural – Mev. Os resultados indicaram que o resíduo calcinado apresenta propriedades pozolânicas que melhoram o desempenho mecânico das argamassas analisadas em até 26,31%.

Palavras-chave: Resíduo de Bauxita; Adição Pozolânica; Argamassa de Cimento Portland.

ABSTRACT

Bauxite mining activities (from the extraction phase to processing) generate a large volume of waste, which represents a serious problem for the generating sources, given the difficulty encountered in an environmentally adequate final destination at reduced costs. In this sense, mining companies have sought to invest in studies that indicate an alternative for carrying out reverse logistics for this byproduct. Until then, most of the research carried out was focused on the use of this material in the production of synthetic aggregates, with a wide range of options that were little explored. Therefore, the objective of this work is to evaluate the possibility of using residue from bauxite processing for the production of pozzolanic addition for Portland cement. To this end, the bauxite residue was tested under three different study conditions (the in natura residue, and the one that was calcined at temperatures of 600°C and 700°C). Test specimens were produced with Portland cement mortar compositions replacing 14% of CPV cement with bauxite residue, which were subjected to capillary absorption, compressive strength and microstructural analysis – Mev tests. The results indicated that the calcined residue has pozzolanic properties that improve the mechanical performance of the mortars analyzed by up to 26.31%.

Keywords: Bauxite Residue; Pozzolanic Addition; Portland Cement Mortar.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
1.1 RELEVÂNCIA DO TEMA E JUSTIFICATIVA.....	12
1.2 OBJETIVOS.....	14
1.2.1 Objetivo Geral.....	14
1.2.2 Objetivos Específicos.....	14
1.3 ESTRUTURA DA TESE.....	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.1 BAUXITA.....	16
2.1.1 Bauxita no Brasil.....	16
2.1.2 Bauxita em Paragominas-PA.....	17
2.1.3 Aplicação Industrial.....	19
2.1.4 Mineralogia.....	19
2.1.5 Beneficiamento.....	23
2.1.6 Aproveitamento do rejeito da bauxita para fabricação de compostos cimentícios.....	26
2.2 CIMENTO PORTLAND.....	28
2.2.1 Definição e histórico.....	28
2.2.2 Composição Química.....	29
2.2.3 Hidratação do Cimento.....	30
2.2.4 Classificação do Cimento Portland.....	31
2.3 INDÚSTRIA DO CIMENTO NO BRASIL.....	32
2.4 MATERIAIS POZOLANICOS.....	33
2.5 OS TIPOS DE ADIÇÕES MINERAIS.....	35
2.5.1 Adição Pozolânica.....	35
2.5.2 Adição Cimentante.....	37
2.5.3 Filler.....	38
2.6 ADIÇÕES MINERAIS EM CIMENTO PORTLAND.....	38
2.7 ARGAMASSA - UMA MISTURA HOMOGÊNEA.....	40

2.7.1 Dosagem.....	42
2.7.2 Propriedades no estado fresco.....	42
2.7.2.1 Aderência inicial.....	42
2.7.2.2 Índice de trabalhabilidade, consistência e plasticidade.....	43
2.7.2.3 Retenção de água.....	44
2.7.3 A argamassa e suas propriedades no estado endurecido.....	44
2.7.3.1 Retração de água por secagem.....	44
2.7.3.2 Resistência mecânica da argamassa.....	45
2.7.3.3 Permeabilidade.....	46
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	47
3.1 MATERIAIS.....	48
3.1.1 Resíduo de bauxita.....	48
3.1.2 Cimento.....	50
3.1.3 Areia normatizada.....	50
2.1.4 Aditivo.....	51
2.2 MÉTODOS.....	52
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	54
4.1 FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X.....	54
4.2 MASSA ESPECÍFICA.....	55
4.3 GRANULOMETRIA A LASER.....	56
4.4 DIFRAÇÃO DE RAIOS-X.....	58
4.5 ÍNDICE DE ATIVIDADE POZOLÂNICA COM CIMENTO E CAL.....	59
4.6 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	61
4.7 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE.....	62
4.8 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA.....	63
5 CONCLUSÃO.....	65
6 REFERÊNCIAS.....	66

Lista de Figuras

Figura 1 - Imagem do mineroduto de 244Km de extensão	18
Figura 2 - Perfil laterítico bauxítico de Paragominas	20
Figura 3 - Estrutura cristalina da gibbsita (A), boehmita (B) e diáspora (C).	23
Figura 4 - Fluxograma do processo de beneficiamento na Mina em Paragominas	25
Figura 5 - Fluxo hidratação do cimento Portland	31
Figura 6 - Adições minerais: Tipos	36
Figura 7 - Modelo microestrutural das argamassas	42
Figura 8 – Fluxograma da etapa laboratorial	48
Figura 9 - Barragem de rejeito de bauxita e aspecto final do subproduto formado	50
Figura 10 - Fluxograma e esquema do processo	50
Figura 11 - Distribuição granulométrica do resíduo de RB <i>in natura</i>	58
Figura 12 - Distribuição granulométrica do resíduo de RLLB 600 °C	58
Figura 13 - Distribuição granulométrica do resíduo de RLLB 700 °C	59
Figura 14 - Difratoograma de raios-X da amostra RB <i>in natura</i>	60
Figura 15 - Difratoograma de raios-X da amostra RLLB 600 °C	60
Figura 16 - Difratoograma de raios-X da amostra RLLB 700 °C	61
Figura 17 - Resultado do índice de atividade pozolânica com cimento	62
Figura 18 - Resultado do índice de atividade pozolânica com cal	63
Figura 19 - Evolução ao longo do tempo da resistência à compressão das argamassas produzidas	64
Figura 20 - Evolução ao longo do tempo da resistência à compressão das argamassas.	65
Figura 21 - (a) ARG-RB 600°C, (b) ARG-RB 700°C	66
Figura 22 - (a) ARG-RBIN, (b) ARG-REF	66

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Distribuição da produção de bauxita e localização por empresa em 2018	
Unidade: 1.000 t	17
Tabela 2 - Especificação de Parâmetros para Transporte de Polpa de Bauxita.....	19
Tabela 3 - Composição mineralógica de bauxita.....	22
Tabela 4 - Composição Mineralógica do Clínquer.....	31
Tabela 5 - Tipos de cimento Portland.....	33
Tabela 6 - Exigências químicas e físicas dos materiais pozolânicos.....	37
Tabela 7 - Nomenclatura utilizada para o resíduo	51
Tabela 8 - Nomenclatura utilizada para o resíduo	52
Tabela 9 - Requisitos físicos e químicos	52
Tabela 10 - Denominação das frações granulométricas	53
Tabela 11 - Nomenclaturas utilizadas para as argamassas	54
Tabela 12 – Quantidade de coro de prova do programa experimental.....	54
Tabela 13 - Resultados obtidos no ensaio de Fluorescência de raios-X.....	55
Tabela 14 - Resultados de FRX das amostras analisadas	56

1 INTRODUÇÃO

1.1 RELEVÂNCIA DO TEMA E JUSTIFICATIVA

Historicamente o setor da construção civil tem contribuído consideravelmente para o desenvolvimento econômico dos países. Todavia, a expansão deste seguimento traz consigo alguns problemas do ponto de vista da sustentabilidade, haja vista o grande consumo de matérias-primas naturais, bem como a geração de grandes volumes de resíduos sólidos, advindos das diversas etapas construtivas de uma obra.

Um dos insumos mais consumidos na construção civil é o cimento Portland, produto que serve de base para a execução de quase todos os processos construtivos de uma edificação, desde a fase de fundação até a fase de acabamento. Entretanto, a cadeia produtiva deste material também tem provocado impactos ambientais negativos devido, principalmente, a emissão de dióxido de carbono (CO₂) para a atmosfera, advindo da etapa de sinterização do clínquer (principal componente do cimento) (SILVA & PIKANÇO, 2022).

Neste sentido, diversos estudos têm sido desenvolvidos com o intuito de apontar uma solução sustentável para a produção do cimento. Por conseguinte, as adições minerais têm se apresentado como um produto com excelentes qualidades para este fim (PAUMGARTTEN, 2020). Dentre as opções disponíveis para a produção de adições minerais, estão os resíduos provenientes da indústria siderúrgica e de mineração. Santos (2011) afirma que empresas que atuam no setor do extrativismo mineral têm buscado investir em pesquisas que indiquem alternativas viáveis para o reaproveitamento dos subprodutos gerados em seus processos produtivos, de forma a propiciar maior eficiência ao sistema, bem como, maior economia nos custos inerentes a destinação final dos subprodutos gerados.

Neste contexto, o resíduo proveniente do beneficiamento da bauxita tem sido apontado como um excelente material para ser empregado na produção do clínquer, dadas as suas características físico-químicas como o alto teor de ferro, que favorece as reações no estado sólido, de forma a obter um composto a temperaturas mais baixas, acelerando as reações de clinquerização, com a formação de aluminatos e silicatos de ferro e cálcio, o que melhora a qualidade do cimento e produz uma significativa economia no processo (CUNHA JR *et al.*, 2022).

Segundo o Instituto Brasileiro de Mineração – IBRAM (2021), 98% da produção de bauxita no Brasil, é destinada às refinarias de alumina, enquanto o restante se dirige à indústria de produtos refratários e químicos. As maiores reservas desse minério, o equivalente a 95%, localizam-se no estado do Pará. Existem, espalhadas pelo planeta, 85 plantas de produção de alumina, com um rendimento em termos de geração de rejeito de bauxita de cerca de 1,2 t de resíduo/t de alumina produzida. Segundo Guo *et al.*, (2018), a geração anual de rejeito de bauxita equivale a 169 milhões de toneladas em todo o mundo, com cerca de 2,5 bilhões de toneladas armazenada.

Desta forma, torna-se essencial que haja alternativas para a realização da logística reversa deste subproduto, haja vista que os custos para a construção de barragens para o seu armazenamento são muito onerosos para empresa produtora, além do que, o armazenamento deste rejeito nestas estruturas pode representar um risco ambiental para as áreas de entorno.

Apesar de alguns autores já terem apontado que o resíduo de bauxita apresenta propriedades pozolânicas, após a calcinação em temperaturas de 600°C., (FORTES *et al.*, 2011; ROMANO, *et al.*, 2021, PAUMGARTTEN *et al.*, 2021). Atualmente, a grande parte dos estudos desenvolvidos está direcionada para o emprego deste material na produção de agregados sintéticos, existindo poucas pesquisas que têm se dedicado a avaliar o uso deste material para a produção de adições pozolânicas, empregadas no cimento Portland.

Portando, o presente trabalho visa contribuir para preencher a lacuna existente neste campo de pesquisa. Desta forma, o objetivo deste trabalho é avaliar a possibilidade de utilização do resíduo proveniente do beneficiamento da bauxita para a produção de adição pozolânica para cimento Portland.

1.2 OBJETIVOS

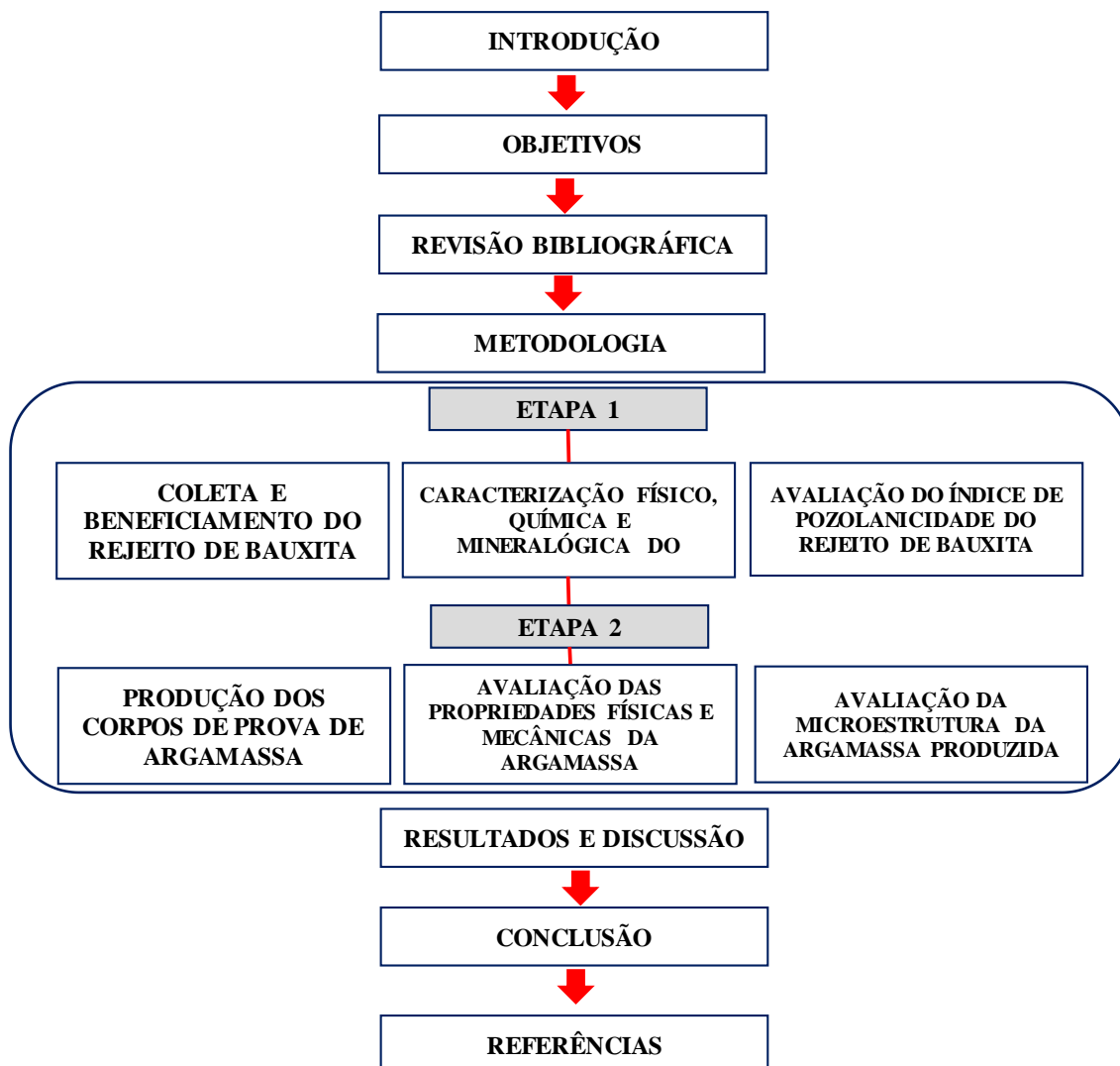
1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é analisar o uso do rejeito de bauxita (RB) como adição pozolânica do cimento Portland quando aplicado na produção de argamassa

1.2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar o rejeito proveniente da exploração de bauxita no município de Paragominas do ponto de vista químico, físico e mineralógico;
- Investigar e analisar o potencial pozolânico do rejeito de lama de lavagem de bauxita produzidas;
- Analisar os efeitos da incorporação do rejeito de lama de lavagem de bauxita (RLLB), em substituição ao cimento Portland em argamassas, no teor de 14%, avaliando os efeitos na resistência à compressão ao longo do tempo destes compósitos, conforme prescreve a NBR 13279 (ABNT, 2005);
- Determinar a absorção de água por capilaridade, através da ascensão capilar da argamassa conforme os procedimentos da NBR 9779 (ABNT, 2012).

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO



2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 BAUXITA

2.1.1 Bauxita no Brasil

Segundo Brito *et al.*, (2020), a bauxita foi descoberta em 1821 por Berthier, na localidade de LesBaux, no sul da França. Trata-se de um produto do intemperismo e lixiviação de uma gama variável de rochas, ocorrendo geralmente em clima tropical ou subtropical, caracterizados por taxas de precipitação pluviométrica elevada.

Em relação aos aspectos físicos, a coloração da bauxita é determinada pela proporção dos óxidos de ferro presentes em sua composição química. Dessa forma, a bauxita branca contém de 2 a 4% de óxido de ferro, ao passo que na bauxita vermelha essa proporção atinge 25% (SAMPAIO *et al.*, 2008).

As reservas mundiais de bauxita somaram 27,8 bilhões de toneladas, apresentando um pequeno decréscimo em relação ao ano de 2015. As principais reservas localizam-se na Guiné e Austrália, com 7,4 bilhões e 6,2 bilhões de toneladas, respectivamente. O Brasil, registra o terceiro lugar neste ranking, com 2,6 bilhões de toneladas seguido da Jamaica com 2,0 bilhões de toneladas (USGS- United States Geological Survey, 2017).

Aproximadamente 98% da bauxita produzida no Brasil é utilizada para a fabricação de alumina, enquanto o restante é destinado as indústrias de refratários e de produtos químicos. As reservas de bauxita no Brasil são tipicamente de origem supergênica, onde a gibbsita, rica em alumina aproveitável, aparece na forma de nódulos envoltos por uma matriz argilosa. As usinas de beneficiamento usualmente produzem um só produto, onde a fração mais grossa do minério é aproveitada e a fração fina é descartada como rejeito (BRITO *et al.*, 2020).

As principais empresas de mineração atuantes na exploração de bauxita no Brasil, bem como suas produções são apresentadas na Tabela 1, a seguir:

Tabela 1 - Distribuição da produção de bauxita e localização por empresa em 2018
Unidade: 1.000 t

Empresa/UF	Produção	(%)
■ Alcoa Alumínio S.A.	7.164,4	18,29
● Poços de Caldas (MG)	609,0	1,55
● Juruti (PA)	6.555,4	16,74
■ Companhia Brasileira de Alumínio.	2.074,5	5,30
● Mirai, Itamarati de Minas e Poços de Caldas (MG)		
■ MRN–Mineração Rio do Norte S.A.	14.456,6	36,91
● Oriximiná, Faro e Terra Santa (PA)		
■ Norsk Hydro Brasil Ltda.	6.214,4	15,86
● Mineração Paragominas S.A. (Paragominas PA)		
■ Outros	2.097,0	5,35

Fonte: Associação Brasileira do Alumínio – ABAL (2020)

2.1.2 Bauxita em Paragominas-PA

A Companhia Norueguesa *Norsk Hydro*, controla a mineração Paragominas S/A (MPSA), e foi pioneira no bombeamento de polpa de minério de bauxita. A MPSA compreende 3 atividades: a lavra, o beneficiamento e o transporte da polpa de bauxita através de mineroduto para refinaria de alumina localizada no município de Barcarena/PA (MARTINS, 2020).

A operação da mineração teve início em março de 2007 e está localizada a 64 Km do centro urbano da cidade de Paragominas, no nordeste do estado do Pará. Atualmente movimenta cerca de 16 milhões de toneladas de minério por ano, produzindo anualmente 11,4 milhões de toneladas de bauxita, que é transportada por um mineroduto (HYDRO, 2020).

A Hydro é proprietária de 67,9% da Mineração Paragominas, os outros 32,1% são de propriedade da companhia brasileira Vale. Parte da bauxita é processada na própria fábrica, mas uma determinada quantia é vendida para outra empresa. Paragominas é a terceira maior mina de bauxita no mundo, com capacidade de produção de 9,9 milhões de toneladas anuais (HYDRO, 2020).

A bauxita lavada de Paragominas possui teor médio de aproximadamente 48% de alumina aproveitável, 4% de sílica reativa, granulometria abaixo de 0,212 mm e perda ao fogo de 12 a 13%. Esta mina utiliza o método *strip mining* de extração, sendo que seu ROM é processado na usina de beneficiamento, por meio das etapas de britagem, moagem SAG (moagem semi-autógena), deslamagem, seguida de moagem em moinhos de bolas (AVELAR, 2011).

Ainda de acordo com o autor citado acima, na forma de poupa, com 50 % de sólidos, a bauxita é transportada no mineroduto com 244 km de extensão até a Alunorte, localizado no município de Barcarena-PA, onde é feito o refino da bauxita, transformando-a em alumina, a matéria-prima do alumínio.

Figura 1 - Imagem do mineroduto de 244Km de extensão



Fonte: Disponível em: <[http:// www.hydro.com.br/mineração-paragominas](http://www.hydro.com.br/mineração-paragominas)>. Acesso em: 12/12/2022

A tubulação do mineroduto é de aço API - 5L-X70, possui diâmetro externo de 60,96 centímetros polegadas e encontra-se enterrada e atravessando sete municípios: Paragominas, Ipixuna do Pará, Tomé-Açu, Acará, Moju, Abaetetuba e Barcarena. A granulometria, teor de sólidos, velocidade de sedimentação, viscosidade e pH, são parâmetros da polpa de bauxita, cruciais para o transporte eficaz e seguro através de mineroduto. Na Tabela 2 têm-se as especificações dos parâmetros necessários para um transporte seguro da polpa por mineroduto.

Tabela 2 - Especificação de Parâmetros para Transporte de Polpa de Bauxita

Parâmetros	Especificação para transporte
Viscosidade Aparente (mPa.s)	7,0 – 15,0
Tensão limite de escoamento (Pa)	1,0 – 9,0
Ph	6,8 – 7,9
Sólido seco (%)	47 - 52
Massa específica (g/cm ³)	1,41 – 1,44
Velocidade de sedimentação (cm/h)	6,54 – 22,02
Granulometria (% passante acumulado)	100% em 48#
	87,11 em 65#
	40 – 47% em 325#
	19 – 25% em 10µm
	12 – 17% em 5µm

Fonte: Brum, (2011)

2.1.3 Aplicação Industrial

No que se refere a aplicação industrial da bauxita, é sabido que os Persas e os Egípcios, há mais de oito mil anos, produziam vasos com um tipo de barro contendo óxido de alumínio, cosmético e remédios contendo alumina (ABAL, 2020). Apesar de ser um metal abundante no planeta o alumínio não é encontrado puro na natureza.

A bauxita é a matéria prima utilizada para a sintetização da alumina, por meio do beneficiamento descrito como processo *Bayer*, onde inicialmente, é gerado o hidróxido de alumínio, que após passar por calcinações e novas reações com ácidos e bases, se transforma no óxido de alumínio industrial, com pureza próxima a 99,9%. A alumina é empregada na produção do metal alumínio, o qual é utilizado para a fabricação de aviões, carros, latas de cerveja, painéis (MARTINS, 2020).

O alumínio metálico apresenta características como resistência a corrosão, baixa densidade em relação ao aço, além de ser excelente condutor elétrico e de calor. No Brasil sua utilização encontra-se distribuída nos setores de embalagens (32,1%), transportes (18,6%), construção civil (15,3%), indústria de eletricidade (12,3%), bens de consumo (8,1%), máquinas e equipamentos (3,3%), outros (10,3%) (ABAL, 2020).

2.1.4 Mineralogia

Segundo Rosário (2013), o nome bauxita é dado à espécie mineralógica de composição $Al_2O_3 \cdot 2H_2O$, que nunca foi encontrada na natureza como mineral, e bauxito, à rocha residual, constituída essencialmente por um ou vários dos hidróxidos de alumínio, diásporo, gibsite ou hidrargilita e bohemita, podendo também conter argilo-minerais, hidróxido de ferro e quartzo.

Ainda de acordo com este autor, a rocha que determina a mineralogia da bauxita, o seu tamanho e forma dos cristais, é encontrada logo abaixo do perfil laterítico bauxítico é conhecida como rocha-mãe, podendo ser granito, basalto, dolorito e gabro. Os minérios de Paragominas, como os demais da bacia Amazonas, se formaram por alteração laterítica de rochas siliclásticas. O perfil laterítico, ilustrado na Figura 2 apresenta a estrutura em camadas rica em ferro e alumínio, evidenciando o contorno irregular em branco de Bauxita Nodular (BN), Laterita Ferruginosa (LF), Bauxita Cristalizada (BC), Bauxita Amorfa (BA) e Argila Variegada (ARV) e suas espessuras média.

Figura 2 - Perfil laterítico bauxítico de Paragominas

PARAGOMINAS		PERFIL GEOLÓGICO TÍPICO		
Camadas		ESPESSURA EM METROS		CLASSIFICAÇÃO
		MÉDIA	VARIAÇÃO	
BN/BNC	Bauxita Nodular	1,3	0 – 2,1	MINÉRIO SECUNDÁRIO
LF	Laterita Ferruginosa	0,6	0 – 4,0	ESTÉRIL
BC	Bauxita Cristalizada	2,0	0 – 4,5	MINÉRIO PRINCIPAL
BCBA	Bauxita Cristalizada Bauxita Amorfa	1,0	0,25	MINÉRIO SECUNDÁRIO
BA	Bauxita Amorfa	0,4		ESTÉRIL
ARV	Argila Variegada			ESTÉRIL

Fonte: Relatório Interno Vale, (2007)

Segundo Martins (2020), o clima tropical, alternando as estações seca e úmida, que favorecem o processo natural de lixiviação, são condições essenciais à formação da bauxita. As bauxitas que apresentam maior valor comercial, são as geologicamente mais novas, pois podem ser refinadas a temperaturas mais baixas em relação as outras.

De acordo com sua origem, os minerais presentes na bauxita podem ser agrupados em dois grupos, de acordo com sua origem: minerais residuais, que são herdados de rocha-mãe e, minerais precipitados ou neoformados, durante a laterização, que é o processo no qual o solo acumula grande quantidade de óxidos hidratados de ferro ou alumínio (AVELAR, 2011).

A gibbsita, boehmita e o diásporo são os minerais mais importantes contidos nas bauxitas, cujas principais impurezas são: caulinita, quartzo, hematita, goethita, rutilo e anatásio. A diferença principal entre bohemita e diásparo, em relação à gibbsita, está na estrutura cristalina (MARTINS, 2019). A Tabela 3 mostra os principais minerais, encontrado na bauxita, sendo a composição entre minerais majoritários e minerais de ganga (que não é economicamente viável) e elementos traços que se encontram em uma concentração menor que 100 $\mu\text{g g}^{-1}$ no ambiente.

Tabela 3 - Composição mineralógica de bauxita

	Mineral	Composição Química
Majoritários	Gibbsida	Al (OH) ₃
	Boehmita	AlO (OH)
	Diásporo	AlO (OH)
	Quartzo	SiO ₂
	Caulinita	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄
	Hematita	Fe ₂ O ₃
	Goehtita	FeO (OH)
	Anatásio	TiO ₂
	Rutilo	TiO ₂
Minerais de Ganga		Matéria Orgânica
	Wavelita	Al ₃ (PO ₄) ₂ (OH) ₃ .5H ₂ O
	Crandalita	CaAl ₃ (PO ₄) (PO ₃ OH)(OH) ₆
	Calcita	CaCO ₃
	Ilita	KAl ₂ (Si ₃ AlO ₁₀) (OH) ₆
	Litioforita	(Al,Li)MnO ₂ (OH) ₂
	Magnesita	MgCO ₃
	Dolomita	CaMg (CO ₃) ₂
	Dawsonita	NaAlCO ₃ (OH) ₂
	Celestita	SrSO ₄
	Woodhouseita	CaAl ₃ (PO ₄) (SO ₄)(OH) ₆
	Pirita	FeS ₂
	Gahnita	ZnAl ₂ O ₄
	Cromita	FCr ₂ O ₄
	Schubnelita	Fe ₂ (V ₂ O ₈).2H ₂ O
	Zircão	ZrSiO ₄
Elementos Traços	-	F, S, Hg

Fonte: Avelar, (2011)

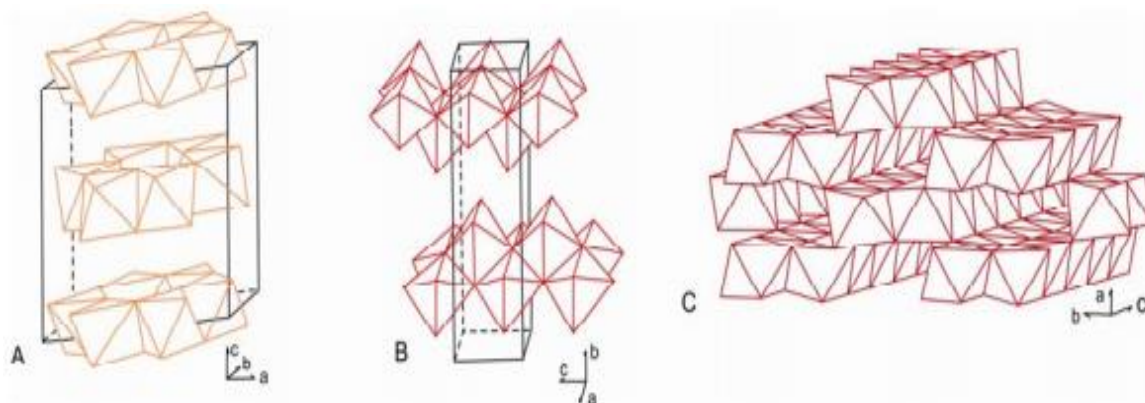
A mineralogia da bauxita afeta o processo de beneficiamento, se a bauxita contém predominantemente, gibbsita e baixos teores de boehmita, a dissolução em hidróxido de sódio é feita em temperatura próxima de 150° C. Entretanto, a boehmita é muito mais resistente à dissolução, não sendo afetada no processo a baixa temperatura, requerendo uma temperatura de 250° C para sua dissolução (MARTINS, 2020). Portanto, a quantificação das fases mineralógicas é parte crucial no processo de caracterização tecnológica dos minérios, contribuindo de diversas formas para a determinação da rota a ser seguida no beneficiamento, tanto dos rejeitos como dos concentrados.

Os tamanhos dos cristais de gibbsita na bauxita também podem variar de um depósito para outro. Por exemplo, a gibbsita ocorre como uma mistura de agregados

fracamente comprimidos e em prisma na bauxita da Guiana, ou como prismas hexagonais alongados na bauxita Australiana, ou como agregados de prisma entrelaçados em Trombetas-PA (AVELAR, 2011).

A gibbsita é o verdadeiro hidróxido de alumínio enquanto a boehmita e o diásporo são ambos óxidos hidróxido de alumínio. As principais diferenças entre eles estão na sua estrutura cristalina. A gibbsita possui a forma tri-hidratada e a boehmita e a diásporo são mono-hidratada (SANTOS, 2011). A estrutura cristalina da bauxita está representada na Figura 3, a seguir.

Figura 3 - Estrutura cristalina da gibbsita (A), boehmita (B) e diásporo (C).



Fonte: Santos, (2011)

Hematita e Goethita são os principais minerais de ferro em bauxitas tropicais e pouco solúveis nas condições da digestão em temperaturas baixas. O quartzo, minerais de ferro (hematita e goethita), e minerais de titânio (Anastásio e rutilo) são considerados inertes na digestão a baixa temperatura (100 -150° C). Em digestão a alta temperatura (235- 260° C) espera-se que todas as fases sejam atacadas em diferentes proporções pela cáustica, com exceção do rutilo e da hematita (MARTINS, 2020).

2.1.5 Beneficiamento

O beneficiamento de minérios consiste em um conjunto de operações aplicadas aos bens minerais que visam modificar a granulometria, a concentração relativa das espécies minerais presente sem modificar a identidade química dos minerais (LINS, 2010).

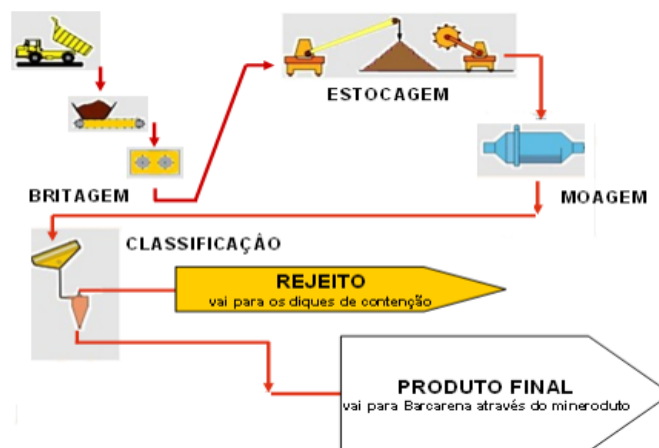
Minério é toda rocha constituída de um mineral ou agregado de minerais contendo um ou mais minerais valiosos, aproveitáveis economicamente. Para um minério ser concentrado, é necessário que os minerais estejam fisicamente liberados. Isto implica que uma partícula deve apresentar, idealmente, uma única espécie mineralógica. O termo concentração significa, geralmente, remover a maior parte da ganga (minerais não aproveitados), presente em grande proporção no minério no caso a bauxita (LINS, 2010).

Após o processo de lavra, que corresponde a retirada da vegetação, decapeamento ou a retirada das camadas de solo que cobre e a extração da rocha, a bauxita é introduzida em um circuito de beneficiamento.

O início do processo *Bayer* (refinamento), inicialmente passa por processo de cominuição (britagem/moagem). A britagem é responsável, entre outras coisas, pelo tamanho e pela forma dos fragmentos da bauxita. O processo de britador de rolos dentados, passa por dois processos o primário e o secundário, o primeiro brita os blocos de bauxita que vem da mina com tamanho aproximadamente de 1200 mm a 300 mm, no segundo estágio de britagem reduz a uma faixa de 200 – 150 mm. O minério britado é conduzido, por um transportado de correia de 106,68 cm de largura, a uma pilha de estocagem com capacidade de 2800 t/h que empilha a bauxita britada. Após isso, o material é direcionado à moagem (CUNHA JR, 2023).

Ainda de acordo com o autor, a moagem é a chamada fragmentação fina, que representa o último estágio da redução granulométrica na cominuição da bauxita. Aqui as partículas são reduzidas pela combinação de impactos, compressão, abrasão e atrito, a um tamanho adequado à liberação do minério. A bauxita britada retomada e transportada para um silo para alimentar um moinho de vazão de alimentação nominal de 754 t/h. O fluxograma do processo de beneficiamento utilizado na Mina de Bauxita em Paragominas é apresentado na Figura 4.

Figura 4 - Fluxograma do processo de beneficiamento na Mina em Paragominas



Fonte: Pimentel (2013)

A bauxita bruta retirada e fragmentada em britadores e logo em seguida a estocagem. O minério passa pelo processo de moagem, para a retirada da argila, em seguida classificado em peneira, onde é separado em rejeito e produto final.

As operações de fragmentações e classificação granulométrica, etapas do beneficiamento da bauxita de Paragominas tem como objetivo o transporte via mineroduto da polpa da bauxita.

Segundo Miura (2016), a bauxita para alimentar a refinaria de alumina localizada no município de Barcarena precisa apresentar algumas especificações:

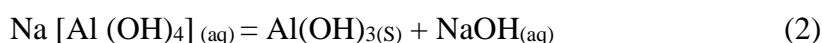
- Bauxita gibbsítica;
- Teor de alumínio aproveitável > 48%
- Teor de sílica reativa < 3%;
- Teor insignificante de contaminantes químicos;
- Extração de 100% da alumina aproveitável;
- Dessilicificação em aproximadamente 60 minutos a 145 – 155° C;
- Taxa de sedimentação da lama maior que 8 m/h;
- Compactação da lama maior que 35% sólidos.

Após o processo de cominuição, inicia o processo *Bayer*, a polpa da bauxita na refinaria será misturada a uma solução de soda cáustica (NaOH), a qual reage com a gibbsita ($\text{Al}(\text{OH})_{3(\text{S})}$), sob pressão, a uma temperatura de 140 a 160° C, nesta condição a bauxita dissolve-se, formando o aluminato de sódio $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]$ (CUNHA JR, 2023). A Equação 1 descreve a dissolução.

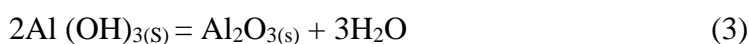


Finalizando a etapa da digestão, as impurezas permanecem na fase sólida, chamada de lama vermelha. Para separar o rejeito da fase líquida realiza-se a etapa de espessamento, que consiste em um processo de decantação com o objetivo de adensar as partículas sólidas, separando a fase líquida da fase sólida. Um dos fatores que influencia a velocidade de sedimentação é a relação 37 goethita/hematita, quanto maior a quantidade de hematita presente no sistema maior a velocidade (NAGEM, 2013).

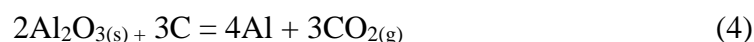
Na fase seguinte da filtração, o licor rico em aluminato de sódio, passa para uma etapa em que é removido o material particulado mais fino, extinguindo-se as impurezas. Na precipitação, a solução de aluminato de sódio na fase líquida $\text{Na}[\text{Al}(\text{OH})_4]_{(\text{aq})}$, já livre do da lama vermelha, sofre uma redução na temperatura e é feita uma adição de cristais de alumina para estimular a precipitação, formando os cristais de hidróxido de alumínio ($\text{Al}(\text{OH})_{3(\text{S})}$) e liberando a soda (NaOH) novamente, Equação 2 (NAGEM, 2013).



Como produto da precipitação tem-se o hidróxido de alumínio ($\text{Al}(\text{OH})_3$) cristalizado e enviado para a etapa de calcinação, enquanto uma quantidade de aluminato de sódio (NaOAl_2O_3) na fase líquida, com soda cáustica retorna para a digestão. A calcinação conhecida como a etapa de desidratação do hidróxido de alumínio ($2\text{Al}(\text{OH})_3$), este material passa por um forno a uma temperatura 1000° C para a transformação da alumina (Al_2O_3), cristais de alumina puros, de aspecto arenoso e branco conforme a Equação 3 (NAGEM, 2013).



Através da redução eletrolítica da alumina, obtém-se o alumínio primário, O método eletrolítico comercialmente utilizado é conhecido como processo *Hall-Héroul*. A corrente elétrica quebra as moléculas de alumina ($2\text{Al}_2\text{O}_3$) para formar o alumínio. A Equação 4 representa o processo global de redução do alumínio em carbono (C), Alumínio (Al) e Dióxido de Carbono (CO_2) (NAGEM, 2013).



São necessárias cerca de quatro toneladas de bauxita para produzir duas toneladas de alumina e duas toneladas de alumina para produzir uma tonelada de alumínio (CUNHA JR, 2023). Portanto uma mineração de bauxita pode envolver dois tipos distintos de rejeitos: o resíduo direto da deslamagem para simples liberação de frações argilosas incorporadas (processo aplicado pela MPSA) e a lama vermelha, resíduo da indústria de beneficiamento do alumínio, que é gerada a partir do refino da bauxita para produção de alumina (Al_2O_3) por meio do processo *Bayer* (processo aplicado pela Alunorte).

2.1.6 Aproveitamento do rejeito da bauxita para fabricação de compostos cimentícios

Segundo o art. 20, inciso I da Lei Federal nº 12305/2010 - Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) - as barragens de rejeitos devem ser vistas como alternativas provisórias para armazenamento e não como uma solução ambiental final para os resíduos sólidos gerados na mineração. A disposição final de resíduos no meio ambiente deve ser empregada somente como último recurso. Cavalcante *et al.*, (2012), em sua pesquisa sobre resíduos sólidos da atividade de mineração, previu que a produção total de rejeito de alumínio para o período de 2010 – 2030 será de 493.925 milhões de toneladas.

Racanelli *et al.*, (2019), estudou a fabricação de ligantes geopolímeros com o uso de rejeito de lavagem de bauxita, e constatou que a resistência mecânica do material criado se equiparou a do cimento Portland CP-II-E-32, para o rejeito que foi calcinado a uma temperatura de $700\text{ }^{\circ}\text{C}$. Por meio da microscopia eletrônica de varredura foi verificado que o compósito criado se tratava de um material compacto e com pouca região de trinca.

Santiago (2018) analisou a viabilidade de utilizar rejeito de lama de lavagem de bauxita (RLLB), como matéria prima para produção de argamassa de revestimento e assentamento de alvenarias, com o objetivo de reduzir os passivos ambientais existentes em barragem de rejeito minerais. O autor produziu argamassas em diferentes proporções, utilizando o traço 1:3, com substituição de cimento por rejeito, nas frações de 5%, 10%, 20% e 30%. Os resultados dos ensaios mecânicos demonstraram que ocorreu um aumento na resistência à compressão dos corpos de prova, proporcional ao aumento da quantidade de rejeito introduzida na mistura, sendo que, a substituição de 30% do cimento por rejeito de lama de lavagem de bauxita apresentou uma resistência satisfatória, de acordo com a NBR 13749 (ABNT, 2013), demonstrando a viabilidade para a utilização em obras de engenharia.

Paumgarten *et al.*, (2021), estudaram o potencial pozolânico do rejeito de bauxita para a produção de adição mineral para o cimento Portland. A partir dos resultados de caracterização físico-química e mineralógica do rejeito, foi verificado que quando submetido a uma calcinação de 600 °C, este subproduto apresenta propriedades semelhantes às do cimento Portland e outros tipos de pozolâneas comerciais. A difratometria de raios-X dos materiais apresentou resultados de um tênue halo amorfo, tendo a lama vermelha picos de cancrenita, gibsita, goetita, hematita, anastásio, quartzo e calcita. Na determinação do índice de atividade pozolânica com cal e cimento Portland, a lama vermelha apresentou comportamento abaixo do requerido nos dois ensaios normatizados, mesmo alcançando resultados bem próximos aos prescritos em norma.

Martins (2019), avaliou o uso de um rejeito constituído pela mistura exaurida proveniente da fabricação do magnésio metálico, e da lama vermelha, rejeito proveniente do refino da bauxita, ambos em sua forma *in natura*, em substituição ao cimento Portland no percentual de 25%, para a produção de argamassa colante. Os resultados apontaram que a granulometria fina dos rejeitos (inferior a 45 µm) e menor absorção de água pelo compósito com substituição indicam efeito filer do material em estudo. Os ensaios Luxan e Chapelle mostraram que os subprodutos possuem atividade pozolânica. Os ensaios mecânicos foram favoráveis, apresentando resultados de resistência à compressão maiores que o estabelecido em norma NBR 16697 (ABNT, 2018).

2.2 CIMENTO PORTLAND

2.2.1 Definição e histórico

A grande variabilidade de aplicações do cimento Portland explica seu grande consumo em âmbito mundial. Os babilônios e assírios se utilizavam de argilas para construção de moradia. Os egípcios introduziram argamassa de gesso na construção de pirâmides. Adiante, os romanos melhoraram esses materiais produzindo um cimento durável, acrescentando cinzas vulcânicas (NEVILLE, 2016).

O nome cimento Portland é atribuído a um calcário extraído em *Dorset* devido à semelhança em cor e o estado endurecido com a pedra de Portland. No sentido geral da palavra, pode ser descrito como um material com propriedades adesivas e coesivas que o fazem capaz de unir fragmentos minerais na forma de uma unidade compacta (NEVILLE, 2016).

Ainda de acordo com o referido autor, *John Smeaton*, encarregado, em 1756, da reconstrução do farol de *Eddystone*, descobriu que ocorria um melhoramento no desempenho da argamassa, cuja composição era obtida adicionando-se pozolana com elevado teor de material argiloso ao calcário.

Callister (2014), define o cimento Portland como o produto resultante da moagem e mistura íntima de argila e minerais que contêm cal nas proporções adequadas, que depois de aquecidas a uma temperatura de aproximadamente de 1400° C, formam o “Cliquer” no qual é adicionando gesso para retardar o processo de pega do cimento.

Segundo a NBR 16697 (ABNT, 2018), o cimento Portland é definido como um aglomerante hidráulico, obtido pela moagem de clínquer, ao qual se adiciona, durante a fabricação, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio, além de adição minerais, nos teores estabelecidos pela norma.

2.2.2 Composição Química

O cimento Portland, conforme citado anteriormente, é constituído de clínquer, um material sintetizado, resultante da calcinação, a uma temperatura de aproximadamente 1450°C de uma mistura de calcário, argila e eventuais corretivos químicos de natureza silicosa, aluminosa ou ferrífera dentro dos limites especificados em norma (CUNHA JR, 2023).

Segundo Cunha (2022), os principais componentes químicos do cimento Portland são: Cal (CaO), Sílica (SiO_2), Alumina (Al_2O_3), óxido de Ferro (Fe_2O_3), Magnésio (MgO), álcalis (Na_2O e K_2O) e sulfatos (SO_3). Esses componentes integram entre si, no interior do forno, e formam uma série de produtos mais complexos, para posterior produção dos silicatos e aluminatos.

Para Neville (2016), o cimento Portland é constituído basicamente dos seguintes compostos mineralógicos: Silicato tricálcico (C_3S), Silicato dicálcico (C_2S), Aluminato tricálcico (C_3A) e Ferroaluminato tetracálcico (C_4AF). O silicato tricálcico (C_3S), presente em maior quantidade, denominado de alita, é o principal constituinte do clínquer e desempenha um importante papel no endurecimento e na resistência mecânica do cimento nas primeiras idades, pois reage rapidamente com a água, provocando uma imediata liberação de calor e elevada resistência inicial. Por outro lado, a quantidade de calor desprendida pelo C_3S é bem inferior ao C_3A , cuja hidratação tem início poucas horas a partir do contato com a água.

O silicato dicálcico (C_2S), a belita, constitui de 15 a 30% do clínquer de cimento Portland. O silicato dicálcico reage lentamente com a água, desprendendo menos calor ao hidratar-se quando comparado ao C_3S , devido aos vazios intersticiais formados que são muito menores que os da alita e isto torna a belita muito menos reativa que a alita (METHA & MONTEIRO, 2008).

O Aluminato tricálcico (C_3A), geralmente apresentam maior percentual em cimento de alta resistência inicial, de modo que o tempo decorrido entre o início e o fim da pega do cimento é de poucas horas. A reação de formação dos componentes ocorre a cerca de 1300° C. O ferro aluminato tetracálcico (C_4AF), também chamado de ferrita, constitui a fase intersticial do clínquer, juntamente com a celita (CUNHA, 2022). Na Tabela 4 é apresentada a composição mineralógica do clínquer.

Tabela 4 - Composição Mineralógica do Clínquer

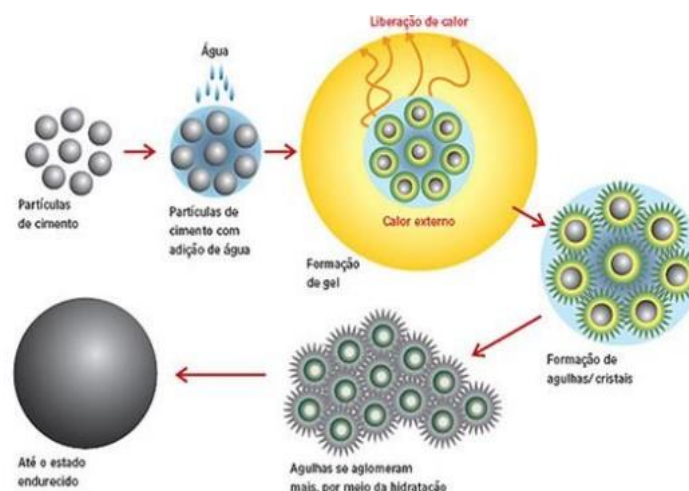
Compostos	Fórmula Clássica	Sigla	Clínquer (%)	Propriedades específicas
Silicato Tricálcico (Alita)	$3\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C_3S	50 – 60	Endurecimento rápido Alto calor de hidratação Alta resistência inicial
Silicato Dicálcico (Belita)	$2\text{CaO}.\text{SiO}_2$	C_2S	15 – 25	Endurecimento lento Baixo calor de hidratação Baixa resistência inicial
Aluminato Tricálcico (Celita)	$3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	6 – 10	Pega muito rápida e deve ser controlado com adição de gesso Susceptível ao ataque de meios sulfatados, alto calor de hidratação, alta retração, baixa resistência final
Ferro aluminato tetracálcico	$4\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.\text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF	3 – 8	Endurecimento lento, resistentes a meios sulfatados, não tem contribuição para resistência, cor escura
Cal Livre	CaO	C	0,5 – 1,5	Em maiores quantidades causam aumento de volume e fissura

Fonte: Rezende (2016)

2.2.3 Hidratação do Cimento

Segundo Christ, Tutikian e Helene (2022), os silicatos e os aluminatos presente no clínquer do cimento Portland têm a característica de reagir quimicamente sob a ação de água, conforme ilustrado na Figura 5, formando produtos de hidratação que com o passar do tempo adquirem elevada resistência.

Figura 5 - Fluxo hidratação do cimento Portland



Fonte: Laguna & Ikematsu, (2009).

Conforme explicam Christ, Tutikian e Helene (2022), a reação do cimento com a água é um processo exotérmico que gera a liberação do calor de hidratação. Um dos fatores que mais afetam a resistência dos produtos cimentícios é a temperatura presente na reação de hidratação do cimento Portland.

A hidratação dos aluminatos (aluminato tricálcico C3A e ferroaluminato tetracálcico C4AF) na presença do gesso, resulta na formação de etringitas, que assumem forma de agulhas, minutos após o início da hidratação, sendo estas responsáveis pelo fenômeno da pega (AZEVEDO, 2015).

A hidratação dos silicatos se dá algumas horas após o início da hidratação do cimento. A hidratação do silicato tricálcico C3S e silicato dicálcico C2S origina silicatos de cálcio hidratados que possuem composição química muito variada, sendo representados genericamente por C-S-H e hidróxido de cálcio – $\text{Ca}(\text{OH})_2$, compostos que preenchem o espaço ocupado previamente pela água e pelas partículas de cimento em dissolução (TOKUDOME, 2008).

2.2.4 Classificação do Cimento Portland

O tipo e o teor das adições minerais incorporadas ao cimento, ainda em sua fase de moagem, permitem compor os diferentes tipos de cimento disponíveis no mercado atualmente. Essas adições são: escória de alto-forno, materiais pozolânicos e materiais carbonáticos (CUNHA, 2022).

Cincotto (2011), explica que o cimento Portland comum é um material formado por clínquer e de sulfato de cálcio, enquanto os cimentos Portland compostos são constituídos pela adição ou substituição do clínquer por fíler calcário e materiais pozolânicos como: cinza volante, sílica ativa, argila calcinada e escória de alto-forno. A Tabela 5 apresenta os tipos de cimento Portland, adições, siglas e classe de resistência definidos pela NBR 16697 (ABNT, 2018).

Tabela 5 - Tipos de cimento Portland

Designação Normalizada	Sigla	Classe de Resistência	Sufixo	Clinker + Sulfatos de Cálcio	Escória Granulada de alto forno	Material pozzolânico	Material carbonático
Cimento Portland Comum	CP I	25,32 ou 40	RS ou BC	95 - 100	0 - 5		
	CP I-S			90 - 94	0	0	6 - 10
Cimento Portland Composto com escoria granulada de alto forno	CP II-E			51 - 94	6 - 34	0	0 - 15
Cimento Portland Composto com material pozzolânico	CP II-P			71 - 94	0	6 - 10	11 - 25
Cimento Portland Composto com material carbonático	CP II-F			75 - 89	0	0	0 - 10
Cimento Portland de alto forno	CP III			25 - 65	35 - 75	0	0 - 10
Cimento Portland pozzolânico	CP IV			45 - 85	0	15 - 50	0 - 10
Cimento Portland de alta resistência inicial	CP V	ARI		90 - 100	0	0	0 - 10
Cimento Portland Branco	Estrutural	CPB		75 - 100	-	-	0 - 25
	Não Estrutural	-	-	50 - 74	-	-	26 - 50

Fonte: NBR 16697 (ABNT, 2018)

2.3 INDÚSTRIA DO CIMENTO NO BRASIL

A indústria Brasileira de cimento desempenha um papel importante no cenário nacional. A produção de cimento está presente em quase todas as unidades da federação, destacando-se pelos avanços de automatização do processo e da busca da redução do consumo de energia térmica e elétrica (PBQP, 2020).

A autoconstrução, reformas ainda em alta no Brasil e a continuidade de obras do setor imobiliário são as principais razões de demanda do produto, com crescimento em junho de 1,7% comparado com o mesmo mês de 2020, atingindo 5,5 milhões de toneladas (ABCP, 2021). A produção de cimento está associada a elevados níveis de emissão de CO₂, responsável por até 8%, posicionando a indústria cimenteira como uma das principais fontes antropogênicas de lançamento de gases de efeito estufa (FARFAN; FASIHI; BREYER, 2019).

A indústria do cimento brasileira, nesse sentido, sempre caminhou lado a lado com a sustentabilidade, inovando e investindo, historicamente, em medidas que diminuam os impactos ambientais das operações, na busca por soluções para reduzir ainda mais a incidência de carbono. A indústria nacional apresenta metas para o futuro: elevar o uso de adições e substitutos de clínquer de 32% para 48%, reduzir em 33% a pegada de carbono até 2050 e substituir o uso de combustíveis fósseis por alternativos (ABCP, 2021).

2.4 MATERIAIS POZOLANICOS

O reaproveitamento, de resíduos industriais é uma tendência que vem se estabelecendo a nível nacional. O déficit habitacional bastante elevado no país, e o alto custo dos materiais tradicionais para construção, contribuem para o desenvolvimento de materiais alternativos de desempenho similar aos convencionais ou de desempenho compatível ao seu uso, com custo inferior e com a vantagem de dar uma destinação ambientalmente adequada aos resíduos (VASKE, 2012).

A NBR 12653 (ABNT, 2014) define materiais pozolânicos como aqueles que são silicosos ou silico-aluminosos e ao serem divididos e misturados a água, reagem com o hidróxido de cálcio, formando compostos com propriedades aglomerantes. Segundo Mehta e Monteiro (2014), a reação do hidróxido de cálcio e a pozolana tem como consequência a interferência do retardo da reação, assim ocorre também o retardo da taxa de liberação de calor e os produtos da reação são muito eficientes para preencher espaços capilares, tendo como consequência a melhoria da resistência e impermeabilidade.

De acordo Christ, Tutikian e Helene (2022), entre os motivos para a utilização de adições minerais, provenientes de resíduos industriais, no cimento Portland, estão a alta taxa de emissão de dióxido de carbono, proveniente da produção do clínquer, elevado dispêndio de energia para a sinterização do cimento, diminuição das matérias primas naturais disponíveis na natureza, e o aumento do custo final do produto, decorrentes destes fatores.

Os números espantosos, de bilhões de toneladas de cimento Portland que são produzidos no planeta, ano após ano, com o intuito de suprir o benefício da diminuição de CO₂ emitido, procuram explicar através de estudos científicos, propondo novas

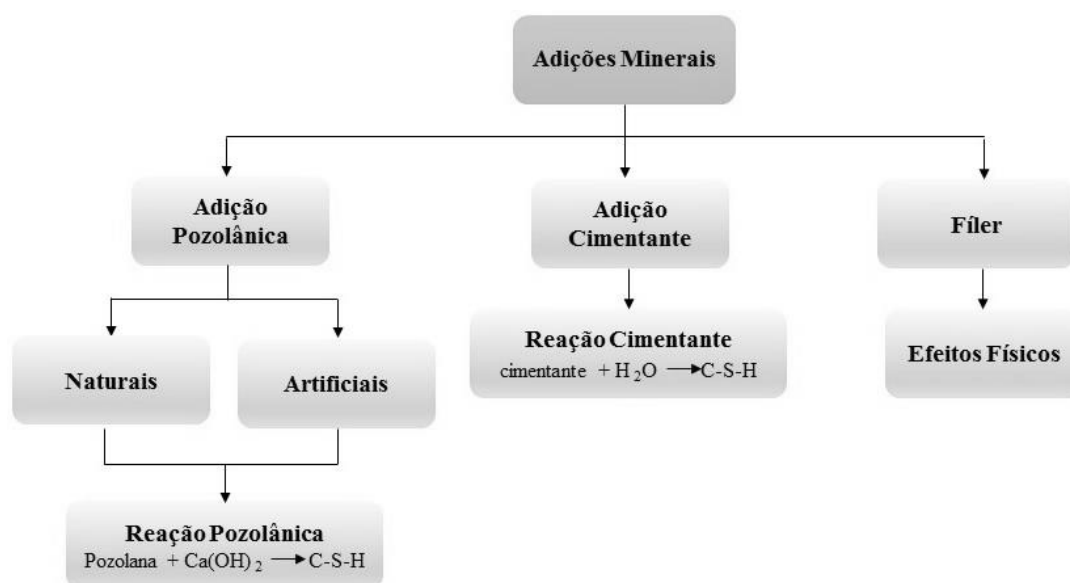
adições minerais, a fim de promover o desenvolvimento sustentável do concreto, conforme afirma (KELES, 2011).

O emprego de adições minerais, tanto em cimento quanto em concreto, é uma prática muito comum em vários locais do mundo, como nos Estados Unidos e em países europeus, onde há normas específicas que regem o uso desses materiais, determinando todos os parâmetros mínimos desejáveis para a qualidade e condições de aplicação das adições (CUNHA JR, 2023).

Segundo Malhotra e Mehta (1996), o termo adição, de forma abrangente, refere-se a qualquer material além de água, agregados e cimento, que é utilizado como um ingrediente do concreto e adicionado à massa imediatamente antes ou durante a mistura. No entanto, é importante diferenciar as adições dos aditivos, por isso na literatura geral sobre concreto, há uma definição distinta ambos. Segundo esta definição, as adições são utilizadas com o objetivo de somar ou mesmo substituir, parcialmente, a matéria-prima cimento (devido às suas propriedades semelhantes às do cimento), enquanto os aditivos são utilizados para alterar as características do cimento, sem alterar sua proporção na composição do concreto.

Ainda de acordo com os autores citados acima, a depender da sua ação físico-química no concreto, as adições minerais podem ser classificadas em três grupos distintos: materiais pozolânicos, material cimentante e filler, conforme ilustrado na Figura 6.

Figura 6 - Adições minerais: Tipos



Fonte: O Autor (2023)

Atualmente, grande parte das adições minerais é composta por resíduos provenientes de siderúrgicas, usinas termoelétricas e indústrias - como escória de alto forno, sílica de alto fumo e cinzas volantes - as quais têm substituído de forma crescente as pozolanas naturais e argilas calcinadas (CUNHA JR, 2023).

2.5 OS TIPOS DE ADIÇÕES MINERAIS

2.5.1 Adição Pozolânica

O material pozolânico, é definido pelas normas: NBR 12653 (ABNT, 2014) e ASTM C 618 (2008), como um material silicoso ou sílico-aluminoso, que possui pouca ou nenhuma propriedade cimentante e, porém, sob uma forma finamente dividida e com a presença de umidade, reage quimicamente com o hidróxido de cálcio, liberado na hidratação do cimento frente a temperaturas ambientes, transformando-se em compostos com propriedades cimentantes. Essas propriedades podem ser subdivididas da seguinte maneira:

- ✓ Pozolanas naturais: materiais de origem vulcânica, geralmente de caráter petrográfico ácido (65% de SiO_2) ou de origem sedimentar com atividade pozolânica;
- ✓ Pozolanas artificiais: materiais provenientes de tratamento térmico ou subprodutos industriais com atividade pozolânica, entre as quais tem-se:
 - **Argilas calcinadas:** materiais provenientes de calcinação de certas argilas submetidas a temperaturas, em geral, entre 500°C e 900°C, de modo a garantir sua reatividade com hidróxido de cálcio;
 - **Cinzas volantes:** resíduos finamente divididos com atividade pozolânica que resultam da combustão do carvão mineral pulverizado ou granulado;
 - **Outros materiais:** materiais não tradicionais, tais como: escórias siderúrgicas ácidas, cinzas de resíduos vegetais, rejeito de carvão mineral.

Temos que, a NBR 12653 (ABNT, 2014) apresenta também, uma classificação geral para os materiais pozolânicos, que devem obedecer às exigências químicas e físicas, para se enquadrar em uma destas três classes: 1) A classe N - são as pozolanas naturais e artificiais, como certos materiais vulcânicos de caráter petrográfico ácido, “*cherts*” silicosos, terras diatomáceas e argilas calcinadas; 2) A classe C - que são as cinzas volantes produzidas pela queima de carvão mineral em usinas termoeletricas e a 3) Classe E - que são quaisquer pozolana, cujos atributos diferem das classes anteriores. Na Tabela 6 são apresentadas as exigências químicas e físicas para explicar as diferentes classes, segundo a NBR 12653 (ABNT, 2014).

Tabela 6 - Exigências químicas e físicas dos materiais pozolânicos

Propriedades	Classes de material pozolânico		
	N	C	E
Exigências Químicas			
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	70	70	50
SO_3 % máx.	4	5	5
Teor de umidade, % máx.	3	3	3
Perda ao fogo, % máx.	10	6	6
Álcalis disponíveis em Na_2O , % máx.	1,5	1,5	1,5
Exigências Físicas			
Material retido na peneira 45 μm , % máx.	34	34	34

Propriedades	Classes de material pozolânico		
	N	C	E
Índice de atividade pozolânica:			
• Com cimento aos 28 dias, em relação ao controle, % mín.	75	75	75
• Com cal aos 7 dias, em MPa	6	6	6
• Água requerida, % máx.	115	110	105

Fonte: NBR 12653 (ABNT, 2015)

2.5.2 Adição Cimentante

Segundo Cunha Jr (2023), o material cimentante é aquele capaz de formar produtos cimentantes, como o C-S-H, sem a necessidade do hidróxido de cálcio presente no cimento Portland. Sua auto-hidratação é lenta, porém, quando usado como adição ou substituição em cimento Portland, sua hidratação é acelerada na presença de hidróxido de cálcio e gipsita, como é o caso da escória granulada de alto-forno.

Christ, Tutikian e Helene (2022) explicam que a escória de alto forno, em contato com a água, ao contrário das pozolanas, pode formar produtos cimentantes, sem ser preciso a presença do hidróxido de cálcio. Porém, a quantidade de produtos cimentantes e a taxa de formação são difíceis de encontrar para destinação do material, para a finalidade estrutural. Ao ser aplicada em conjunto com o cimento Portland, a escória, ocorre a hidratação acelerada em virtude da presença de hidróxido de cálcio e gipsita, que são os seus primeiros ativadores químicos.

As adições minerais, quando adicionadas ao cimento, são responsáveis por promover o refinamento dos poros e gerar a reação química com o $\text{Ca}(\text{OH})_2$, o que leva ao desenvolvimento de novos compostos de silicato de cálcio hidratados (C-S-H), que proporcionam resistência mecânica aos compósitos cimentícios (CHRIST, TUTIKIAN & HELENE, 2022).

2.5.3 Filler

Os materiais carbonáticos ou *filler* calcário, são rochas moídas, cuja constituição é composta por carbonato de cálcio tais como o próprio calcário. Este material é adicionado ao cimento com a intenção de fornecer maior grau de trabalhabilidade às misturas cimentícias. Isso é possível porque os grãos ou partículas moídas dessas adições possuem dimensões adequadas para se alojar entre as estruturas dos demais componentes do cimento, funcionando como uma espécie de lubrificante (ABCP, 2022).

Segundo a NBR 12653 (ABNT, 2014), os materiais carbonáticos são materiais finamente divididos, constituídos em sua maior parte de carbonato de cálcio e sua utilização em cimentos, pode variar de 6% a 50%, a depender do tipo de cimento produzido.

2.6 ADIÇÕES MINERAIS EM CIMENTO PORTLAND

Ao considerar que o cimento Portland comum possui da ordem de 95% de clínquer e 5% de gipsita, já é prática consolidada a fabricação de cimentos compostos com percentuais bem menores de clínquer. (EVANGELISTA, 2011).

Segundo Mehta & Monteiro (2008), as duas melhores estratégias para contribuição ambiental na redução de gases do efeito estufa, a curto prazo, são reduzir o fator clínquer no produto final, adicionando minerais ao cimento e aumentando a utilização de cimentos compostos na construção. A literatura oferece análises com vários tipos de cinzas, com escória de alto forno, com resíduos da construção civil, entre outros.

Segundo Paumgartten (2020), diversos autores já descreveram a viabilidade técnica e econômica do uso de adições minerais em substituição a parte dos componentes do cimento Portland, para aplicação em compostos cimentícios. Entre as vantagens do uso deste tipo de material estão o aumento da durabilidade e resistência mecânica dos concretos e argamassas produzidas.

Para Silva Junior *et al.*, (2018), a possibilidade de uso de uma pozôlana, oriunda de fontes renováveis, tem demonstrado no Brasil, ser uma alternativa de grande impacto na sustentabilidade aplicada à construção civil, além de permitir melhor desempenho e durabilidade aos compósitos cimentícios e redução de custos.

Entre as principais adições que estão sendo estudadas atualmente para o uso em materiais cimentícios estão os resíduos industriais, que são materiais gerados em larga escala e que precisam ter uma destinação ambientalmente adequada, além de possuírem propriedades interessantes para o uso em substituição ao cimento (CUNHA JR, 2023).

Resende (2013) caracterizou a cinza de cavaco de eucalipto (CCE) e avaliou a sua utilização como material cimentício suplementar. O autor substituiu o clínquer do cimento Portland pelo resíduo, tanto em sua forma *in natura*, como na forma beneficiada (calcinação e moída), nos percentuais de 5%, 10% e 15%. Os resultados dos ensaios mecânicos demonstraram que a utilização do resíduo proporcionou uma melhora no desempenho mecânico dos compósitos cimentícios, através do efeito do preenchimento dos poros do concreto, sendo o percentual ótimo de substituição indicado o de 5%.

Em sua pesquisa, Vaske (2012), estudou a viabilidade da utilização da cinza coletada em filtro multiciclone pela combustão de lenha de eucalipto em caldeira fumo tubular, incorporada ao concreto. Este estudioso caracterizou a cinza, utilizando-se de ensaios químico, físico e mineralógico e, posteriormente, avaliou os efeitos da adição deste material em teores de 15%, 30%, 45%, por meio ensaios de resistência à compressão e absorção por capilaridade. Os resultados mostraram que a cinza de lenha de eucalipto pode ser utilizada como adição ao concreto, em percentual de 15%, trazendo benefícios nas ordens econômicas, técnicas e ambientais.

Martel (2016) realizou um estudo da viabilidade de uso da cinza do caroço de açaí em substituição parcial de 10%, 15% e 20% ao cimento Portland a fim de obter a produção de argamassas, através de caracterização física e química da cinza do caroço de açaí, exposto a temperaturas de queima (600 °C, 800 °C e 1000 °C), avaliando a atividade pozzolânica da cinza e os ensaios mecânicos de resistência à compressão das argamassas nas idades de 28 e 63 dias. A autora concluiu, após uma análise profunda da microestrutura da cinza do caroço de açaí, o seguinte: não houve adequação do resíduo à classificação de pozolana. Entretanto, as argamassas com a substituição parcial de cimento Portland por cinza, resultaram positivamente com relação à resistência à compressão. A amostra de 10% de substituição parcial com temperatura de queima de 600°C aos 28 dias totalizou a maior resistência entre os corpos de prova (27,65 MPa), tendo superado o resultado do corpo de prova (CP) de referência (23,39 MPa).

Cunha Jr (2023), analisou o comportamento de um cimento Portland modificado do tipo CPIIZ-32, produzido com substituição parcial do clínquer, por um resíduo oriundo

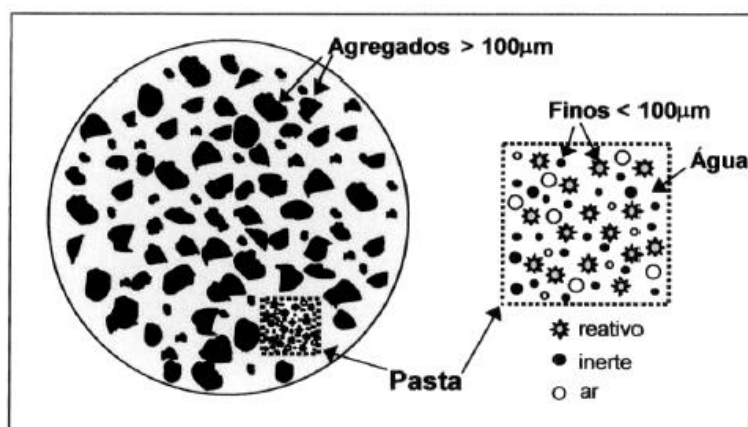
do pré-separador do processo de fabricação do ferro silício - silício metálico - de uma indústria localizada em Breu Branco/PA. Para tanto, em um primeiro momento, foi realizada a caracterização física e química do resíduo na forma in natura e beneficiada, por meio do processo de moagem, a partir dos ensaios de massa específica, FR-X, DR-X e índice de atividade pozolânica com cal e cimento. Em seguida, foram formulados 5 (cinco) blends de cimento composto com diferentes teores de resíduo de silício metálico moído para análise do comportamento mecânico aos 28 e 90 dias de cura. Por fim, foi feita uma comparação do desempenho físico-mecânico das argamassas produzidas com o uso do cimento modificado e o cimento comercial do tipo CPIIZ-32. Os resultados demonstraram que o resíduo de silício metálico, após passar por um processo de pré-beneficiamento (moagem por um período de 60 minutos) obtém propriedades condizentes com os requisitos estipulados pela NBR 12653 (ABNT, 2014) para ser considerado como adição pozolânica.

2.7 ARGAMASSA - UMA MISTURA HOMOGÊNEA

A NBR 13281 (ABNT, 2005), define que a argamassa é uma mistura homogênea de um ou mais aglomerantes, agregado miúdo e água, que pode conter aditivos ou adições minerais, contendo propriedades de aderência e endurecimento, podendo receber dosagem em obra ou em instalação própria, neste caso, a argamassa industrializada.

Segundo o modelo reológico da argamassa, criado por Cardoso (2009), a microestrutura deste compósito é formada por bifases concentradas, que são compostas por fração “grossa” inerte (areia) com partículas entre 100µm e 2mm aproximadamente, e uma pasta reativa de água e finos, geralmente cimento e cal, conforme ilustrado na Figura 7.

Figura 7 - Modelo microestrutural das argamassas



Fonte: Cardoso, (2009)

Neste modelo microestrutural reológico, a argamassa foi descrita como um produto com características multifásicas, considerando que pode apresentar em sua composição pozolanas, filler (finos inertes), fibras (naturais e sintéticas) e teores consideráveis de ar incorporado. Por esta razão, configura-se como um compósito de comportamento reológico complexo, cujo preparo e aplicação possuem o mesmo nível de complexidade.

Dependendo do tipo de aglomerante empregado, as argamassas podem ser classificadas em argamassas mistas ou simples. As argamassas mistas contêm mais de um aglomerante (cimento e cal), enquanto as argamassas simples são compostas de apenas um aglomerante, o cimento (SIQUEIRA, 2011).

Dependendo do tipo e das quantidades dos materiais empregados, as argamassas podem se destinar a diferentes aplicações, conforme as classificações especificadas pela NBR 13281-1 (ABNT, 2023) e NBR 13281-2 (ABNT, 2023).

Segundo Carasek (2017), as principais funções de revestimentos de argamassa em paredes são: proteger a alvenaria e a estrutura contra as ações de intemperismo, no caso dos revestimentos externos; integrar o sistema de vedação dos edifícios, contribuindo com acústica, estanqueidade à água, segurança ao fogo e resistência ao desgaste e abalos superficiais; regularizar a superfície de elementos de vedação e servir como base para acabamentos decorativos, contribuindo para a estética da edificação.

2.7.1 Dosagem

Ainda que se registrem esforços neste sentido, para argamassas, não se estabelece, como para concreto, métodos racionais de dosagem completamente consagrados e difundidos no contexto nacional. Esta dosagem oscila, de acordo com sua finalidade, e trabalha com traços pré-fixados, baseados em normas e documentos de instituições técnicas para o preparo das argamassas. Os traços têm em comum uma relação aglomerante/areia igual ou próxima de 1:3, em volume (EVANGELISTA, 2011).

2.7.2 Propriedades no estado fresco

2.7.2.1 Aderência inicial

Conforme explica Roque (2018), após o lançamento de uma argamassa sobre um substrato, espera-se que a pasta apresente a propriedade denominada, aderência inicial, que é definida como a capacidade do material, ainda em seu estado fresco, para ancorar-se na superfície do substrato através da penetração da pasta nos seus poros, seguido do endurecimento da pasta, que é realizado gradativamente. Este fenômeno ocorre quando parte da água de amassamento da argamassa, composta pelos componentes dos aglomerantes, percola pelos microporos da superfície do substrato.

De acordo com Carasek (2017), a adesão inicial, também denominada de “pegajosidade” é a capacidade de união inicial da argamassa no estado fresco a uma base, que está diretamente relacionada com as características reológicas da pasta aglomerante, especificamente à sua tensão superficial, bem como a redução da tensão superficial da pasta, facilita a “molhagem” do substrato, porque reduz o ângulo de contato entre as superfícies e implementação da adesão, sendo que este fenômeno proporciona um maior contato físico da pasta com a base, sendo a interação químico-física de ambos, essencial para uma boa adesão.

Roque (2018) salienta que são fatores preponderantes para a aderência inicial da argamassa: suas propriedades no estado fresco, as características e limpeza da base de aplicação (porosidade, rugosidade, isenção de poeiras, partículas soltas e gorduras) e o contato efetivo entre a superfície de argamassa e a base.

2.7.2.2 Índice de trabalhabilidade, consistência e plasticidade

Para Baía e Sabbatini (2008), a trabalhabilidade é a combinação das características das argamassas relacionadas com a coesão, consistência, plasticidade, viscosidade e adesão inicial. Em termos práticos, a trabalhabilidade determina o modo e a facilidade com que as argamassas podem ser manuseadas (misturadas, transportadas e aplicadas) e posteriormente propiciarem um acabamento em condição homogênea.

Segundo Turra (2016), a trabalhabilidade esta relacionada a capacidade dos compósitos cimentícios, ainda no estado fresco, de serem trabalhados, e por isso essa pode ser considerada como uma propriedade subjetiva, uma vez que não há um padrão específico para esse fator, pois a trabalhabilidade irá depender de diversos quesitos como: tipo de aplicação, manuseio e experiência do profissional que está aplicando o material.

No que se refere a consistência, esta propriedade está associada à trabalhabilidade da argamassa durante a sua aplicação. Trata-se da capacidade que a argamassa apresenta em resistir a deformação durante o estado fresco. Essa propriedade pode ser quantificada, a partir de um índice, o qual é aferido por meio da aplicação dos procedimentos descritos na NBR 13276 (ABNT, 2016). Dessa forma, pode haver a seguinte classificação para as argamassas, a depender da consistência apresentada: secas - (quando apenas preenchem os vazios entre os grãos); plásticas (quando forma-se uma fina película de água que lubrifica a superfície dos grãos) e; fluidas (quando os grãos estão imersos na pasta).

Segundo Fontes (2013), a plasticidade de uma argamassa é a propriedade pela qual a argamassa tende a conservar-se deformada após a retirada das tensões de deformação. Terá boa plasticidade quando se espalhar facilmente sobre o substrato e aderir à sua superfície ou, no caso de revestimentos, quando proporcionar facilidade no seu acabamento final.

2.7.2.3 Retenção de água

De acordo com Carasek (2017), a retenção de água é a capacidade da argamassa, no estado fresco, de manter sua consistência ou trabalhabilidade, quando submetida a solicitações que provocam a perda de água de amassamento seja por evaporação, sucção do substrato ou reações de hidratação. Tal propriedade contribui para o desenvolvimento da hidratação em fases mais avançadas do processo de cura do revestimento, tornando as reações de endurecimento da argamassa mais gradativas, com um consequente ganho de resistência, evitando-se, dessa forma, possíveis problemas de fissuração ocasionados por retração na secagem, fatores estes que implicam diretamente no desempenho dos sistemas de revestimento.

Segundo Baía e Sabbatini (2008), da mesma forma que a consistência, os fatores que influenciam na retenção de água da argamassa são as características e proporcionalidade dos materiais constituintes da argamassa (traço). No mesmo estudo, os autores apontam que a perda de água de forma rápida nos revestimentos prejudica a aderência, a capacidade de absorver deformações, a resistência mecânica, a durabilidade e a estanqueidade do revestimento de vedação. A norma NBR 13277 (ABNT, 2005) estabelece o método para a determinação da retenção de água da argamassa.

2.7.3 A argamassa e suas propriedades no estado endurecido

2.7.3.1 Retração de água por secagem

Segundo Carasek (2017), a retração por secagem é a propriedade que a argamassa possui, no estado endurecido, relacionada a variação de volume, ocorre por meio de um mecanismo complexo, estando associada à evaporação da água de amassamento das pastas e também às reações de hidratação e carbonatação dos aglomerantes. O fenômeno se mostra responsável por inúmeros casos de manifestações patológicas encontradas nos revestimentos em argamassa, sobretudo, tendo-se em vista que a retração acaba propiciando o surgimento de fissuras ou trincas no revestimento, o que pode possibilitar a penetração de água e o posterior aparecimento de fungos e bolor, fato que pode, inclusive, ocasionar o descolamento do revestimento, influenciando diretamente no seu desempenho já no estado endurecido (ROQUE, 2018).

Para Baía e Sabbatini (2008), os principais fatores que influenciam nessa propriedade da argamassa dizem respeito as características dos seus materiais constituintes, a espessura e o intervalo de aplicação entre as camadas do revestimento, e o respeito ao tempo de sarrafeamento e desempenho no momento do acabamento. De acordo com os autores, as argamassas com um alto teor de cimento, consideradas “fortes”, são mais suscetíveis às tensões causadoras do aparecimento de fissuras durante a secagem, quando comparadas com as argamassas mais “fracas”.

2.7.3.2 Resistência mecânica da argamassa

A resistência mecânica é a propriedade dos compósitos cimentícios responsável por suportar as ações mecânicas de diferentes naturezas, as quais as argamassas podem ser submetidas no estado endurecido, devido a abrasão superficial, impacto ou à retração termo-higroscópica, em outras palavras, a argamassa deve apresentar resistência a movimentações do substrato, sejam elas decorrentes de recalques, ou variações dimensionais devido às oscilações de temperatura (ROQUE, 2018).

O proporcionamento dos materiais constituintes da argamassa (traço), assim como em inúmeras outras propriedades, também tem influência significativa sobre a resistência mecânica. De acordo com Baía e Sabbatini (2008), a resistência da argamassa varia inversamente com a relação água/cimento e com o tipo de proporção entre cimento e cal em argamassas mistas, com dois aglomerantes, sendo aumentada com uma maior proporção de cimento na composição e diminuída com uma maior proporção de cal, além de ser condicionada pelo teor de ar incorporado, e da técnica de execução, que deve buscar a compactação da argamassa durante a sua aplicação e acabamento. Dois principais parâmetros de análise da resistência mecânica das argamassas são os ensaios de resistência à compressão e à tração por compressão diametral.

2.7.3.3 Permeabilidade

Conforme explica Roque (2018), a permeabilidade da argamassa, que no estado endurecido é um material poroso, é uma propriedade indesejada para o revestimento, sendo potencializada pela existência fissuras que se caracterizam como um caminho mais fácil para a percolação da água direto até a base, comprometendo dessa forma a estanqueidade da vedação.

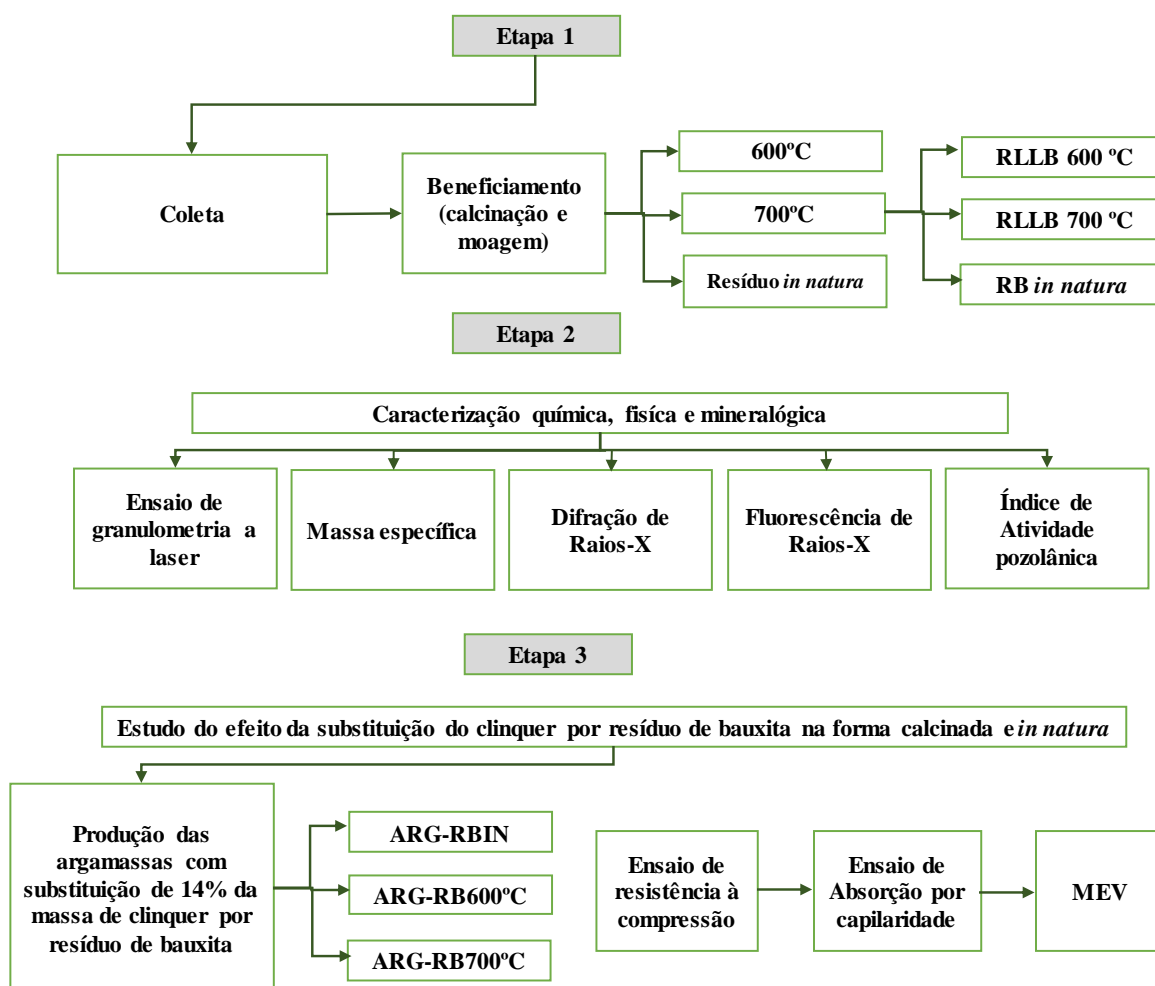
Conforme a NBR 15259 (ABNT, 2005), a permeabilidade pode ser indicada pelo coeficiente de capilaridade, obtido através do ensaio de absorção por capilaridade. O fenômeno da capilaridade está diretamente ligado à estrutura de poros do material, que pode ser modificada por fatores como o tipo de cimento utilizado, a presença de aditivos ou adições, as características do agregado e a quantidade de água da mistura, mas principalmente pela forma de produção da argamassa e a execução do revestimento, que dependendo da energia de aplicação pode apresentar uma maior compacidade (SANTOS, 2008).

A permeabilidade de uma argamassa depende basicamente da quantidade e do tipo de aglomerante utilizado, da granulometria do agregado e das características do substrato. O cimento Portland, quando usado em proporções adequadas, pode reduzir à permeabilidade de um revestimento argamassado, porém se usado em teores muito altos pode provocar a fissuração por retração hidráulica comprometendo assim a permeabilidade da argamassa (SANTOS, 2008).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

No Fluxograma da Figura 8 é possível observar as fases realizadas na etapa laboratorial da presente pesquisa.

Figura 8 – Fluxograma da etapa laboratorial



Fonte: O Autor, (2023)

A metodologia Experimental, esquematizado na figura 8, foi elaborado para facilitar a visualização e compreensão dividida em 3 etapas:

- A ETAPA 1: Refere-se ao beneficiamento do Rejeito de Lama de Lavagem de Bauxita (RLLB). Primeiramente foi realizado o processo de

coleta e moagem do RLLB. Em seguida a calcinação em 600° C e 700°C do RLLB

- A ETAPA 2: Consiste na caracterização dos materiais utilizados na produção das argamassas. Foi realizado a caracterização do RLLB a fim de verificar suas propriedades física, química e mineralógica e pozolânica
- A ETAPA 3: A última etapa foi realizada a produção de argamassa utilizado RLLB, substituindo parcialmente o cimento na produção de 14%. Avaliando a resistência compressão, ensaio de absorção por capilaridade e Microscopia Eletrônica de Varredura.

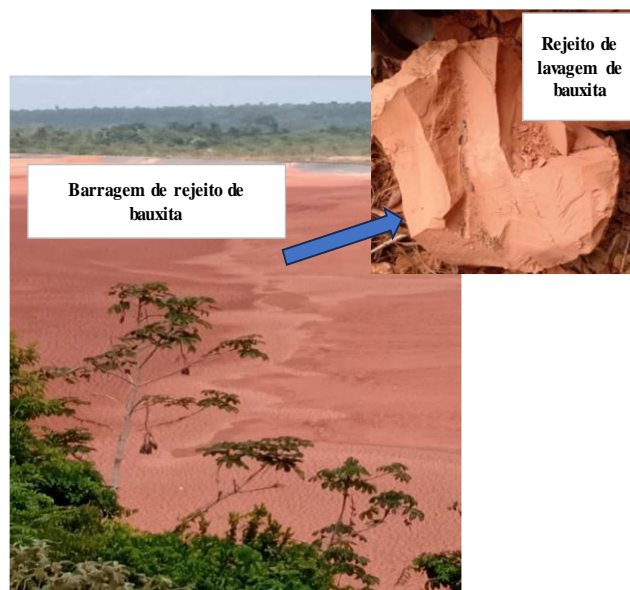
3.1 MATERIAIS

3.1.1 Resíduo de bauxita

O rejeito mineral utilizado nesta pesquisa é oriundo da exploração de bauxita da região Sudeste do estado do Pará/Brasil. Conforme ilustrado na Figura 9, a amostra foi retirada da barragem, que se localiza no Platô Miltônia em Paragominas/PA/Brasil. O rejeito é proveniente do beneficiamento da bauxita para a produção de alumina, cujas etapas se dividem em: fragmentação e classificação granulométrica, como na Figura 10, a seguir.

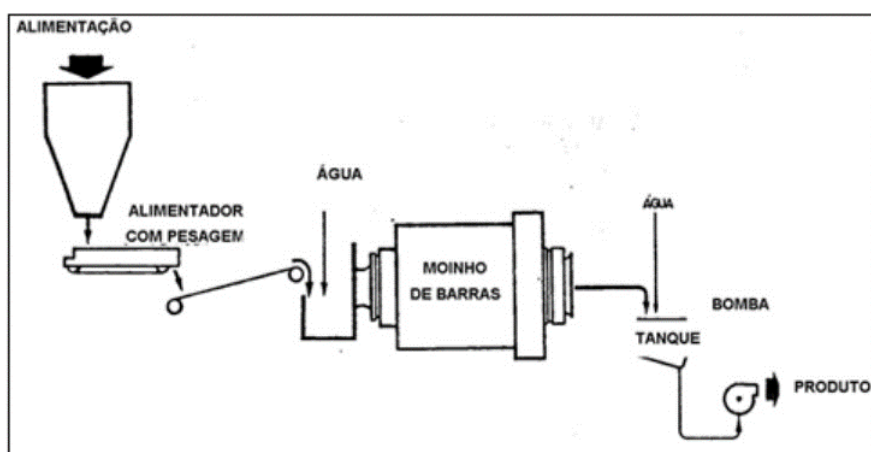
O beneficiamento inclui a fase onde o minério passa no alimentador para britagem e a lavagem no moinho, reduzindo o minério em parte menores e retirando o resíduo de argila que ainda estiverem misturados na bauxita.

Figura 9 - Barragem de rejeito de bauxita e aspecto final do subproduto formado



Fonte: O Autor, (2023)

Figura 10 - Fluxograma e esquema do processo



Fonte: Adaptado de Wao (2003)

Após a coleta do resíduo de bauxita, este material passou por diferentes processos de beneficiamento em laboratório, originando três situações de estudo, conforme mostra a Tabela 7, o resíduo calcinado em duas diferentes temperaturas e moído e o resíduo in natura que foi submetido também ao processo de moagem.

Tabela 7 - Nomenclatura utilizada para o resíduo

Nomenclatura	Tipo de resíduo
In natura	Resíduo moído por 1h
RLLB 600°C	Resíduo calcinado a 600°C
RLLB 700°C	Resíduo calcinado a 700°C

Fonte: O Autor, (2023)

As temperaturas empregadas para a sinterização (600 °C e 700 °C), bem como o tempo de permanência na mufla (3horas), foram escolhidas baseadas no trabalho de Racanelli *et al.*, (2020). Já para o processo de moagem, foi tomado como base o trabalho desenvolvido por Pouey (2006). Neste sentido, o rejeito foi moído em um moinho de bolas da marca EMIC, com velocidade de 12 RPM. A carga moedora foi composta por 5 kg de bolas para cada 1 kg de material, sendo dividida em 2/3 de bolas pequenas e 1/3 de bolas grandes, e o tempo de moagem foi de 1hora.

3.1.2 Cimento

Nas matrizes cimentícias avaliadas foi utilizado o cimento CP-V ARI Portland de alta resistência inicial, cuja composição apresenta maior quantidade de clínquer, o que possibilita a realização de análises mais precisas quanto ao comportamento do rejeito de bauxita como adição no cimento Portland. Para a determinação do índice de atividade pozolânica (IAP) do rejeito, foi utilizado o cimento Portland composto com fíler, CP II-F, com classe de resistência 32, conforme prescrito pela NBR 5752 (ABNT, 2014). A massa específica de ambos os cimentos foi determinada conforme especifica a norma NBR 16605(ABNT,2017) e os resultados estão descritos na Tabela 8.

Tabela 8 - Nomenclatura utilizada para o resíduo

Cimento	Massa Específica(g/cm³)
CPII-F-32	3,06
CPV-ARI	2,97

Fonte: Os autores, (2023)

3.1.3 Areia normatizada

A areia utilizada foi a descrita pela NBR 7214 (ABNT, 2015), a qual segundo a referida norma é um material natural, padronizado, constituído principalmente de grãos de quartzo arredondados a subarredondados, beneficiado e fornecido pelo Instituto de Pesquisa Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT, e que satisfaz as condições especificadas para parâmetros físico-químicos enumerados na Tabela 9 e fração granulométrica, listadas na Tabela 10. Determinando sua composição granulométrica NBR NM 17054 (ABNT, 2022), massa unitária NBR NM 16972 (ABNT, 2021) e massa específica de acordo NBR NM 16916 (ABNT, 2001).

Tabela 9 - Requisitos físicos e químicos

Propriedade	Requisito	Método de ensaio	Amostra ou fração de controle
Teor de sílica	$\geq 95\%$, em massa	ABNT NBR 13956-2 ou ABNT NBR 14656 ^a	Amostra composta
Granulometria	Ver tabela 7	ABNT NM 17054	Por fração
Umidade	$\leq 0,2\%$, em massa	ABNT NBR 7214	Amostra composta
Matéria orgânica	≤ 100 ppm	ABNT NBR NM 49 ^b	Amostra composta

^a O método gravimétrico estabelecido pela ABNT NBR 13756-2 deve ser considerado como de referência.

^b na realização do ensaio da areia normal, utilizar apenas 1 cm³ da solução-padrão de ácido tânico a 2 %, ao invés de 3 cm³, como previsto na ABNT NBR NM 49:2001, 4.4.3.

Fonte: Adaptado de NBR 7214 (ABNT, 2015)

Tabela 10 - Denominação das frações granulométricas

Denominação da fração	Material retido entre as peneiras de abertura nominal
16	2,4 mm e 1,2 mm
30	1,2 mm e 0,6 mm
50	0,6 mm e 0,3 mm
100	0,3 mm e 0,15 mm

Fonte: Adaptado de NBR 7214 (ABNT, 2015)

3.1.4 Aditivo

Para facilitar a obtenção da consistência desejada nas argamassas produzidas foi utilizado um aditivo superplastificante, com densidade de $1,08 \pm 0,02$ kg/litro e PH de $5,0 \pm 1$, obedecendo à dosagem informada pelo fabricante de 0,3 a 2% sobre a massa do aglomerante.

3.2 MÉTODOS

Após o processo de beneficiamento em laboratório (calcinação e moagem), o rejeito foi submetido aos ensaios de granulometria a laser; massa específica, segundo a NBR 16605 (ABNT, 2017); difração de Raios-X; fluorescência de Raios-X; índice de atividade pozolânica com cimento NBR 5752 (ABNT, 2014) e índice de atividade pozolânica com a cal NBR 5751 (ABNT, 2015).

Para o ensaio de granulometria a laser as amostras foram dispersas em água destilada e misturadas em um agitador mecânico, por 20 minutos. Após isso, parte dessa mistura foi separada e dispersa em um banho ultrassônico, e por fim, colocada em um equipamento do tipo CILAS modelo 1064, para determinação da composição granulométrica.

A caracterização mineralógica do rejeito foi obtida através da Difração de Raios-X (DRX), pelo método do pó. Foi utilizado difratômetro modelo X'PERT PRO MPD (PW 3040/60), da *PANalytical*, com Goniômetro PW3050/60 (Θ/Θ) e com tubo de raios-x cerâmico de anodo de Cu ($K\alpha_1 = 1,540598 \text{ \AA}$), modelo PW3373/00, foco fino longo,

2200W, 60kv e filtro K β de Níquel. O detector utilizado foi do tipo RTMS, X'Celerator. A coleta dos difratogramas foi realizada com passo angular de 0,02° e o tempo por passo 0.5s. A aquisição dos dados foi feita com o software *X'Pert Data Collector*, versão 2.1a, e o tratamento dos dados com o software *X'PertHighScore* versão 2.1b, também da *PANalytical*.

O ensaio de fluorescência de raios-x foi executado com pastilhas prensadas, confeccionadas pela mistura e homogeneização na proporção de 3 g do aglutinante para 9 g de amostra previamente seca. Essas pastilhas foram prensadas com uma força de 15 toneladas. As medidas de fluorescência de raios-x (FRX) foram realizadas em um espectrômetro Rigaku modelo ZSX Primus IV, equipado com tubo de Rh.

Após os ensaios de caracterização, foram elaboradas 3 diferentes composições de argamassa com rejeito de bauxita nas proporções de 1:3:0,48, com substituição de 14% do cimento do Portland do tipo CPV por RB *in natura*; RLLB 600°C e RLLB 700°C, as quais tiveram seus resultados de desempenho comparados com os da argamassa de referência (produzida com cimento CPV). Esse percentual de substituição é baseado no cimento tipo CP II-Z, conforme a norma NBR 16697(ABNT,2018) que estabelece um percentual de 6 a 14% de teor pozolana em relação a massa de cimento. As nomenclaturas empregadas e os traços utilizados estão descritos na Tabela 11, a seguir. O intuito nesta fase foi indicar qual o melhor tipo de rejeito para ser utilizado em substituição a 14% do clínquer, para a produção de um cimento pozolânico.

Tabela 11 - Nomenclaturas utilizadas para as argamassas

Nomenclatura	% tipo de cimento			% de resíduo	
	CPV	CP-II-F-32	RB <i>in natura</i>	RLLB 600 °C	RLLB 700 °C
ARG-REF	100	0	0	0	0
ARG-RBIN	86	0	14	0	0
ARG-RB600°C	86	0	0	14	0
ARG-RB700°C	86	0	0	0	14

Fonte: Os Autores, (2023)

Após a produção dos corpos de prova, correspondente a cada uma das composições, foi executado o ensaio de resistência à compressão aos 7, 14 e 28 dias de cura, conforme a prescrição da NBR 13279 (ABNT, 2005); absorção de água por capilaridade NBR 9779 (ABNT, 2012) e Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV,

para verificação do desempenho físico-mecânico e microestrutural, respectivamente, das amostras analisadas. Para essa última análise foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura do fabricante Tescan, modelo Vega 3 XMU, com emissor hexaboreto de lantânio. O aparelho possui sistema duplo de microanálise de energia dispersiva de elétrons – EDS fabricante Oxford. A tabela 12 apresenta o resumo dos corpos de provas a serem confeccionados.

Tabela 12- Quantidade de corpo de prova do programa experimental

Amostras	Compressão Axial			Absorção de água
	7 dias	14 dias	28 dias	
ARG-REF	4	4	4	4
ARG-RBIN	4	4	4	4
ARG-RB600°C	4	4	4	4
ARG-RB700°C	4	4	4	4
Total Parcial	16	16	16	16
Total				64

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X

A composição química do Rejeito de Lama de Lavagem de Bauxita (RLLB) in natura e ativada termicamente nas temperaturas 600°C e 700°C. A Tabela 13 apresenta os resultados de FRX das amostras analisadas.

Tabela 13 - Resultados obtidos no ensaio de Fluorescência de raios-X

Óxidos Principais (%)										
Amostras	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	Ce	Zr	MnO	V	Rh	Cr
RB <i>in natura</i>	44,7	28	16,2	2,37	0,084	0,064	0,047	0,036	0,036	0,034
RLLB 600 °C	45,8	28,7	16,7	2,32	0,071	0,071	0,049	0,04	0,031	0,031
RLLB 700 °C	51,9	29,7	16,8	2,27	0,063	0	0,051	0,043	0	0,024

Fonte: Os Autores, (2023)

A tabela 13, apresenta os principais óxidos em porcentagem das amostras RB in natura, RLLB 600°C e RLLB 700°C respectivamente.

Ao analisar os valores apresentados na Tabela 13, observa-se que o resíduo apresenta um considerável teor de alumina, sílica e ferro, o que está de acordo com a literatura existente sobre o assunto. Segundo Reis (2014), tais óxidos, em maior concentração, têm contribuição importante nas reações de estado sólido e favorecem a formação da fase vítrea e da mulita nos compostos cimentícios, tendo uma relação direta com a resistência mecânica das estruturas formadas.

Ademais, foi verificado que nas três amostras analisadas o valor do somatório dos teores de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ são maiores que 70%, atendendo, portanto, às especificações da NBR 12653 (ABNT, 2014) para que o material seja classificado como adição pozolânica da classe N. Observa-se que a concentração destes óxidos aumenta de forma proporcional ao aumento da temperatura de calcinação empregada, sendo que a amostra ARG-RB700°C foi a que apresentou o melhor desempenho, com um somatório de 98,4%. Tais resultados excedem o que foi obtido em trabalhos similares como o de Paumgarten *et al.*, (2021), que encontraram um percentual de 73,11% nas amostras de resíduo de bauxita que foram analisadas.

4.2 MASSA ESPECÍFICA

Na Tabela 14 podem ser observados os resultados auferidos para a massa específica do cimento CPV e das amostras de resíduo de bauxita em suas três formas de estudo (RB *in natura*, RLLB 600 °C e RLLB 700 °C).

Tabela 14 - Resultados de FRX das amostras analisadas

Amostras	Valor da massa específica (g/cm³)
RB <i>in natura</i>	2,62
RLLB 600 °C	2,66
RLLB 700 °C	2,71
Cimento CPV	2,95

Fonte: Os Autores, (2023)

Em relação aos valores apresentados na Tabela 14, constatou-se que ocorreu um pequeno aumento na massa específica do resíduo de bauxita que passou pelo processo de

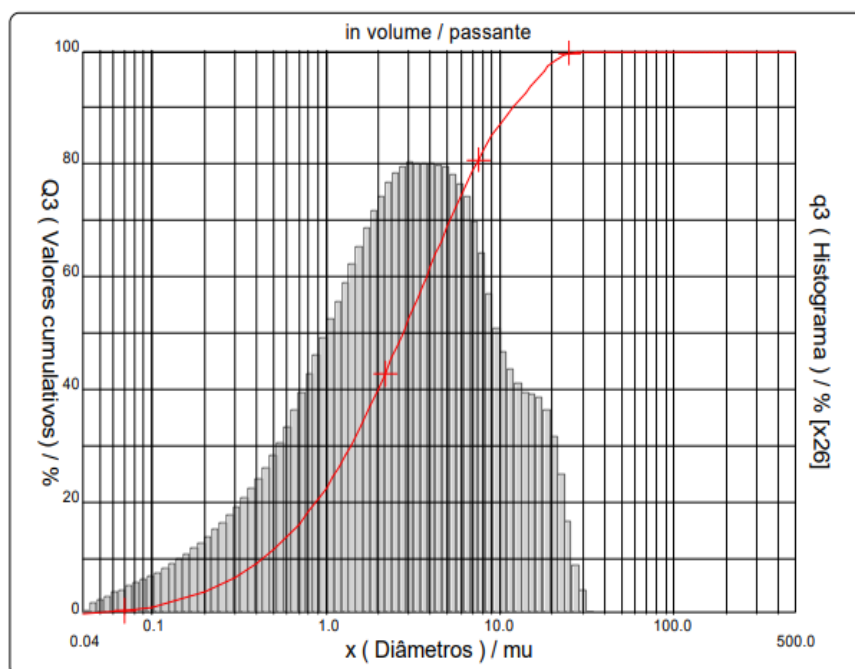
calcinação, de forma que quanto maior a temperatura empregada, mais elevada se tornou essa grandeza. Os números encontrados também não diferem muito do valor da massa específica do cimento de referência. Todos os resultados estão dentro da faixa especificada pela NBR 16605 (ABNT, 2017) para a massa específica dos cimentos comercializados no Brasil.

Ademais, ao comparar os resultados obtidos com trabalhos semelhantes, observa-se que estes estão dentro da faixa especificada por autores como Martins (2020), que observou um aumento na massa específica do resíduo do tratamento de água, diretamente proporcional a temperatura de calcinação empregada no material. Por outro lado, a amostra RB *in natura*, da presente pesquisa, obteve um resultado inferior ao encontrado por Paumgartten *et al.*, (2021), que utilizou o resíduo também em sua forma *in natura*.

4.3 GRANULOMETRIA A LASER

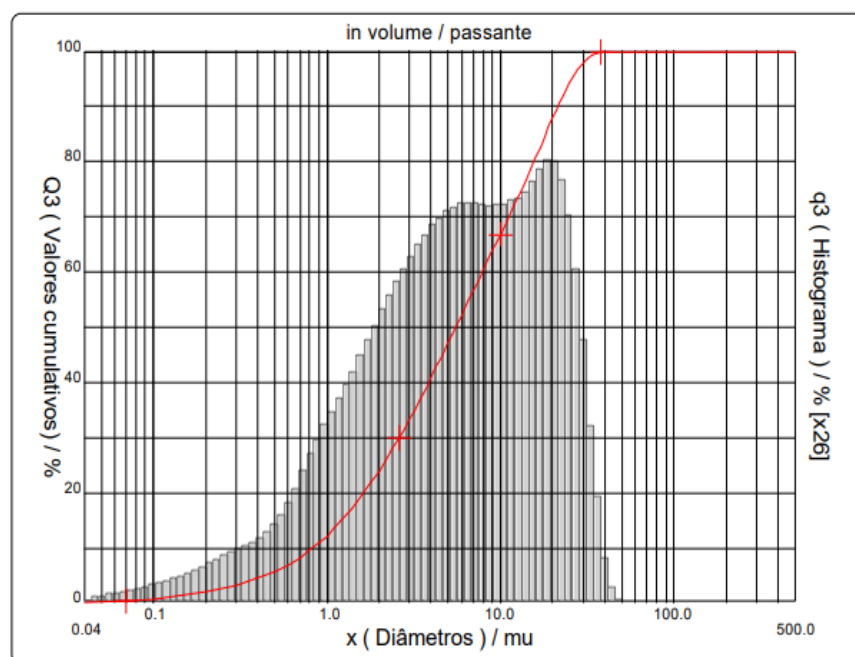
Os gráficos das Figuras 11, 12 e 13 ilustram a distribuição granulométrica do resíduo RB *in natura*, RLLB 600 °C e RLLB 700 °C, respectivamente. Para fins comparativos, os resultados foram agrupados a partir dos gráficos de frequência acumulada nos intervalos de diâmetro esférico equivalente (D.E.E.) de $0,04 \leq \phi \leq 0,1$, $0,1 \leq \phi \leq 1$, $1 \leq \phi \leq 10$, e $10 \leq \phi \leq 100 \mu\text{m}$. Com isso, observou-se que a amostra RLLB 700 °C foi a que apresentou o menor tamanho de partículas, por ter obtido maior concentração de partículas no intervalo de $10 \leq \phi \leq 100 \mu\text{m}$. Todavia, não houve uma grande discrepância de resultados em relação as demais amostras. Pelos valores obtidos, os resíduos calcinados podem ser considerados, segundo Racanelli *et al.*, (2020), como uma suspensão formada por partículas ultrafinas.

De acordo com a NBR 12653 (ABNT, 2014), para ser considerado pozolânico é necessário que o material apresente um máximo de 34% de partículas retidas na peneira de malha 45 μm no ensaio de granulometria. Sendo assim, verifica-se que todas as amostras se enquadrariam no que preconiza a referida norma.

Figura 11 - Distribuição granulométrica do resíduo de RB *in natura*

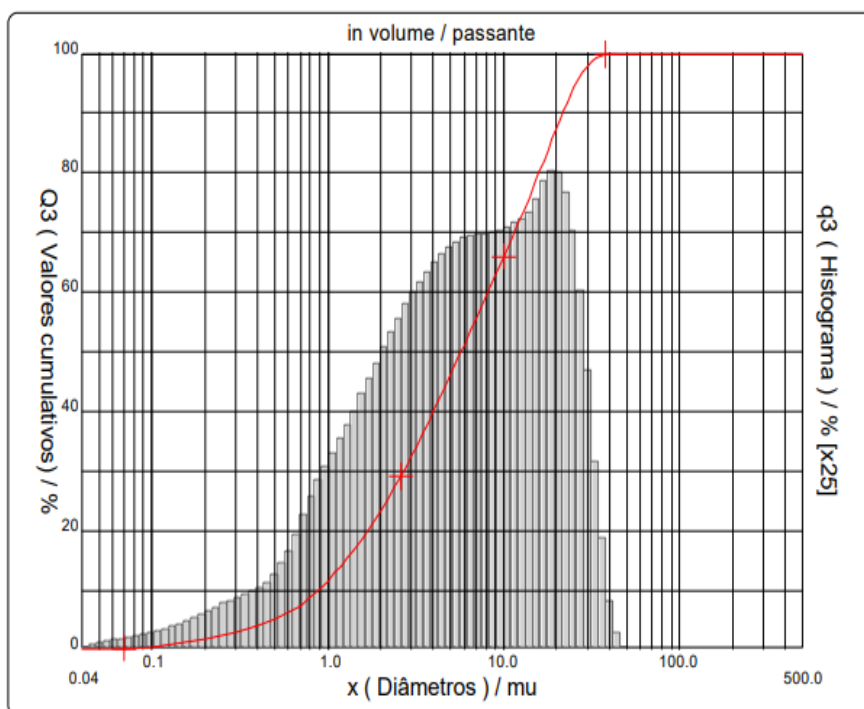
Fonte: Os Autores, (2023)

Figura 12 - Distribuição granulométrica do resíduo de RLLB 600 °C



Fonte: Os Autores, (2023)

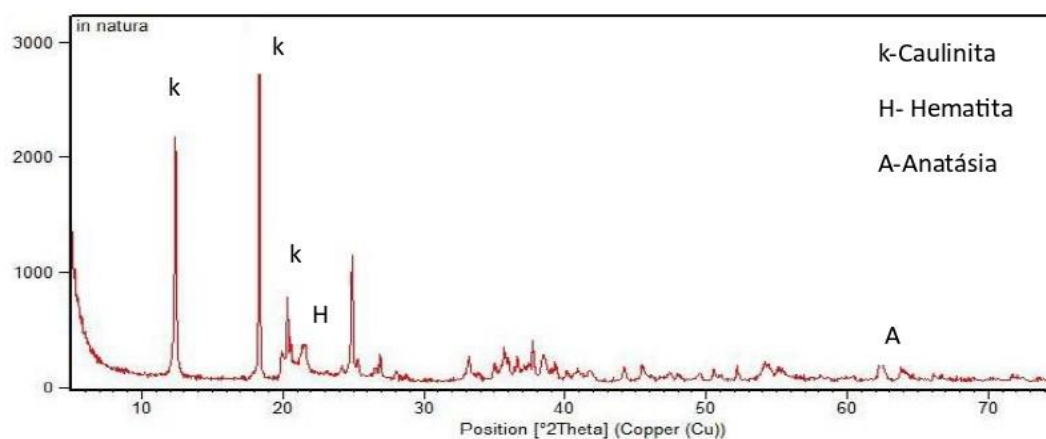
Figura 13 - Distribuição granulométrica do resíduo de RLLB 700 °C



Fonte: Os Autores, (2023)

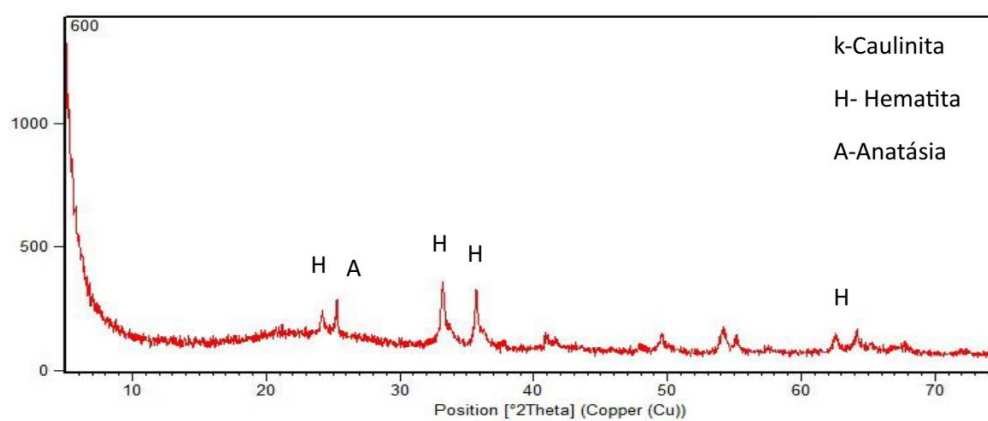
4.4 DIFRAÇÃO DE RAIOS-X

As Figuras 14, 15 e 16 apresentam a análise mineralógica das amostras de resíduo de bauxita (RB *in natura*, RLLB 600 °C e RLLB 700 °C), respectivamente. No resíduo *in natura* (Figura 14) foram detectados picos de Caulinita, gibsitita, goetita, hematita, anastásio, quartzo e calcita. Estes resultados estão de acordo com o que foi verificado por Paumgartten *et al.*, (2021) no resíduo de bauxita que foi calcinado a 600 °C, fato este que indica a presença de comportamento pozolânico.

Figura 14 - Difratoograma de raios-X da amostra RB *in natura*

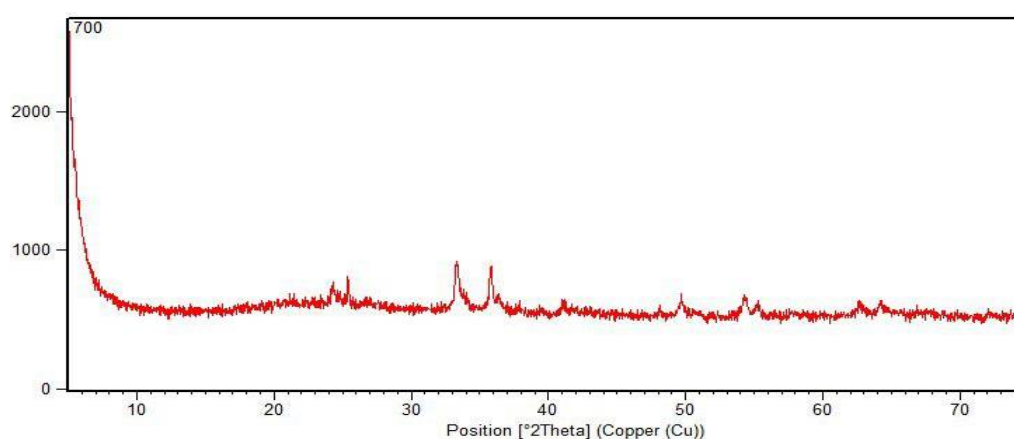
Fonte: Os Autores, (2023)

Figura 15 - Difratoograma de raios-X da amostra RLLB 600 °C



Fonte: Os Autores, (2023)

Figura 16 - Difratoograma de raios-X da amostra RLLB 700 °C



Fonte: Os Autores, (2023)

De acordo com Racanelli *et al.*, (2020), o resíduo de bauxita, em seu estado *in natura*, é composto por uma mistura de minerais de hidróxido (gibbsita, boemita e diásporo), além de impurezas como (caulinita, hematita, goetita, quartzo e anatásio). Todavia, ao passar pelo processo de calcinação, a partir da temperatura de 500 °C, o resíduo passa a apresentar o fenômeno da desidroxilação, ocorrendo a alteração da coordenação do alumínio que dá lugar ao metacaulim. Neste sentido, percebe-se que os resultados aferidos para as amostras que foram calcinadas a 600 °C e 700 °C no presente trabalho estão de acordo com o que foi observado pelos referidos autores. A partir de 600 °C verifica-se que a caulinita desaparece, dando origem a uma fase amorfa, com a presença de hematita e anatásio de pouca intensidade.

4.5 ÍNDICE DE ATIVIDADE POZOLÂNICA COM CIMENTO E CAL

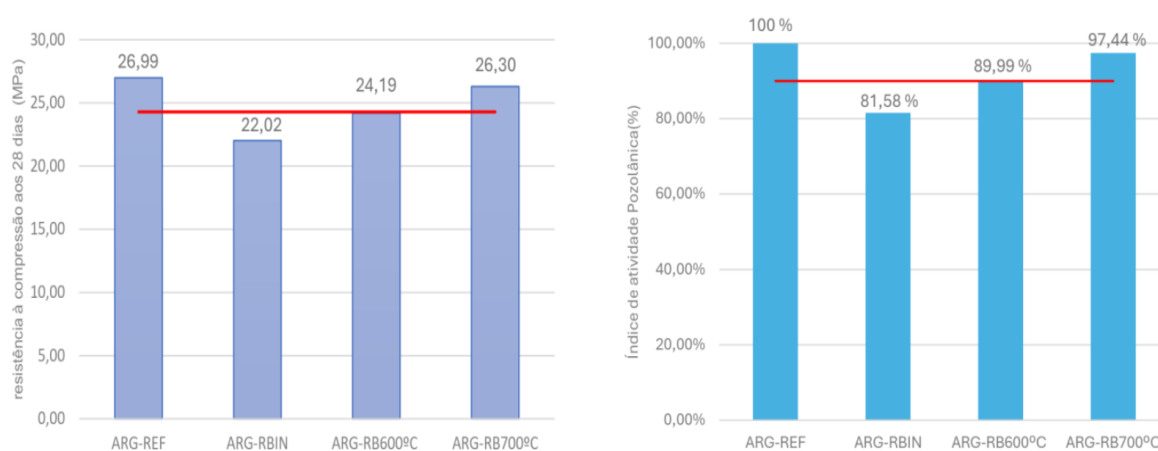
Os gráficos das Figuras 17 e 18 apresentam os resultados do ensaio de atividade pozolânica com cimento e cal, respectivamente. No primeiro caso, observa-se que houve um aumento progressivo na resistência à compressão das argamassas produzidas com resíduo de caulim calcinado. Ambas as amostras RLLB 600°C e RLLB 700°C alcançaram os 90% da resistência mecânica da argamassa de referência, conforme é especificado na NBR 5752 (ANBT, 2014).

Constatou-se que quando o resíduo de bauxita calcinado a temperaturas de 600°C e 700°C apresenta propriedades de material pozolânico, sendo possível o seu uso como adição mineral para o cimento Portland. Por outro lado, o resíduo *in natura*, neste ensaio,

não conseguiu atender ao critério especificado pela referida NBR para ser classificado como adição pozolânica.

Os resultados obtidos para o resíduo calcinado diferem do que foi encontrado por Paumgartten *et al.*, (2021), cujo resultado da pesquisa indicou que a amostra calcinada a 600 °C obteve 85,98% de resistência mecânica em relação a argamassa de referência, não atendendo, portanto, ao critério estipulado pela NBR 5752 (ABNT, 2014) para ser considerado adição pozolânica.

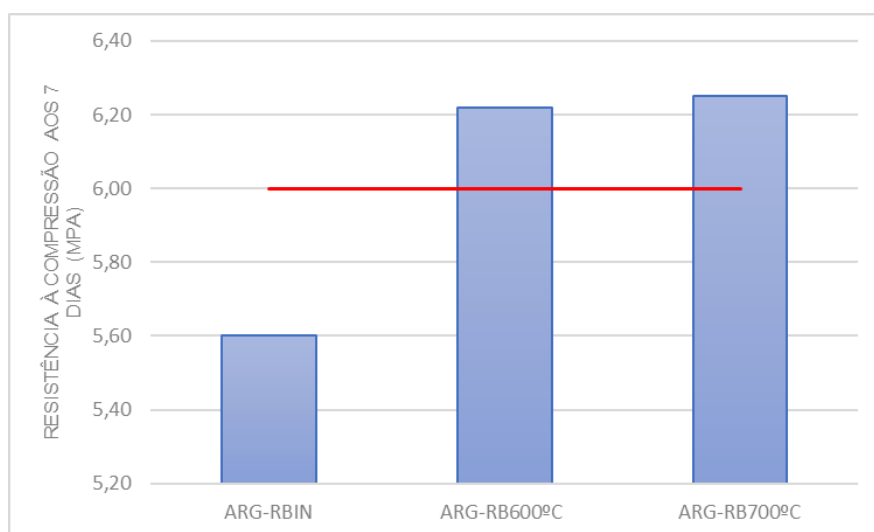
Figura 17 - Resultado do índice de atividade pozolânica com cimento



Fonte: Os Autores, (2023)

Ao analisar os resultados apresentado na Figura 17, observa-se que as argamassas produzidas apresentaram o mesmo comportamento verificado no ensaio de atividade pozolânica com cimento, onde as composições com uso de resíduo calcinado obtiveram melhor desempenho em relação a amostra que foi produzida com resíduo *in natura*. Neste caso, as argamassas RLLB 600°C e RLLB 700 °C alcançaram, aos sete dias de cura, os 6 MPa que são estipulados pela NBR 5751 (ABNT, 2015) para ser classificado como material pozolânico. Tais resultados estão de acordo com o que foi observado por Paumgartten *et al.*, (2021), para o resíduo de bauxita que foi calcinado a 600 °C. Segundo Martins (2020), isso ocorre porque a metacaulinita presente no resíduo amorfo fica mais reativa com o aumento da temperatura de calcinação e influencia diretamente no índice de atividade pozolânica das argamassas avaliadas.

Figura 18 - Resultado do índice de atividade pozolânica com cal

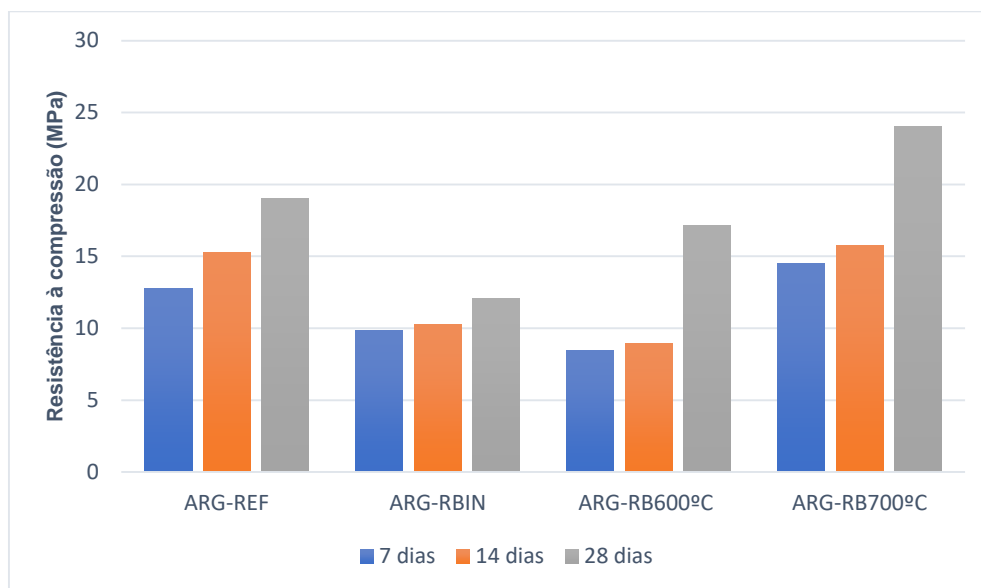


Fonte: Os Autores, (2023)

4.6 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

O gráfico da Figura 19 apresenta os resultados obtidos para resistência à compressão, ao longo do tempo, das argamassas analisadas nesta pesquisa. É possível observar que aos 7 dias de cura, a argamassa de referência, composta por cimento CPV de alta resistência inicial, apresentou um melhor desempenho em comparação com as demais amostras. No entanto, no decorrer do tempo, houve uma evolução nos resultados das argamassas produzidas com resíduo calcinado, principalmente para a composição ARG-RB700°C, que aos 28 dias, superou o valor de resistência apresentado pela argamassa padrão, alcançando um valor de 24 MPa (o equivalente a 26,31%). Os resultados estão condizentes com todos os aspectos verificados na fase de caracterização do resíduo de bauxita, pelo qual se observou que o tratamento térmico empregado com temperatura de 700°C faz com que o material apresente propriedades pozolânicas.

Figura 19 - Evolução ao longo do tempo da resistência à compressão das argamassas produzidas



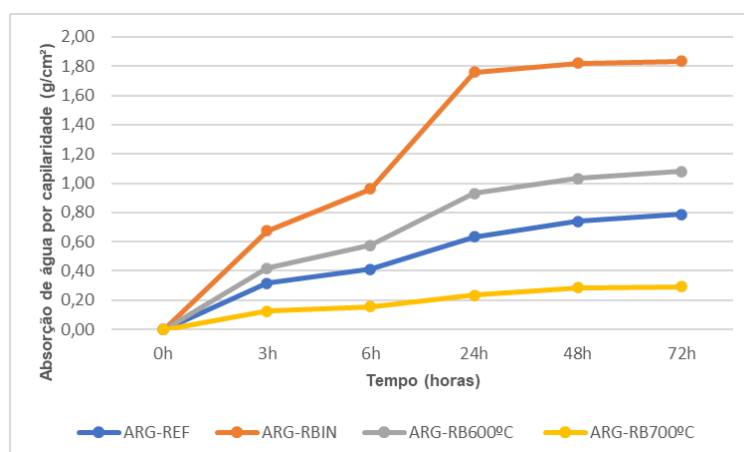
Fonte: Os Autores, (2023)

Os resultados de resistência à compressão das argamassas estão de acordo com o que já havia sido detectado por outros pesquisadores como Fortes *et al.*, (2011) que obtiveram uma resistência de 87% da argamassa de referência, para o resíduo de bauxita ativado termicamente a 400°C.

4.7 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

O gráfico da Figura 20 ilustra os resultados do ensaio de absorção por capilaridade realizado nas argamassas analisadas nesta pesquisa. É possível verificar que os resultados estão coerentes com o que foi observado no ensaio de resistência à compressão e corroboram para a explicação sobre o motivo pelo qual houve um aumento na resistência das argamassas com resíduo calcinado. Ao analisar o gráfico, constata-se que a composição ARG-RB 700°C foi a que obteve o menor índice de permeabilidade, seguido pela argamassa de referência, ARG-R B600°C e, por último, a ARG-RBIN.

Figura 20 - Evolução ao longo do tempo da absorção de água por capilaridade



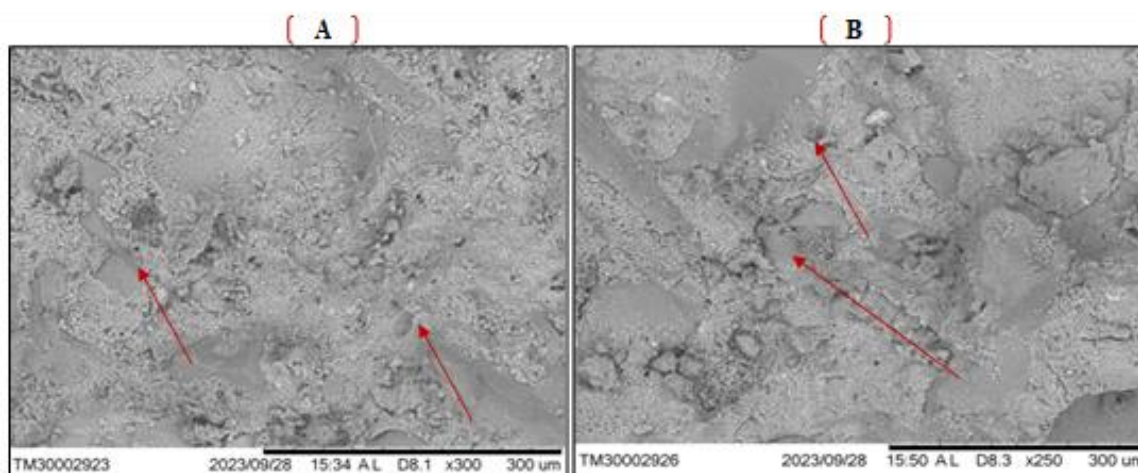
Fonte: Os Autores, (2023)

Os resultados apresentados demonstram que o resíduo de bauxita, calcinado a 700°C, é capaz de atuar no refinamento da estrutura dos poros de argamassa, devido a reação pozolânica do resíduo, reduzindo em até 38% a porosidade capilar do material. Esse efeito se reflete diretamente no aumento de resistência mecânica observado para esta composição de argamassa. Tais resultados são similares ao que foi apontado por Fortes *et al.*, (2011).

4.8 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

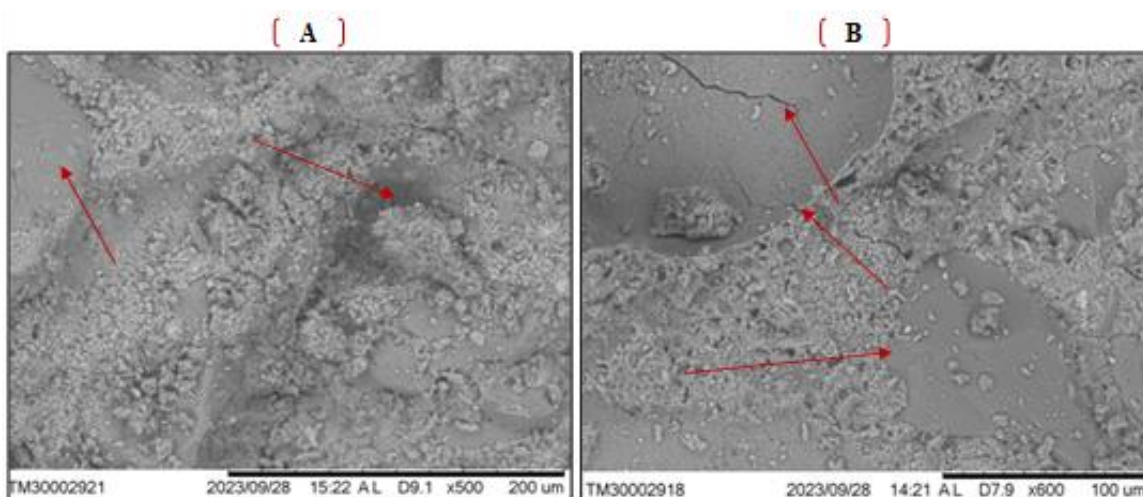
As imagens das Figuras 21 e 22 ilustram a microestrutura das composições de argamassas analisadas neste trabalho. Observa-se que, nas misturas em que foi empregado o resíduo de bauxita calcinado a 600 °C e 700 °C (Figura 21a e 21b, respectivamente), houve uma diminuição do tamanho dos poros na estrutura, fato este que está de acordo com os resultados mecânicos observados anteriormente, haja vista que a ação pozolânica do resíduo permite uma menor permeabilidade da matriz cimentícia, o que é responsável por gerar um material com menor índice de absorção e maior resistência à compressão. Também é possível observar a formação de uma pequena fissura na microestrutura da argamassa de referência (Figura 22b), bem como um alto índice de vazios na amostra composta pelo resíduo de bauxita em sua forma *in natura* (Figura 22a), demonstrando que o processo de calcinação é essencial para que haja o refinamento dos grãos do material, proporcionando assim a ativação pozolânica do resíduo.

Figura 21 - (a) ARG-RB 600°C, (b) ARG-RB 700°C



Fonte: Os Autores, (2023)

Figura 22 - (a) ARG-RBIN, (b) ARG-REF



Fonte: Os Autores, (2023)

No trabalho desenvolvido por Liberato (2013), o autor verificou que as imagens obtidas por meio de elétrons secundários das amostras de resíduo de bauxita apresentavam uma grande irregularidade na superfície das partículas, a ponto de inferir-se que se tratava de aglomerados de indivíduos menores, também observados nas laterais dos campos de imagens. No presente trabalho também foi verificado o mesmo fenômeno. Acredita-se que estas irregularidades sejam responsáveis por gerar maior área de contato para que haja um melhor processo de hidratação do cimento, gerando, portanto, uma matriz mais densa.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho alcançou o objetivo principal a que se propôs, conseguindo indicar que o resíduo de bauxita, após passar por um processo de tratamento térmico, calcinação a 600°C e 700°C, é capaz de gerar um material que pode ser utilizado como adição pozolânica em argamassas de cimento Portland.

A calcinação de Rejeito de Lama de Lavagem de Bauxita em temperatura a 600°C provoca a ativação do material através da quebra dos picos característico da caulinita, que deixa de existir devido a sua transformação em metacaulinita no estado amorfo, produto altamente pozolânico.

Verificou-se que a temperatura ótima para a sinterização do resíduo é a de 700°C. Obedecendo a esse critério, é possível utilizar o resíduo de bauxita em um percentual de substituição do clínquer de até 14% para formar um cimento pozolânico que atende aos critérios estabelecidos pela NBR 16697 (ABNT, 2018).

A composição química majoritária de Rejeito de Lama de Lavagem de Bauxita in natura e calcinada são formadas por SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 e teores superiores a 70%.

Durante a etapa de caracterização do resíduo de bauxita, observou-se que este material (na forma *in natura*) é constituído por uma mistura de minerais de hidróxido (gibbsite, boemita e diásporo), além de impurezas como (caulinita, hematita, goetita, quartzo e anatásio). O processo de calcinação é essencial para que este material passe a apresentar uma fase amorfa, com propriedades pozolânicas.

O uso do resíduo de bauxita permite a confecção de uma argamassa com menor índice de absorção por capilaridade e maior resistência à compressão, aos 28 dias de cura, fato este que foi corroborado pelos resultados verificados nas imagens microestruturais dos compósitos cimentícios.

Os resultados obtidos nesta pesquisa foram, em alguns aspectos, superiores aos verificados por outros autores que testaram o uso do resíduo de bauxita para matrizes cimentícias em trabalhos anteriores. A utilização deste material para aplicação em cimento (como adição pozolânica), além de possibilitar a redução da emissão de dióxido de carbono para atmosfera (decorrente da produção de clínquer), também possibilitaria uma alternativa economicamente mais vantajosa para a logística reversa deste subproduto. No entanto, apesar de os resultados verificados nesta pesquisa serem animadores, ainda existe um longo caminho de estudo para a verificação de outros

parâmetros relacionados ao uso do resíduo de bauxita em misturas cimentícias, principalmente no que se refere aos aspectos de durabilidade do material. Por isso, recomenda-se que sejam realizados novos estudos nesta área, visando verificar os aspectos referentes a vida útil do material. Desta forma, descreve-se seguir algumas propostas de trabalho de futuras pesquisas:

- Avaliar o desempenho do uso de rejeito de lama de lavagem de bauxita em argamassa sem uso de aditivo.
- Analisa a viabilidade técnica e econômica do resíduo, determinando a relação custo x benefício para a utilização do rejeito de lama de lavagem de bauxita como substituição ao cimento Portland.
- Estudo do potencial de utilização do rejeito de lama de lavagem de bauxita em concreto, como adição mineral.

6 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT, NBR 5752: **Materiais pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica com cimento Portland aos 28 dias**. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

_____. NBR 16605: **Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica**. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

_____. NBR 7214: **Areia normal para ensaio de cimento – Especificação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

_____. NBR 5751: **Materiais pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica com cal aos 7 dias**. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

_____. NBR 13279: **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e a compressão**. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

_____. NBR 9779: **Argamassa e concretos endurecidos – Determinação da absorção de água por capilaridade**. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

_____. NBR 12653: **Materiais pozolânicos – Requisitos**. Rio de Janeiro, 2014.

_____. NBR 16697: **Cimento Portland – Requisitos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

_____. NBR 13276: **Argamassa para assentamento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência**. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

CHRIST. R.; TUTIKAN, P.; HELENE, P. **Concreto de Ultra Alto Desempenho – UHPC: Fundamentos, propriedades e dosagem**. 1ª Ed. São Paulo/SP. Editora Leud. 2022.

CUNHA JR, A. J. P.; COSTA, D. C. L.; MACÊDO, A. N. **Análise sistemática da literatura sobre o uso do rejeito de lama vermelha para a produção de agregados sintéticos leves**. *Research, Society and Development*, v. 11, nº. 5, 2022.

CUNHA JR, A. J. P. da. **Otimização da produção de agregados sintéticos formulados a partir do uso de resíduo de bauxita mediante a aplicação do algoritmo genético**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Pará, Belém/PA, 2023.

CUNHA, R. R. da. **Emprego do resíduo de silício metálico como material pozolânico na produção de cimento Portland composto**. Tese de Doutorado – Universidade Federal do Pará, Belém/PA, 2022.

FORTES, G. M. *et al.*, **Avaliação do uso de resíduo de bauxita como aditivo pozolânico no cimento Portland**. Anais do 55º Congresso Brasileiro de Cerâmica, 29 de maio a 01 de junho de 2011, Porto de Galinhas, PE, Brasil.

GUO, T., Yang, H., Liu, Q., Hannian, G., Wang, N., Yu, W., & Dai, Y. *Adsorptive removal of phosphate from aqueous solutions using different types of red mud*. *Water Sci. Technol.* 570-577, 2018.

Instituto Brasileiro de Mineração – IBRAM. (2021). IBRAM. Disponível em: <<http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00002806.pdf>>. Acesso em: 13/07/2023.

LIBERATO. C. C. *et al.*, **Efeito da calcinação do resíduo da bauxita nas características reológicas e no estado endurecido de suspensões com cimento Portland**. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 12, n. 4, p. 53-61, out./dez. 2013.

MARTINS. W. S. **Cimento Portland como substituição parcial de cinzas do resíduo da estação de tratamento de água**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Pará, Belém/PA, 2020.

PAUMGARTTEN, M. D. V. **Resíduos industriais da Amazônia como adição mineral para cimento Portland**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Pará, Belém/PA, 2020.

PAUMGARTTEN. M. D. V. *et al.*, **Caracterização e avaliação do índice de atividade Pozolânica de lama vermelha e resíduo de manganês para produção de misturas ternárias cimentícias**. *Brazilian Journal of Development*, Curitiba, v.7, n.8, p. 85965-85979 aug. 2021.

POUEY, M. T. F. **Beneficiamento da cinza da casca de arroz residual com vistas à produção de cimento composto e/ou pozolânico.** Tese de Doutorado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2006.

RACANELLI, L. A. **Uso de lavagem de bauxita para a fabricação de ligantes geopoliméricos.** Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Pará. Belém, 2019.

REIS, A. W. **Caracterização mineralógica do agregado obtido a partir da lama vermelha do processo Bayer.** Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Pará, Belém, PA, Brasil, 2014.

ROMANO, R. C. O. *et al.*, *Combined evaluation of oscillatory rheometry and isothermal calorimetry for the monitoring of hardening stage of Portland cement compositions blended with bauxite residue from Bayer process generated in different sites in Brazil.* Rev. IBRACON Estrut. Mater., vol. 14, nº. 2, e14211, 2021.

ROSÁRIO, K. A. **Concreto com utilização de agregado graúdo sintético produzido a partir da lama vermelha: estudos de dosagem, propriedades e microestrutura.** Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Pará, Belém, PA, Brasil, 2013.

SANTOS, W. M. dos. **Mineralogia e geoquímica da bauxita derivada do anortosito.** Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Brasília, 2011.

SILVA, L.; PICANÇO, M. S. **Análise investigativa sobre o uso de resíduo de caulim para a produção de compósitos cimentícios.** ISSN 1517-7076, Revista Matéria, Rio de Janeiro, 2022.