



Mariana de Sousa Prazeres

**CIMENTO PORTLAND COM
SUBSTITUIÇÃO PARCIAL COM RESÍDUO DE
BAUXITA PARA PRODUÇÃO DE BLOCOS DE
CONCRETOS ESTRUTURAIS PARA
CONSTRUÇÃO CIVIL**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Instituto de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Dissertação orientada pelo Professor Dr. Marcelo de Souza Picanço

Belém – Pará – Brasil

2022

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

Mariana de Sousa Prazeres

Cimento Portland com substituição parcial com resíduo de bauxita para produção
de blocos de concretos estruturais para construção civil

Dissertação de Mestrado

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

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

Belém
Agosto de 2022

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Mariana de Sousa Prazeres

**TÍTULO: Cimento Portland com substituição parcial com resíduo de bauxita
para produção de blocos de concretos estruturais para construção civil**

GRAU: Mestre

ANO: 2022

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

Mariana de Sousa Prazeres

Av. Augusto Correa, nº 1, Campus Universitário do Guamá, Laboratório de Engenharia Civil, Belém, Pará. CEP 66075-970

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

P895c Prazeres, Mariana de Sousa.
Cimento portland com substituição parcial com resíduo de bauxita para produção de blocos de concreto estruturais para construção civil / Mariana de Sousa Prazeres. — 2022.
ix, 106 f. : il. color.

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

1. Concreto seco. 2. Resíduo de bauxita. 3. Filler. I. Título.

CDD 620.136

CIMENTO PORTLAND COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL COM RESÍDUO DE BAUXITA PARA PRODUÇÃO DE BLOCOS DE CONCRETOS ESTRUTURAIS PARA CONSTRUÇÃO CIVIL

AUTORA:

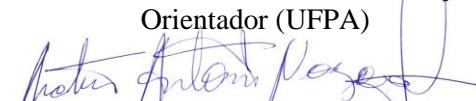
MARIANA DE SOUSA PRAZERES

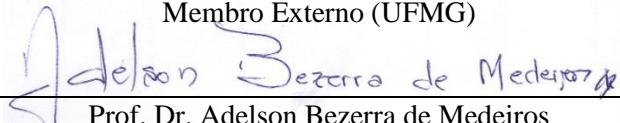
DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À BANCA
EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA CIVIL DO INSTITUTO DE
TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO
PARÁ, COMO REQUISITO PARA OBTENÇÃO DO
GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL NA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM ESTRUTURAS E
CONSTRUÇÃO CIVIL.

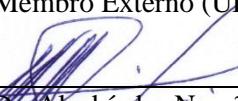
APROVADO EM: 17 / 08 / 2022.

BANCA EXAMINADORA:


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


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


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


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


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

Visto:


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

Lista de Figuras

Figura 1.1: Estrutura da dissertação.	14
Figura 2.1: Bauxita vermelha.	15
Figura 2.2: Reservas de Bauxita em diversos países.	18
Figura 2.3: Produção de bauxita entre 1998-2017....	19
Figura 2.4: Localização das minas de bauxita e refinarias em operação no Brasil.	20
Figura 2.5: Processo Bayer.....	22
Figura 2.6: Óxidos presentes em diversas lamas vermelhas.	26
Figura 2.7: (a) Distribuição granulométrica de RB brasileiro (b) Distribuição granulométrica de RBs estrangeiros.....	29
Figura 2.8:Microfotografia da LV.	30
Figura 2.9: (a) Lagoa artificial e (b) empilhamento à seco do RB.	32
Figura 2.10: Rompimento da lagoa de contenção em Ajka, em 2010.....	33
Figura 2.11: Publicações e citações sobre resíduo de bauxita entre os anos 2000-2019.	34
Figura 2.12: Bloco de concreto simples.	36
Figura 2.13: Sequência básica de funcionamento de uma vibro-prensa.....	37
Figura 3.1: Programa experimental.	47
Figura 3.2: a) Resíduo após secagem em estufa, b) após destorramento em moinho rotativo, e c) material passante após peneiramento à seco em peneira 150 µm.....	49
Figura 3.3: Detalhe do equipamento utilizado em ensaio.	53
Figura 3.4: Ensaio de absorção de água por capilaridade.	55
Figura 4.1: Distribuição de tamanho partículas do CPV-ARI.....	57
Figura 4.2: Distribuição granulométrica de pó de pedra e areia e limites da zona utilizável, conforme NBR 7211.....	60
Figura 4.3: Distribuição granulométrica da brita zero e zona inferior e superior, conforme NBR 7211.....	60
Figura 4.4: Difratrograma do resíduo de bauxita.	62
Figura 4.5: Distribuição do tamanho de partículas do resíduo de bauxita.	65
Figura 4.6: Comparação entre distribuição do tamanho de partículas do resíduo de bauxita e CP V ARI.	65
Figura 4.7: Microfotografia do resíduo de bauxita, ampliação em x500.	67
Figura 4.8: Microfotografia do resíduo de bauxita, ampliação em x1000.	67
Figura 4.9: Partícula analisada com EDS.	68
Figura 4.10: Elementos prevalentes na partícula analisada.....	68
Figura 4.11: Agregados antes (a) e depois (b) da mistura para elaboração da curva de menor volume de vazios.	69
Figura 4.12: Relação entre volume de vazios e porcentagem de pedrisco presente na composição.	70
Figura 4.13: Corpo de prova do concreto seco após desmolde.	71
Figura 4.14: Traço piloto sem adição de RB.	73
Figura 4.15: Traço com adição de 5% de RB.....	73
Figura 4.16: Traço com adição de 10% de RB.....	74
Figura 4.17: Traço com adição de 15% de RB.....	74
Figura 4.18: Traço com adição de 20% de RB.....	75
Figura 4.19: Teste de coesão finalizado em RB20.	76

Figura 4.20: CPs de RB20 após ensaio de resistência à compressão.	77
Figura 4.21: CPs de RB0 após ensaio de resistência à compressão.	77
Figura 4.22: Resistência à compressão média com diferentes teores de RB nas idades de cura de 3, 7 e 14 dias.	79
Figura 4.23: Resistência à compressão diametral média com diferentes teores de resíduo aos 14 dias de hidratação.	80
Figura 4.24: Absorção média de água por capilaridade em relação ao tempo de leitura.	81
Figura 4.25: Índice de vazios em relação ao teor de resíduo de bauxita incorporado.	83
Figura 4.26: Massa específica real em relação ao teor de resíduo incorporado.	83
Figura 4.27: Absorção por imersão média em relação ao teor de resíduo incorporado.	84

Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Minerais de alumínio contidos nas bauxitas.....	17
Tabela 2.2: Classificação das bauxitas ao redor do mundo.....	17
Tabela 2.3: Produção bruta de bauxita nos principais estados brasileiros.....	21
Tabela 2.4: Produção beneficiada de bauxita nos principais estados brasileiros ..	21
Tabela 2.5: Fases mineralógicas de resíduos com origens distintas.....	27
Tabela 2.6: Intervalo de fases mineralógicas para o RB.	28
Tabela 2.7: Área superficial específica e análise do tamanho das partículas de resíduos diversos.	29
Tabela 2.8: Densidades de lamas vermelhas ao redor do mundo.	30
Tabela 2.9: Incidentes com lama vermelha em diferentes países.....	32
Tabela 2.10: Matéria-prima utilizada na fabricação de blocos de concreto.	39
Tabela 2.11: Requisitos para blocos de concreto no Brasil.....	42
Tabela 2.12: Resumo de características obrigatórias e opcionais para normas diversas	42
Tabela 2.13: Tabela resumo de estudos internacionais com resíduos industriais na composição de blocos de concreto.	45
Tabela 3.1: Resumo dos ensaios de caracterização realizados.	51
Tabela 3.2: Resumo da etapa II.	55
Tabela 4.1: Óxidos presentes no CPV-ARI e limites especificados da norma brasileira.	56
Tabela 4.2: Parâmetros físicos obtidos do CPV-ARI	57
Tabela 4.3: Resultados do peneiramento das amostras 1 e 2 de areia.....	58
Tabela 4.4: Resultados do peneiramento das amostras 1 e 2 de pó de pedra.	58
Tabela 4.5: Resultados de peneiramento para amostras 1 e 2 de brita zero.	58
Tabela 4.6: Resultados para D.M.C., M.F. e massas específica e unitária dos agregados.	59
Tabela 4.8: Fases mineralógicas identificadas no resíduo de bauxita.	61
Tabela 4.9: Comparação entre fases mineralógicas encontradas neste estudo e na literatura.....	63
Tabela 4.10: Comparação entre óxidos presentes em resíduos de bauxita distintos.	64
Tabela 4.11: Resultados de granulometria e densidade.....	66
Tabela 4.12: Resultados de volume de vazios obtidos com porcentagens diversas de agregados.	69
Tabela 4.13: Testes piloto realizados e proporção de materiais para concreto.	70
Tabela 4.14: Resultados obtidos de resistência à compressão e massa os testes piloto.....	71
Tabela 4.15: Resumo de consumo dos materiais conforme traço.	72
Tabela 4.16: Valores de coesão obtidos para cada composição.	76

Lista de abreviações e siglas

Símbolo	Significado
ABAL	Associação Brasileira de Alumínio
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AMB	Anuário Mineral Brasileiro
ANOVA	Análise de Variância
AS/NZS	<i>Australian Standards/New Zealand Standards</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BET	Brunauer, Emmet e Taller
CP	Corpo de Prova
CP V ARI	Cimento Portland V Alta Resistência Inicial
DRX	Difração de Raios-X
FRX	Fluorescência de Raios-X
IAI	<i>International Aluminium Institute</i>
IEA	<i>International Energy Agency</i>
MEV	Microscopia Eletronica de Varredura
MPa	Megapascal
NBR	Norma Brasileira
NM	Norma Mercosul
RB	Resíduo da Bauxita
UNEP	<i>United Nations Environment Programme</i>
USEPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>
USGS	<i>United States Geological Survey</i>

AGRADECIMENTOS

Aos meus irmãos, Maurício e Carol, e meu pai, José Ribamar, por incentivarem a carreira acadêmica e entenderem os momentos de distância e ausência.

Às minhas amigas de infância que por muitas vezes, em conversas cotidianas e simples, me divertiram e descontraíram nos momentos mais difíceis desta jornada.

À minha namorada, Camila, que me deu forças do início ao fim deste desafio.

Aos meus amigos do Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil da UFPA que estiveram ao meu lado nos últimos anos, acompanhando e incentivando a buscar, ler e conhecer novos horizontes no mundo da pesquisa acadêmica.

Ao professor Marcelo Picanço que sempre esteve disponível para orientar e ajudar.

Ao professor Wener dos Santos e ao seu grupo de pesquisa, pela disponibilidade, paciência e pela doação de matéria-prima, fundamental para o desenvolvimento deste estudo.

Ao grupo de pesquisa BIOMMA, do curso de Odontologia da Universidade Federal do Maranhão, que disponibilizou equipamentos para análise de dados deste trabalho.

Ao Laboratório de Concreto e Materiais da Universidade Estadual do Maranhão (LABCOM/UEMA) e ao Jurandir, que sem seu auxílio e disponibilidade este trabalho não seria finalizado.

A Fundação de Amparo à Pesquisa e ao Desenvolvimento Tecnológico do Maranhão (FAPEMA), pela bolsa de mestrado concedida para desenvolvimento deste trabalho.

A todos que contribuíram direta ou indiretamente neste trabalho.

RESUMO

As emissões de gases poluentes durante a fabricação de cimento representam um valor expressivo das emissões antropogênicas. Uma forma de mitigar a poluição gerada na fabricação do cimento, e reduzir passivos ambientais provenientes de outros processos é a incorporação de resíduos industriais na composição de cimentos ou concretos. A incorporação de materiais alternativos (cinza volante, escória de alto forno, sílica ativa e *filler* calcário) é limitada, logo, novos materiais devem ser considerados. O resíduo de bauxita (RB) é obtido a partir da produção de alumina, e se apresenta como uma alternativa viável por haver volume considerável disponível deste resíduo. Outros pesquisadores avaliaram o uso de RB como *filler* ou adição mineral em concretos convencionais, mas há uma lacuna em estudos que utilizem o resíduo como *filler* em concretos secos, ou seja, baixo teor de umidade na composição. Este estudo considerou o uso de RB como adição mineral em concreto seco, considerando a substituição parcial em 5 %, 10 %, 15 % e 20 % de massa do cimento, além de adotar o método de produção de blocos de concreto estruturais. Os aspectos mecânicos e físicos dos corpos de prova moldados foram avaliados conforme as especificações da NBR 6136. A resistência à compressão e à tração não foram afetadas, exceto aos 7 dias de hidratação na resistência à compressão. A avaliação estatística por ANOVA demonstrou que ao adicionar porcentagens de RB na composição não há alteração nas propriedades mecânicas. A absorção por capilaridade reduz conforme acréscimo de RB, enquanto a absorção de água, massa específica e índice de vazios aumentam. Apesar de alterar os parâmetros físicos, estes são compatíveis com os requisitos mínimos da NBR 6136, sendo possível fabricar blocos de concreto com RB na composição.

Palavras-chave: Concreto Seco; Resíduo de Bauxita; *Filler*.

ABSTRACT

Emissions of greenhouse gases during the manufacture of cement represent an expressive value of anthropogenic emissions. One way to mitigate the pollution generated in the process is the incorporation of industrial residues in cements or concretes, reducing binder consumption. However, the incorporation of alternative materials (fly ash, blast furnace slag, silica fume and limestone) is limited, so new materials must be considered. Bauxite residue (BR) is obtained from the production of alumina, and presents itself as a viable alternative due to its considerable available volume. Other researchers evaluated BR as a filler or mineral addition in conventional concrete, but there is a gap in its use as a filler in dry concrete, that is, low moisture content in the composition. This research considered BR as a mineral addition in dry concrete with partial replacement of cement mass in 5%, 10%, 15% and 20%. The production method for concrete blocks was also considered during specimens' casting. The mechanical and physical aspects of the molded specimens were evaluated according to the specifications of NBR 6136. Although the addition of RB affects physical and mechanical properties, the parameters are compatible with the minimum requirements of NBR 6136, therefore, it is possible to manufacture concrete blocks with RB in the mix.

Keywords: Dry Concrete; Bauxite Residue; Filler.

SUMÁRIO

Capítulo	Página
1. INTRODUÇÃO	9
1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS	9
1.2. OBJETIVOS.....	12
1.2.1. Objetivo Geral	12
1.2.2. Objetivos Específicos	12
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	13
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1. BAUXITA	15
2.1.1. Classificação da bauxita	16
2.1.2. Reservas e exploração de bauxita no Brasil e no mundo	17
2.2. PROCESSO BAYER.....	21
2.3. RESÍDUO DA BAUXITA	25
2.3.1. Composição química e fases mineralógicas	25
2.3.2. Características físicas	28
2.3.3. Morfologia.....	30
2.3.4. Métodos de armazenamento	31
2.3.5. Desastres ambientais.....	32
2.3.6. Estudos e aplicações do resíduo da bauxita.....	33
2.3.7. Resíduo de bauxita como filler em matrizes cimentícias	35
2.4. BLOCOS DE CONCRETO.....	36
2.4.1. Métodos de produção	36
2.4.2. Métodos de dosagem	38
2.4.3. Normatizações nacionais e internacionais	41
2.4.4. Estudos em blocos de concreto.....	43
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	46
3.1. MATERIAIS	48
3.2. MÉTODOS	49
3.2.1. Etapa I - Caracterização dos materiais	49
3.2.2. Etapa II – Estudo de dosagem	52

3.2.3.	Etapa III – Substituição parcial do cimento.....	52
3.2.3.1.	Critérios avaliados para o concreto no estado fresco	53
3.2.3.2.	Critérios avaliados para o concreto no estado endurecido	53
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	56
4.1.	ETAPA I – CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	56
4.2.	ETAPA II – ESTUDO DE DOSAGEM	68
4.2.1.	Definição do traço piloto	68
4.3.	ETAPA III – SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE CIMENTO POR RESÍDUO DE BAUXITA	72
4.3.1.	Coesão	75
4.3.2.	Resistência à compressão	76
4.3.3.	Resistência à tração por compressão diametral	80
4.3.4.	Absorção de água por capilaridade.....	81
4.3.5.	Índice de vazios, absorção por imersão e massa específica real	
	82	
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS E ESTUDOS FUTUROS	85
5.1.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	85
5.2.	ESTUDOS FUTUROS	86
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	87

1. INTRODUÇÃO

1.1.Considerações gerais

A importância do concreto como material de construção é indiscutível. Características como resistência à água, facilidade para moldagem em peças ou elementos estruturais, e principalmente, o baixo custo dos materiais componentes do concreto tornam este compósito amplamente utilizado, estimando-se um consumo de 11 bilhões de toneladas por ano (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

O concreto é fabricado a partir da proporção entre agregados, um ligante e água. A mistura entre água e ligante, também chamada de pasta, inicia o processo químico de hidratação com a formação de grãos, preenchendo os vazios entre agregados e conectando os componentes agregados e pasta (PORTLAND CEMENT ASSOCIATION, 2020).

O Cimento Portland, ligante principal utilizado na fabricação de concreto, é constituído de clínquer de cimento moído e aproximadamente 5% de gesso. O clínquer é obtido a partir da calcinação de uma fonte de cálcio (calcário) em conjunto com uma fonte de sílica e alumina (argila, areia) em um forno rotativo em temperatura de 1450 °C. Durante a queima da matéria-prima e formação do clínquer há a formação de gases poluentes, devido à decomposição do carbonato de cálcio (CaCO_3) em óxido de cálcio (CaO) e gás carbônico (CO_2) (NAQI; JANG, 2019; SCRIVENER; JOHN; GARTNER, 2018).

A manufatura do clínquer é responsável por 5-8 % da emissão antropogênica de gás carbônico na atmosfera (GLOBAL CEMENT AND CONCRETE ASSOCIATION, 2022). Estima-se ainda que o processo de urbanização e crescimento em países ainda em desenvolvimento eleve o consumo de cimento, e consequentemente concreto, atingindo o patamar de 18 bilhões de toneladas deste último até o ano de 2050. (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A indústria cimentícia tem como meta a descarbonização total no setor até 2050. Esta meta está alinhada com um dos objetivos do Acordo de Paris, que prevê uma limitação no acréscimo da temperatura global em até 1,5 °C, para redução significativa dos riscos e impactos causados pelas mudanças climáticas (UNITED NATIONS, 2015; WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT, 2002).

Além da preocupação com emissão de gases poluentes, a indústria cimentícia também contribui para o consumo e exaustão de recursos naturais minerados não renováveis (MOHAMAD et al., 2021) sendo aproximadamente 1,5 tonelada de matéria-prima consumida para produzir cerca de 1 tonelada de cimento (WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT, 2002)

A substituição parcial de clínquer e cimento por materiais alternativos, tais como adições minerais ou materiais suplementares cimentícios, é um método viável para reduzir o consumo e os impactos gerados por este ligante tradicional. Cinza volante, escória de alto forno, sílica ativa e *filler* calcário estão entre os materiais utilizados como alternativa ao clínquer e cimento (ABDUL-WAHAB et al., 2021; NAQI; JANG, 2019)

Os subprodutos industriais vem sendo incorporados como substitutos parciais de clínquer e cimento para mitigar a poluição gerada durante a produção do cimento. Scrivener; John e Gartner (2018) apresentam os valores de substituição de clínquer nos últimos 25 anos. O teor de substituição de cinza volante (4%) e escória (5%) vem se estabilizando nos últimos anos devido ao limite disponível destes subprodutos, relativamente inferior à produção total de cimento. Assim, novos materiais suplementares devem ser considerados e avaliados para incorporação em cimentos e concretos.

O resíduo da bauxita (RB) é produzido durante a etapa de clarificação do processo Bayer, método utilizado para obtenção de alumina. Mesmo com o grande volume disponível e uma estimativa de 120 milhões de toneladas geradas do resíduo anualmente (POWER; GRÄFE; KLAUBER, 2011), ainda não há uma alternativa definitiva que absorva proporções volumétricas significativas do resíduo.

O uso do RB como material suplementar cimentício durante a produção de clínquer foi considerado por diversos pesquisadores, entretanto Pontikes e Angelopoulos (2013) explanaram que não há uma porcentagem bem definida para incorporação do resíduo no clínquer, variando entre 0,5-8% em massa. A limitação de incorporação em clínquer está relacionada ao elevado teor alcalino do resíduo, prejudicial durante a formação de outras fases mineralógicas no processo de clinquerização.

Outra vertente disponível é o uso do RB com substituição parcial de cimento como adição mineral. Estudos considerando RB seca e calcinada em temperaturas distintas como substituto parcial ao ligante foram realizados por Manfroi, Cheriaf

e Rocha (2014), porém a necessidade de calcinação pode dificultar a incorporação do resíduo em processos industriais. Romano *et al.* (2018) e Ribeiro *et al.* (2011) consideraram o uso do resíduo como *filler* em matrizes cimentícias convencionais, sem calcinação do material, alcançando um teor de 15-20% de substituição da massa de cimento.

Em estudo recente, Romano *et al.* (2020) consideraram o uso de RB como *filler* em composição para ladrilhos hidráulicos, peças fabricadas com concreto seco (baixo teor de umidade na mistura). Este tipo de aplicação torna-se interessante ao observar uma redução significativa (sem alterações nas propriedades mecânicas até 20% de incorporação do resíduo) do consumo de cimento, bem como a possibilidade de implantar o RB em fabricações de peças pré-moldadas em larga escala, visando a valorização do resíduo.

Apesar de interessante, poucas pesquisas são encontradas considerando a aplicação do resíduo em peças de concreto seco. O presente trabalho tem como foco investigar o uso do RB como *filler* em matriz cimentícia de concreto seco, com ênfase na fabricação de blocos de concreto. Além de agregar informações para a literatura nacional e internacional, a incorporação do resíduo visa contribuir para sua valorização ao utilizá-lo como matéria-prima, reduzir o consumo de cimento na fabricação de produtos cimentícios e o passivo ambiental gerado ao armazenar o RB.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo Geral

Este estudo tem como objetivo geral avaliar a possibilidade de substituição parcial do cimento por RB em concreto seco, considerando as especificações para blocos de concreto, conforme a normatização brasileira vigente.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar os materiais utilizados na produção do concreto seco, conforme normas brasileiras vigentes, e o resíduo de bauxita aplicado neste estudo;
- Elaborar a dosagem entre os materiais adotados para fabricação de concreto seco;
- Avaliar as respostas físicas e mecânicas conforme o incremento de resíduo de bauxita na composição;

1.3.Estrutura da dissertação

O presente trabalho é segmentado em seis capítulos, os quais abordam: introdução, revisão bibliográfica, programa experimental, resultados e discussões, conclusão e referencial bibliográfico.

O primeiro capítulo propõe uma introdução geral ao tema, justificativa da escolha do tema, seguido pela delimitação dos objetivos geral e específicos do estudo.

O segundo capítulo expõe a revisão bibliográfica conforme a literatura nacional e internacional referente à bauxita, ao processo Bayer, ao RB, aos estudos realizados na área de materiais de construção visando aproveitamento do resíduo. Além das informações sobre a bauxita, este item também aborda os blocos de concreto, seus componentes, as especificações conforme as normatizações vigentes brasileiras e internacionais, métodos de dosagem e fabricação.

O terceiro capítulo aborda o programa experimental delimitado conforme análise da literatura do capítulo anterior. O programa é seccionado em três etapas: a caracterização dos materiais utilizados, o estudo de dosagem, e por fim, a moldagem e avaliação física e mecânica de composições com teores diversos de RB. As etapas serão tratadas com maior solidez em seu respectivo capítulo.

O quarto capítulo apresenta os resultados, em tabelas e gráficos, do programa experimental segundo metodologia exposta no capítulo anterior, conforme a normatização brasileira e internacional.

O quinto capítulo trata-se da análise e interpretação dos resultados obtidos no quarto capítulo, de forma a identificar aspectos favoráveis ou desfavoráveis aos objetivos do estudo. Considerações finais sobre próximos estudos e perspectivas futuras do tema abordado serão apresentadas.

O sexto capítulo reúne e apresenta as referências bibliográficas utilizadas como base científica para este estudo. A Figura 1.1 abaixo configura a estrutura e organização desta dissertação.

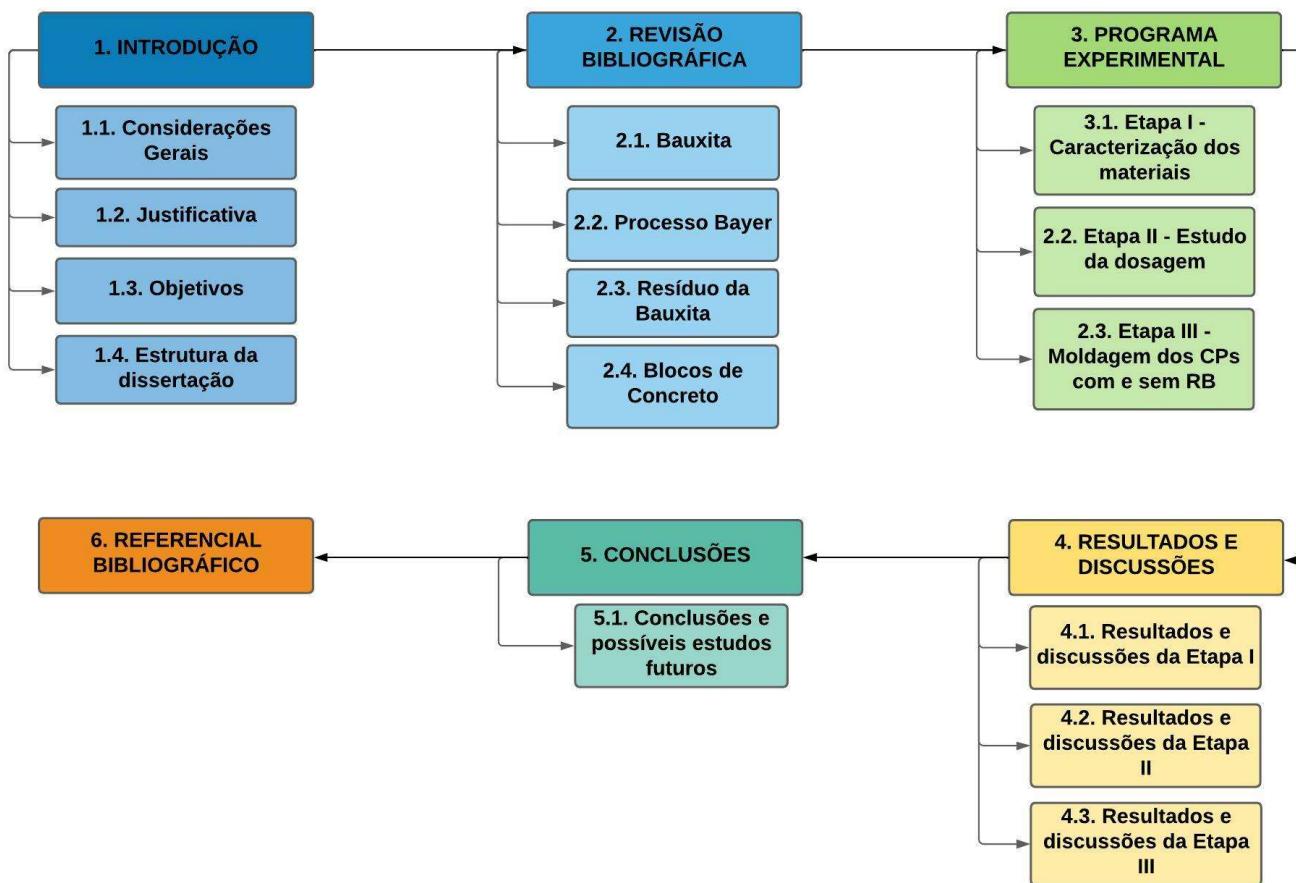


Figura 1.1: Estrutura da dissertação.

Fonte: (AUTORA, 2022).

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1.Bauxita

A bauxita foi denominada por Pierre Berthier, geólogo e mineralogista francês, em 1821. O termo foi utilizado para caracterizar um material avermelhado argiloso, composto principalmente por óxido de alumínio [Al_2O_3] e com pouca sílica [SiO_2] em sua composição, encontrado na cidade de *Les Baux*, localizada no sudeste da França. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO, 2017a; GOW; LOZEJ, 1993)

A bauxita é definida como um material heterogêneo de ocorrência natural, rico em minerais de hidróxido de alumínio além de diversas misturas de sílica, óxido de ferro, titânio e outras impurezas em menores quantidades. Os principais minerais de hidróxido de alumínio são a gibbsita [$\text{Al}(\text{OH})_3$], boehmita [$\gamma - \text{AlO(OH)}$] e diáspera [$\alpha - \text{AlO(OH)}$]. Alguns minerais secundários, ou impurezas, encontrados são a hematita [Fe_2O_3], goetita [FeO(OH)], quartzo [SiO_2] e anatase [TiO_2] (INTERNATIONAL ALUMINIUM INSTITUTE, 2015; UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY, 2019).

A formação da bauxita depende principalmente dos aspectos climáticos, sendo o clima tropical favorável para o processo de degradação natural. A lixiviação ocorre nos silicatos e argilominerais que são decompostos enquanto os óxidos de alumínio e ferro são concentrados, resultando assim, na rocha bauxita. A rocha apresenta uma coloração avermelhada, a qual varia conforme o teor de óxidos de ferro [Fe_2O_3] presente. A bauxita vermelha é ilustrada na Figura 2.1. As bauxitas brancas contêm um teor entre 2 a 4% de óxido de ferro, enquanto as bauxitas vermelhas possuem até 25%. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO, 2017a; SAMPAIO; DE ANDRADE; DUTRA, 2008)



Figura 2.1: Bauxita vermelha.

Fonte: (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO, 2017)

A bauxita é utilizada principalmente para a obtenção do alumínio metálico, e apesar de possuir impurezas, este minério é abundante em diversas regiões do mundo e sua exploração ocorre com maior facilidade devido às suas características físicas. Rochas de bauxita são destorreadas e moídas facilmente quando comparadas aos outros minérios ricos em alumínio, sendo fontes de alumínio mais adequadas para a exploração à nível industrial (RUY'S, 2019).

2.1.1. Classificação da bauxita

2.1.1.1. Mineralogia

A classificação conforme a mineralogia da bauxita ocorre a partir do tipo de mineral de hidróxido de alumínio presente predominante na bauxita. A formação dos minerais está relacionada com as condições climáticas e geológicas da região de origem, segundo Sampaio, De Andrade e Dutra (2008), Gow e Lozej (1993), logo, as bauxitas gibásicas ($[Al(OH)_3]$), boemíticas ($[\gamma - AlO(OH)]$) e diaspóricas ($[\alpha - AlO(OH)]$) podem ocorrer em regiões com clima e formação geológica distintas entre si.

A principal diferença entre os minerais predominantes é sua estrutura cristalina, ou seja, a organização espacial periódica dos átomos e moléculas. Embora possuam composições químicas semelhantes, a gibbsita possui um sistema cristalino monoclinico, enquanto a boehmita e diáspora possuem um sistema cristalino ortorrômbico. Esta diferença interfere nas propriedades físicas e mecânicas, tais como dureza, densidade (CALLISTER, 2000; SAMPAIO; DE ANDRADE; DUTRA, 2008), entre outras, conforme a Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Minerais de alumínio contidos nas bauxitas.

Mineral	Gibbsita	Boehmita	Diáspora
Fórmula química	Al(OH)_3	$\gamma - \text{AlO(OH)}$	$\alpha - \text{AlO(OH)}$
$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}$	1:3	1:1	1:1
Sistema cristalino	Monoclínico	Ortorrombico	Ortorrombico
Dureza Moh	2,5-3,5	3,5-4,0	6,5-7,0
Densidade	2,42	3,01	3,44
Produto de desidratação	$\text{Al}_2\text{O}_3 - x$	$\text{Al}_2\text{O}_3 - y$	$\text{Al}_2\text{O}_3 - \alpha$
Temperatura de desidratação	150	350	450

Fonte: (HABASHI, 1993 *apud* SAMPAIO; DE ANDRADE; DUTRA, 2008).

A Tabela 2.2 apresenta a classificação das bauxitas encontradas em diversos países. Nota-se a predominância de bauxita gibsítica em países sul-americanos e africanos que possuem clima tropical, enquanto outros países europeus, ocidentais e orientais com clima temperado, minerais como boehmita e diáspora são predominantes (PATEL; PAL, 2015; RAI et al., 2012).

Tabela 2.2: Classificação das bauxitas ao redor do mundo.

Gibsítica	Boemítica	Diaspórica
Austrália, Brasil, Gana, Guiana, Índia (costa leste), Jamaica, Indonésia, Malásia, Serra Leoa, Suriname, Venezuela	Austrália, Guiné, Hungria, Rússia, Iugoslávia, Índia (parte central)	China, Grécia, Guiné, România, Turquia

Fonte: (RAI et al., 2012)

2.1.2. Reservas e exploração de bauxita no Brasil e no mundo

A disponibilidade mundial de reservas da bauxita é uma das justificativas para a sua exploração. Conforme o Sumário de *Commodities Minerais* da *United States Geological Survey – USGS* (2020), o Brasil possui a quarta maior reserva de bauxita mundial, com 2,6 bilhões de toneladas, atrás da Guiné (7,4 bilhões de toneladas), Austrália (6 bilhões de toneladas) e Vietnã (3,7 bilhões de toneladas). A Figura 2.2

retrata comparativamente as reservas de diversos países, bem como o total mundial de reservas, este último sendo de 30 bilhões de toneladas.

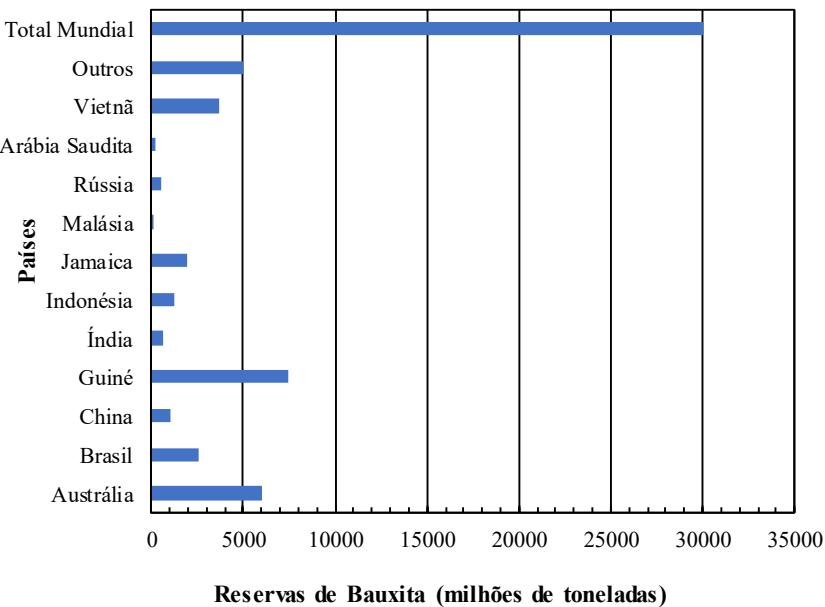


Figura 2.2: Reservas de Bauxita em diversos países.

Fonte:(UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY, 2020)

Os cinco principais países produtores de bauxita, conforme dados da USGS (2019) entre os anos 1998-2017 são retratados na figura 2.3, e representam entre 68% a 86% da produção total mundial. O Brasil manteve-se entre os cinco maiores produtores, com um total de 38 milhões de toneladas exploradas apenas no ano de 2017, destacando-se no cenário internacional.

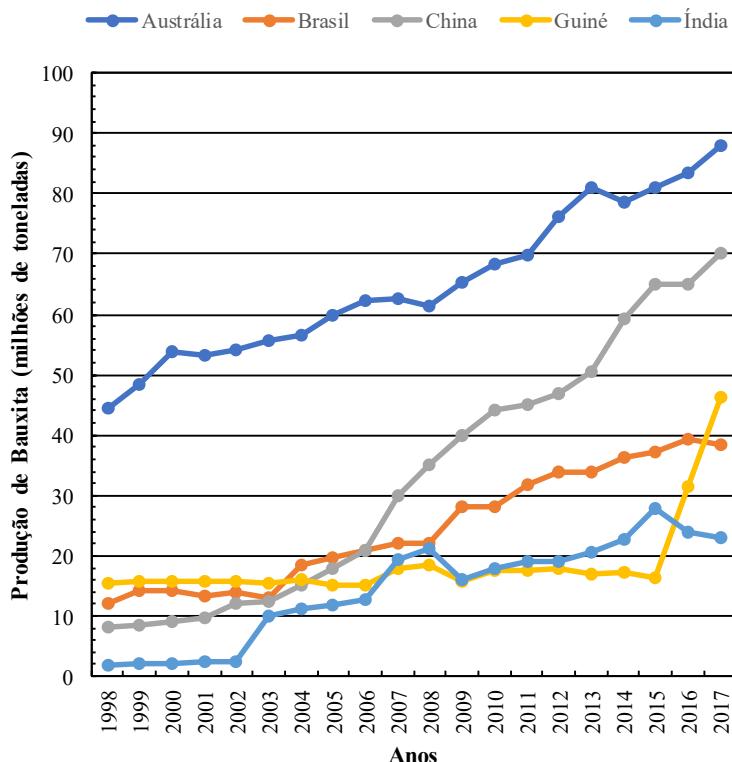


Figura 2.3: Produção de bauxita entre 1998-2017.

Fonte: (UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY, 2019).

A exploração da bauxita brasileira ocorre majoritariamente na região Norte do país, especificamente o Estado do Pará, entretanto, outras regiões do país também contribuem para o cenário nacional, ainda que em menor quantidade. Conforme dados da ABAL (Figura 2.4), as principais minas de bauxita em operação estão localizadas nos estados do Pará (Juriti, Paragominas, Oriximiná, Faro e Terra Santa), Goiás (Barro Alto) e Minas Gerais (Poços de Caldas, Cataguases, Miraí, Ouro Preto e Itamarati de Minas).



Figura 2.4: Localização das minas de bauxita e refinarias em operação no Brasil.

Fonte:(ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO, 2017b)

As Tabela 2.3 e Tabela 2.4 apresentam dados sobre os teores médios de alumina, a produção bruta, na qual o minério é contabilizado diretamente da mina sem receber qualquer tipo de beneficiamento, e a produção beneficiada, referente à produção anual das usinas de tratamento, em território nacional no ano de 2017, conforme o Anuário Mineral Brasileiro – AMB (BRASIL, 2018). Os dados de produção, nos respectivos estados, são compatíveis com as localidades anteriormente citadas como pontos de minas de bauxita no Brasil (Figura 2.4).

Com teor médio de óxido de alumínio em 47% (Tabela 2.3), a bauxita brasileira apresenta qualidade e sua exploração torna-se uma atividade econômica lucrativa, visto que a viabilidade da exploração é relacionada com o teor de alumina aproveitável, sendo acima de 30% conforme a ABAL (2017a).

Tabela 2.3: Produção bruta de bauxita nos principais estados brasileiros.

Estados	Quantidade (t)	Contido (t)	Teor Médio de Al₂O₃ (%)
Pará	45.570.808	21.747.257	47,72
Minas Gerais	2.620.668	1.056.207	40,30
Goiás	827.800	445.987	53,88
São Paulo	680.674	273.502	40,18
Santa Catarina	14.989	6.745	45,00
Total	49.714.940	23.529.698	47,33

Fonte: (BRASIL, 2018)

Os cinco principais Estados na produção bruta da bauxita pertencem às regiões Norte (Pará), Sudeste (São Paulo e Minas Gerais), Centro-Oeste (Goiás) e Sul (Santa Catarina), entretanto, apenas três (Pará, Goiás e Minas Gerais) são produtores de grande parcela da bauxita beneficiada. O Estado do Pará representa cerca de 92% da produção bruta e 94% da produção beneficiada de bauxita, ratificando sua importância no cenário nacional.

Tabela 2.4: Produção beneficiada de bauxita nos principais estados brasileiros.

Estados	Quantidade (t)	Contido (t)	Teor Médio de Al₂O₃ (%)
Pará	34.101.036	16.633.375	48,78
Minas Gerais	1.445.734	605.657	41,89
Goiás	828.800	444.848	53,67
Total	36.375.570	17.683.880	48,61

Fonte: (BRASIL, 2018)

2.2.Processo Bayer

Em 1887, o químico austríaco Karl Josef Bayer desenvolveu uma patente que tratava da obtenção de alumina a partir da bauxita. O método utilizava uma solução concentrada de soda cáustica [NaOH] em elevadas temperatura e pressão, com a bauxita na mistura para obtenção de solução de aluminato de sódio [NaAl(OH)₄] com posterior precipitação da alumina em forma cristalina. (HABASHI, 1988; POWER; GRÄFE; KLAUBER, 2011).

A alumina é utilizada para a fabricação do alumínio em escala industrial a partir de outro processo, a redução eletrolítica (Processo Hall-Heroult), conforme

citam Gow e Lozej (1993). Os princípios químicos desenvolvidos por Bayer permitiram o crescimento e desenvolvimento da indústria do alumínio e continuam sendo aplicados nas plantas de refinamento modernas, mesmo após 133 anos da sua criação (POWER; GRÄFE; KLAUBER, 2011).

O processo Bayer é segmentado em sete processos gerais: moagem, dessiliculação, digestão, clarificação, precipitação, classificação e calcinação, conforme o IAI (2018). Ressalta-se que algumas plantas de refinamento podem apresentar processos extras conforme a necessidade local.

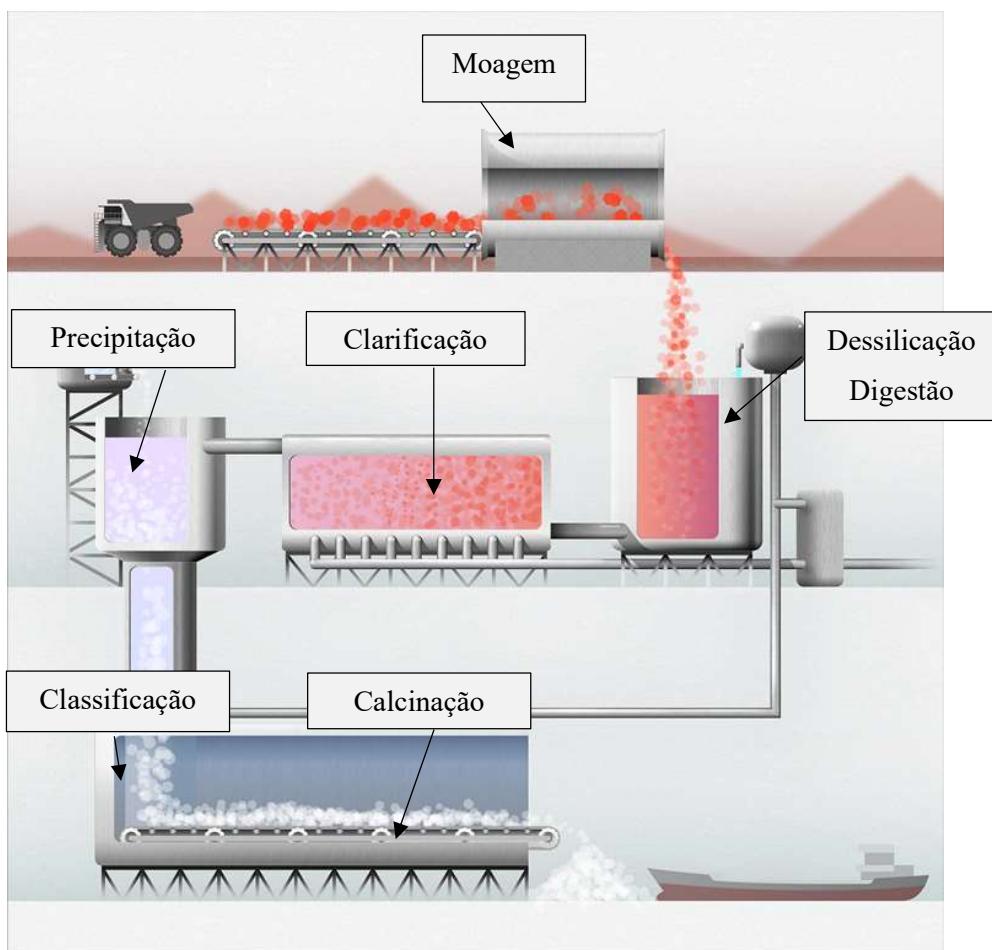


Figura 2.5: Processo Bayer

Fonte: (INTERNATIONAL ALUMINIUM INSTITUTE, 2018)

- **Moagem**

A bauxita é lavada e moída com auxílio de um moinho rotativo, com redução do tamanho de suas partículas e aumento da área superficial disponível, assim a bauxita se torna mais reativa durante o processo. Cal e “licor usado” (soda cáustica

reutilizada do estágio de precipitação) são adicionadas nos moinhos para bombear a mistura.

- **Dessilicção**

O processo de dessilicção remove a sílica [SiO₂] presente em bauxitas que possuem elevado teor desta impureza. Sua presença prejudica a qualidade do produto final.

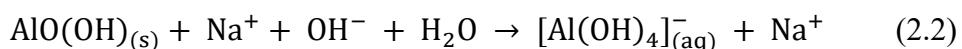
- **Digestão**

Nesta etapa, uma solução de soda cáustica [NaOH] em alta temperatura é adicionada para dissolver os minerais de hidróxido de alumínio presentes (gibbsita, boehmita e diáspora) na bauxita, formando uma solução supersaturada de aluminato de sódio. As reações químicas para bauxitas gibbsíticas diferem das bauxitas boemíticas e diaspóricas, conforme as reações 2.1 e 2.2 apresentam abaixo.

Gibbsita:



Boehmita e Diáspora:



As condições de concentração cáustica, da temperatura e pressão no digestor são definidas conforme as propriedades da bauxita processada. Bauxitas gibbsíticas possuem maior solubilidade em hidróxido de sódio quando comparadas às outras fases mineralógicas (MEYER, 2004), logo, a bauxita brasileira é processada em menores temperaturas e proporciona maior economia energética.

As bauxitas gibbsíticas podem ser processadas aos 140 °C, enquanto as boemíticas e diaspóricas, entre 200 e 280 °C. A mistura é resfriada a vapor em uma série de tanques, até 106 °C em pressão atmosférica. Em refinarias que processam bauxitas em altas temperaturas deve-se ter cautela para não dissolver outros óxidos além da alumina no licor cáustico. Algumas refinarias reduzem a temperatura do processo a partir da injeção de bauxitas de alta qualidade (gibbsíticas).

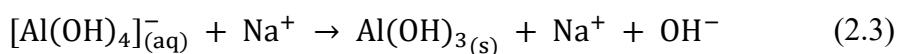
- **Clarificação**

Na clarificação ocorre a separação dos sólidos, o RB ou LV, do licor, rico em aluminato de sódio utilizado para formação da alumina, ocorre pelo método de sedimentação. Floculantes são adicionados para acelerar o processo, no qual o resíduo é decantado no fundo dos tanques. A LV é transferida e submetida à diversas lavagens visando a recuperação da soda cáustica para reutilização na etapa de digestão.

Filtros de segurança para separar o licor do RB são utilizados nesta etapa para garantir menor contaminação por impurezas no produto final. Conforme a necessidade do local de armazenamento do resíduo, processos de filtração e neutralização podem ser adotados.

- **Precipitação**

A alumina é recuperada nesta etapa por cristalização do licor, o qual é supersaturado em aluminato de sódio. O processo de cristalização ocorre a partir do resfriamento progressivo e controlado do licor para a formação de pequenos cristais de tri-hidróxido de alumínio $[Al(OH)_3]^-$, que crescem e se aglomeram em cristais maiores. A reação 2.3 que ocorre nesse estágio é o inverso da reação na etapa de digestão:



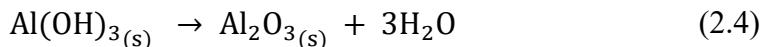
- **Classificação**

Os cristais formados na precipitação são classificados conforme seus tamanhos com auxílio de tanques de gravidade ou ciclone. Os cristais graúdos são direcionados para a calcinação após filtração a vácuo para retirada do licor, enquanto os cristais miúdos retornam à etapa de precipitação.

- **Calcinação**

O material cristalizado é levado aos calcinadores, onde é calcinado em temperaturas até 1100 °C para a retirada da umidade e da água quimicamente conectada ao triidróxido de alumínio, produzindo alumina sólida. A reação 2.4 que ocorre durante o processo de calcinação é demonstrada abaixo. O pó branco

conhecido como alumina é o produto desta etapa e o produto final do processo Bayer.



2.3. Resíduo da Bauxita

2.3.1. Composição química e fases mineralógicas

O RB, conforme citam Power, Grafé e Klauber (POWER; GRÄFE; KLAUBER, 2011) é o resíduo gerado durante a digestão e obtido após a clarificação, etapas do processo Bayer. O resíduo representa a parte sólida não-solúvel em soda cáustica da mistura e é variável em sua composição química, física e mineralógica.

Alguns aspectos que afetam as propriedades do resíduo são: composição química e mineralógica da bauxita originária, as etapas adotadas para refinamento da bauxita, tratamentos pré-disposição do resíduo, métodos de armazenamento e idade da área de disposição do resíduo (POWER; GRÄFE; KLAUBER, 2011; REDDY et al., 2020).

Apesar da variabilidade, é possível identificar composições químicas e fases mineralógicas recorrentes em resíduos provenientes de plantas de refinamento distintas. A figura 2.6 apresenta, em diagrama de caixas, composições químicas obtidas a partir da técnica de Fluorescência de Raios-X (FRX).

Os resíduos analisados são compostos por óxido de ferro $[\text{Fe}_2\text{O}_3]$ (máximo de 71,9%, mínimo de 6,8%), alumínio $[\text{Al}_2\text{O}_3]$ (máximo de 33%, mínimo de 2,12%), silício $[\text{SiO}_2]$ (máximo de 30%, mínimo de 0,6%), titânio $[\text{TiO}_2]$ (máximo de 22,6%, mínimo de 1,86%), cálcio $[\text{CaO}]$ (máximo de 47,2%, mínimo de 0,19%) e sódio $[\text{Na}_2\text{O}]$ (máximo de 12,36%, mínimo de 0%).

A composição química do resíduo é formada principalmente por impurezas não-solúveis provenientes da bauxita originária, porém a soda cáustica utilizada durante o refinamento do minério resulta em Na_2O , enquanto a presença de CaO é relacionada aos processos de neutralização antes da locação do resíduo nas áreas de disposição (GRÄFE; POWER; KLAUBER, 2011; POWER; GRÄFE; KLAUBER, 2011).

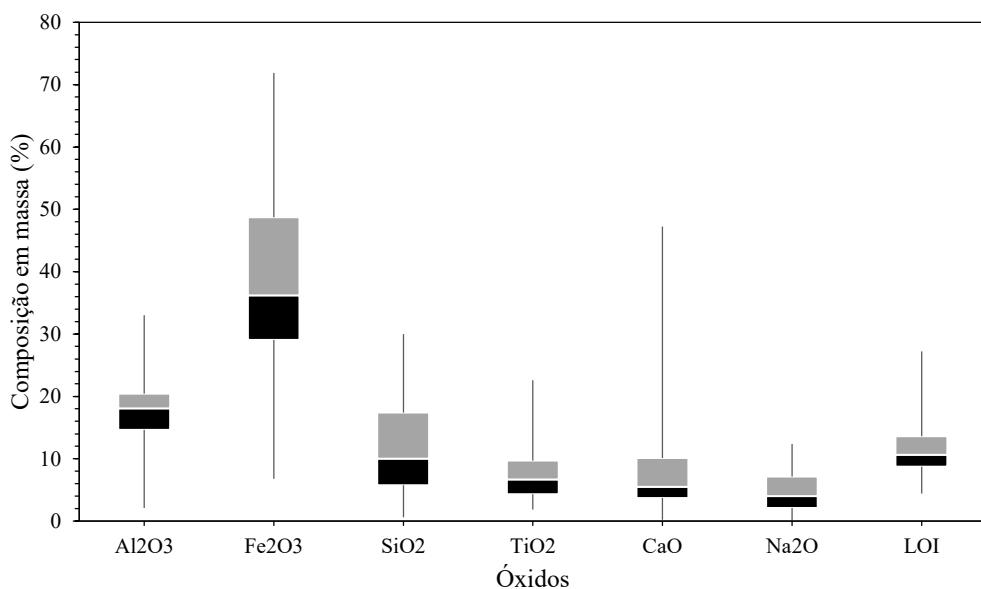


Figura 2.6: Óxidos presentes em diversas lamas vermelhas.

Fonte: (GRÄFE; POWER; KLAUBER, 2011; REDDY et al., 2020; SNARS; GILKES, 2009).

As fases mineralógicas presentes no RB também são variáveis. Os minerais presentes em parte significativa dos resíduos de bauxita são hematita, goethita, boehmita, anatase, produtos de dessilicatação (hidrossilicatos de sódio e alumínio, sodalita ou cancrinita). Os produtos de dessilicatação são produzidos durante o processo Bayer, porém, a maioria dos minerais presentes no resíduo são minerais residuais da bauxita originária. (REDDY et al., 2020; SNARS; GILKES, 2009)

A Tabela 2.5 abaixo explicita fases mineralógicas, presentes e mensuráveis, em resíduos de cinco países diferentes (China, Índia, Gana, Austrália e Brasil), identificadas a partir da técnica de Difração de Raios-X (DRX). Nota-se a presença de hematita em todas as amostras analisadas (7 – 29%) e porcentagem mássica diversa para outros minerais. A fração amorfa, estrutura que não possui arranjo cristalino, é significativa em determinadas amostras (20,7 – 51%). A Tabela 2.6 apresenta valores possíveis para a presença de diversos minerais, conforme estimativa do IAI (2015).

Tabela 2.5: Fases mineralógicas de resíduos com origens distintas.

Origem da bauxita	Fases mineralógicas (%)																
	Hematita	Goethita	Magnetita	Diáspora	Boehmita	Gibbsita	Quartzo	Rutilo	Anatase	Sodalita	Cancrinita	Calcita	Caulinita	Imogolita	Perovskita	Ilmenita	Amorfo
China	7,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11,5	-	20,7
China	8,2	-	7,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10,9	-	24,6
China	7	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11	-	22
China	7,4	-	8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10,2	-	20,8
China	19	-	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-	-	32	-	10	22
Darling Range (Austrália)	8,7	24,3	-	-	1,3	-	4,9	-	0,3	2,7	-	11,2	-	-	-	-	48,3
Gana	16,1	23,8	-	-	-	-	1,3	5,4	-	-	-	-	-	-	-	-	51
Gana	13,5	21,8	-	-	-	-	1,2	4,6	-	17,5	-	-	-	-	-	-	38,2
Índia	13,8	7,3	-	0,5	9,6	1	-	1,1	1,1	2,3	-	1	-	-	-	-	-
Índia	22,2	10,9	-	0,6	1	3	-	1,8	3,8	3,7	4,7	1	-	-	1,1	-	-
Weipa (Austrália)	27	-	-	-	-	5	4	-	-	5	24	29	-	-	-	-	-
Weipa (Austrália)	27	-	-	-	-	9	3	2	-	3	-	51	-	-	-	-	-
Weipa (Austrália)	29	-	-	-	-	6	5	-	-	5	16	33	-	-	-	-	-
Brasil	24,8	10,9	-	-	-	11,9	-	-	5	16,8	-	2,9	5,9	-	-	-	-

Fonte: (GRÄFE; POWER; KLAUBER, 2011; MERCURY et al., 2011b)

Tabela 2.6: Intervalo de fases mineralógicas para o RB.

	Fases mineralógicas	Intervalo (%)
Sodalita	[3Na ₂ O. 3Al ₂ O ₃ . 6SiO ₂ . Na ₂ SO ₄]	4~40
Goethita	[FeOOH]	10~30
Hematita	[Fe ₂ O ₃]	10~30
Magnetita	[Fe ₂ O ₄]	0~8
Sílica, cristalina e amorfa	[SiO ₂]	3~20
Aluminato de cálcio	[3CaO. Al ₂ O ₃ . 6H ₂ O]	2~20
Boehmita	[AlOOH]	0~20
Dióxido de Titânio, Anatase e Rutilo	[TiO ₂]	2~15
Muscovita	[K ₂ O. 3Al ₂ O ₃ . 6SiO ₂ . 2H ₂ O]	0~15
Calcita	[CaCO ₃]	2~20
Caolinita	[Al ₂ O ₃ . 2SiO ₂ . 2H ₂ O]	0~5
Gibbsita	[Al(OH) ₃]	0~5
Perovskita	[CaTiO ₃]	0~12
Cancrinita	[Na ₆ {Al ₆ Si ₆ O ₂₄ }.2CaCO ₃]	0~50
Diáspora	[AlOOH]	0~5

Fonte: (INTERNATIONAL ALUMINIUM INSTITUTE, 2015)

2.3.2. Características físicas

O tamanho das partículas e a área superficial específica do RB apresentam variabilidade conforme a duração do processo de moagem e dissolução de minerais durante o processo de digestão. A distribuição do tamanho de partículas é, usualmente, menor que 75 µm para 90% das partículas, e a área superficial, cerca de 10-30 m²/g (KHAIRUL; ZANGANEH; MOGHTADERI, 2019; REDDY et al., 2020).

Reddy et al. (2020) estimam que o diâmetro médio das partículas encontra-se entre 5-10 µm, mas a variabilidade entre os grãos é elevada, de grãos graúdos (areia) até micropartículas de acordo com as plantas de refinamento e a composição das bauxitas originárias. A distribuição do tamanho de partículas, obtida com o uso da técnica de granulometria a laser, de um RB brasileiro e RBs estrangeiros são observadas nas Figura 2.7(a) e (b), enquanto a Tabela 2.7 apresenta valores de área

superficial específica, a partir da técnica de Brunauer, Emmet e Taller – BET e tamanho de partículas, a partir da técnica de peneiramento úmido, obtidos por Snars e Gilkes (2009), ambos os valores coerentes com as estimativas de outros autores.

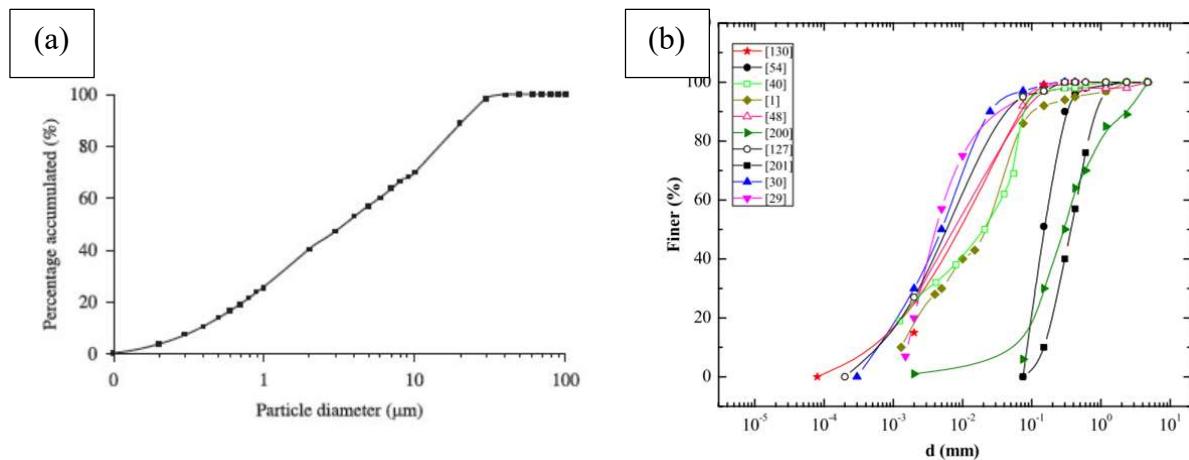


Figura 2.7: (a) Distribuição granulométrica de RB brasileiro (b) Distribuição granulométrica de RBs estrangeiros.

Fonte: (REDDY et al., 2020; RIBEIRO; LABRINCHA; MORELLI, 2011)

Tabela 2.7: Área superficial específica e análise do tamanho das partículas de resíduos diversos.

Origem do resíduo	BET SSA (g/cm^2)	Análise do tamanho de partículas (%)		
		< 2 μm	2-20 μm	>20 μm
Kwinana (Austrália)	28	21	65	15
Pinjarra (Austrália)	25	25	61	15
Wagerup (Austrália)	24	20	41	39
Worsley (Austrália)	25	29	50	21
Nabalco (Austrália)	29	44	40	16
QAL (Austrália)	29	40	50	10
Brasil	15	22	65	13
Alemanha	23	57	28	15
Itália	25	29	38	33
Espanha	21	33	38	29
Estados Unidos	27	22	35	43

Fonte: (SNARS; GILKES, 2009)

A densidade do RB, variável conforme bauxita originária, é geralmente elevada devido à presença de fases mineralógicas ricas em ferro e outros metais que possuem átomos de massa atômica elevada. A Tabela 2.8 abaixo expõe densidades de resíduos distintos, variando entre 2,7 – 3,7.

Tabela 2.8: Densidades de lamas vermelhas ao redor do mundo.

Origem do resíduo	Índia	Índia	Índia	Reino Unido	Guiné	Espanha	China	Jamaica	Brasil
Densidade	2,85 - 3,45	2,85 - 2,97	3,27	3,05	3,2 - 3,7	3,44	2,77	2,7 - 3,7	2,9

Fonte: (REDDY et al., 2020; RIBEIRO; LABRINCHA; MORELLI, 2011)

2.3.3. Morfologia

A variabilidade do tamanho das partículas é perceptível ao verificar a morfologia do RB. A técnica de microscopia eletrônica de varredura – MEV, utilizada por Lima e Thives (2020), e Zhang *et al.* (2019) apresenta partículas menores que 10 µm e de estrutura porosa, característica que determina a elevada área superficial específica do resíduo, conforme a Figura 2.8. Os autores também identificaram aglomerados formados por micropartículas, bem como a distribuição granulométrica irregular, ratificando as informações expostas no item 2.3.2.

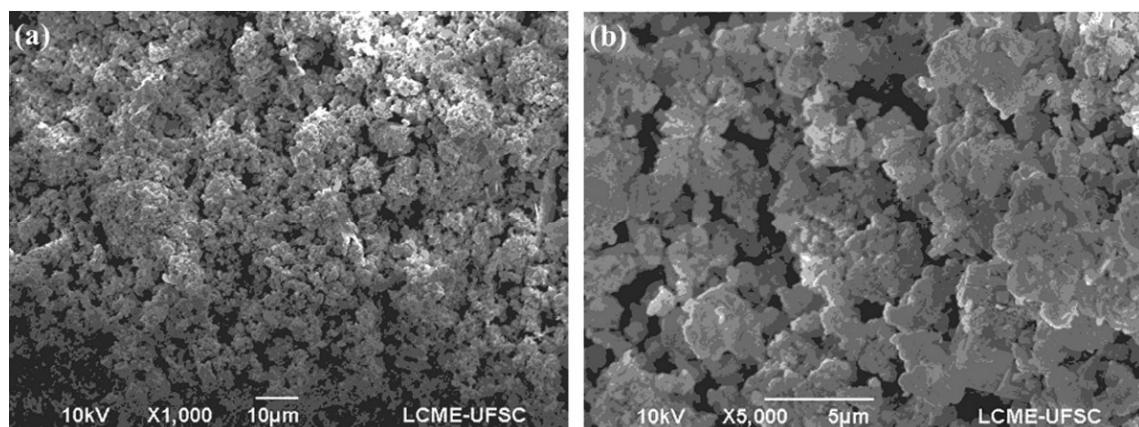


Figura 2.8:Microfotografia da LV.

Fonte: (LIMA; THIVES, 2020).

2.3.4. Métodos de armazenamento

Mesmo com a utilização do processo Bayer há aproximadamente 130 anos, seu resíduo tornou-se reconhecido como gerador de impactos ambientais apenas no início da década de 80, quando sua estimativa mundial cercava 1 bilhão de tonelada. Power *et al.* (2011) estimaram, a partir de cálculos estequiométricos envolvendo a produção de alumina, que em 2007 a produção anual do resíduo alcançava 120 milhões de toneladas, e entre 2010 e 2015 o inventário global excederia as 3 bilhões de toneladas. A escala industrial de geração deste resíduo trouxe à tona a primeira problemática: a necessidade de grandes espaços úteis para o armazenamento deste resíduo, visto que o mesmo não possui aplicabilidade no mesmo volume de sua geração.

Os dois métodos de armazenamento utilizados com maior frequência são a estocagem em lagoas (ou à úmido) e estocagem à seco. No primeiro método o resíduo de bauxita é armazenado em seu estado úmido, após etapas de lavagem, em lagoas previamente construídas conforme a topografia da região. As lagoas artificiais (Figura 2.9(a)) possuem em seu fundo materiais selantes que possibilitam a contenção da lama, evitando possíveis vazamentos. Apesar de ser mais simples em execução, este método possui diversas falhas como o baixo teor de sólidos incorporado no resíduo (menor que 50%), grande volume de material a ser transportado, possibilidade de vazamentos, contaminação dos lençóis freáticos, risco à saúde humana quando o resíduo não é neutralizado, alto custo e engenharia elevada para manutenção do resíduo. (LIU; YANG; XIAO, 2009; POWER; GRÄFE; KLAUBER, 2011)

No método de empilhamento à seco (Figura 2.9(b)), conforme citam Liu *et al.*(2009) e Power *et al.*(2011), após a lavagem o resíduo é reduzido em espessador a uma pasta com maior teor de sólidos (48 a 55%) concentrados. O resíduo é empilhado em finas camadas para permitir a perda de água até a próxima camada ser posicionada. O método torna-se inicialmente mais oneroso e complexo quando comparado ao anterior devido ao uso do espessador, entretanto, a redução da possibilidade de vazamentos, maior aproveitamento da área útil e incorporação do resíduo são vantagens consideráveis. Os finos na superfície do material seco é uma das poluições geradas pelo método, movidos pelas correntes de ar afetando sua qualidade, necessitando de ações mitigadoras.

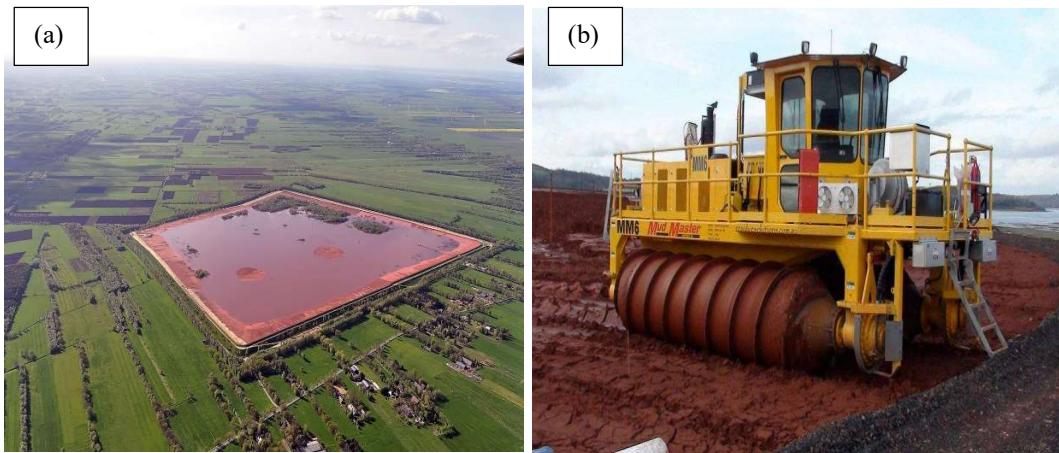


Figura 2.9: (a) Lagoa artificial e (b) empilhamento à seco do RB.

Fonte: (TABEREAUX, 2019).

2.3.5. Desastres ambientais

Os desastres ambientais da última década impulsionaram a mudança de armazenamento do método de lagoas artificiais para o método de empilhamento à seco. Alguns incidentes ocorridos em países distintos, entre os anos de 2010-2012, são listados na Tabela 2.9 abaixo, todos relacionados às falhas ocorridas durante o armazenamento do resíduo.

Tabela 2.9: Incidentes com lama vermelha em diferentes países.

Data	Lugar	Incidente
26/mai/12	Guangxi Hauyin, China	Vazamento de lagoa artificial
12/jan/12	Rusal, Irlanda	Contaminação por pós finos
10/dez/11	Alcoa, Ilhas Virgens Americanas	Poluição em geral
17/out/11	Guayana, Venezuela	Descarte de lama vermelha no Rio Orinoco
02/jun/11	Rusal, Itália	Derrame de lama vermelha
16/mai/11	Vedanta, Índia	Poluição após chuva
03/mar/11	Rusal, Ucrânia	Contaminação por pós finos
22/out/10	Alcoa, Estados Unidos	Contaminação por pós finos
04/out/10	MAL Hungarian, Hungria	Quebra de Barragem
27/jun/10	Vedanta, Índia	Contaminação por pós finos
01/fev/10	Rusal, Jamaica	Nuvens de poeira tóxica

Fonte: (HAMMOND, 2014).

Entre os mais conhecidos, tem-se o rompimento da barragem de contenção em Ajka, Hungria, que ocorreu em outubro de 2010. O levantamento realizado em *The Kolontár Report* (2011) explana que o teor excessivo de água na LV armazenada foi o aspecto físico responsável pelo extravasamento na lagoa de contenção, mas aspectos químicos como sua elevada alcalinidade e a alta concentração de metais foram responsáveis pelos problemas de saúde e ambientais de curto e longo prazo (Figura 2.10). Estima-se um vazamento de 0,9-1 milhão de metros cúbicos do resíduo, poluindo e destruindo cerca de 4 km² em terras agrícolas e urbanas, totalizando sete cidades (Devecser, Kolontár, Somlóvásárhely, Somlójenö, Tüskevár, Apácatorna e Kisberzseny) afetadas, a contaminação de diversos rios da região (Marcal, Torna, Rába e Moson, este último um braço do rio Danúbio, responsável por grande parte do transporte europeu) com o resíduo alcalino prejudicou o bioma aquático, e por fim, as perdas humanas, totalizando 10 mortos e 150 feridos.



Figura 2.10: Rompimento da lagoa de contenção em Ajka, em 2010.

Fonte: (THE GUARDIAN, 2016)

2.3.6. Estudos e aplicações do resíduo da bauxita

Em decorrência dos desastres e impactos ambientais gerados pelo método de armazenamento do RB, houve interesse crescente por estudos que pudessem promover sua reutilização e reaproveitamento. Após o ano de 2010, ano do acidente

em Ajka, o número de publicações e citações cresce e se mantém relevante na comunidade científica (Figura 2.11).

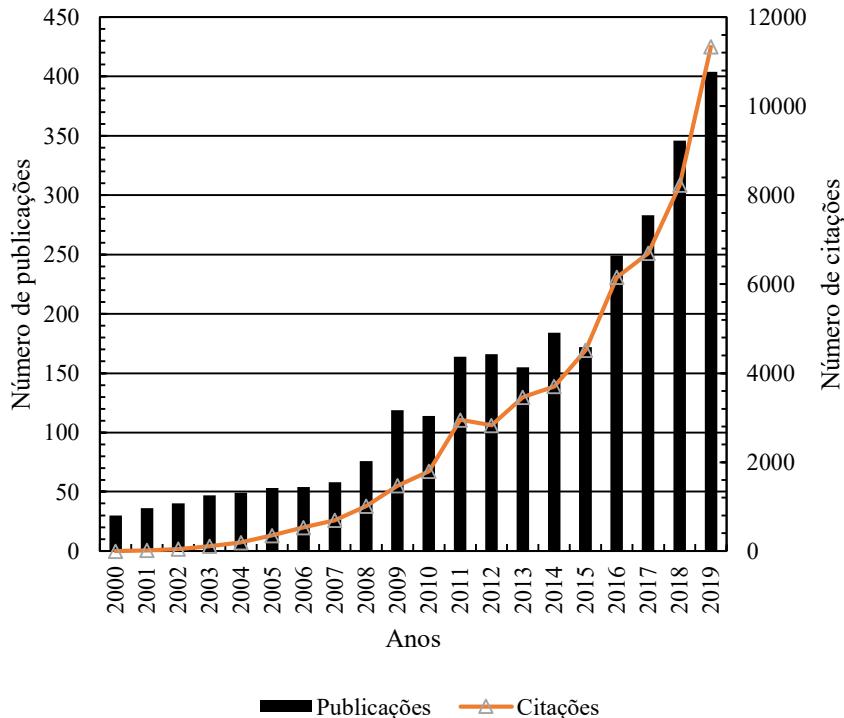


Figura 2.11: Publicações e citações sobre resíduo de bauxita entre os anos 2000-2019.

Fonte: (WEB OF SCIENCE, 2020)

Atualmente, diversas linhas de pesquisa vigentes propõem alternativas de uso e aplicação para o RB. Estudos que utilizam o RB para extração de metais pesados (RIVERA et al., 2018) ou como matéria-prima para elaboração de sorvente altamente seletivo visam a valorização do resíduo (PEPPER; COUPERTHWAITE; MILLAR, 2018), porém, o resíduo é produzido em larga escala, e para reduzir o contingente de material outras linhas de pesquisa propõem seu uso como material de construção. As propriedades químicas, físicas e mineralógicas do resíduo viabilizam seu uso em diversos segmentos, tais como:

- Precursor em geopolímeros (NOVAIS et al., 2018), devido à elevada alcalinidade, composição química e grande disponibilidade para atuar como matéria-prima;

- Fabricação de blocos cerâmicos (MACÊDO et al., 2011), em virtude da predominância de micropartículas e de sua elevada área superficial específica, aspectos que facilitam a aglomeração das partículas;
- Adição mineral ou *filler* em concretos (GHALEHNOVI et al., 2019), em consequência de sua composição química, elevada área superficial específica e elevada alcalinidade (similar à matriz cimentícia).

2.3.7. Resíduo de bauxita como *filler* em matrizes cimentícias

O uso de RB como *filler* em matrizes cimentícias é uma aplicação relativamente recente quando comparada ao uso de RB como matéria-prima para produção de clínquer (SINGH; UPADHAYAY; PRASAD, 1996).

Os primeiros estudos (SENFF; HOTZA; LABRINCHA, 2011; SENFF et al., 2014) utilizaram o RB conforme recebido e consideraram a substituição de cimento Portland por RB em até 50% de massa, com variações na proporção de superplastificante e fator água-cimento visando avaliar modificações reológicas e com aplicação para argamassas.

Outros estudos propuseram o uso de RB em forma de pó em pastas, avaliando o potencial de uso do resíduo como pozolana, e em concreto armado, verificando alterações na penetração de cloretos conforme o resíduo é adicionado na mistura (RIBEIRO; LABRINCHA; MORELLI, 2011, 2012).

Apesar das pesquisas realizadas nos últimos anos, poucos estudos consideraram a incorporação de resíduo como *filler* em concretos especiais ou não convencionais. Tang *et al.* (2018) avaliaram a substituição parcial de cinza volante em 10, 25 e 50% de massa, por RB em concreto autoadensável.

Em estudo mais recente, Romano *et al.* (2020) avaliaram proporções distintas de RB como *filler* alternativo em ladrilhos hidráulicos, considerando dois tipos de cimentos distintos. Os resultados demonstraram que não houve deterioração, até os 20% de incorporação, das propriedades dos ladrilhos.

A presença de RB em matriz cimentícia não influencia na cinética de hidratação do cimento. A composição química do RB não afeta o processo, enquanto apenas o tamanho de partículas do material possibilita a formação de pontos de nucleação, otimizando a resistência da matriz. (ROMANO et al., 2018; SENFF; HOTZA; LABRINCHA, 2011). Estas considerações corroboram o uso do RB material como *filler*.

2.4.Blocos de Concreto

O bloco de concreto para alvenaria vazado foi conceituado, concebido e patenteado na Inglaterra em 1850 (FERNANDES, 2018). Segundo Buttler (2007), os blocos de concreto vieram aos Estados Unidos no fim do século XIX. A novidade chegou ao Brasil apenas em 1950 quando uma máquina americana foi importada para a produção dos blocos no país, porém, os blocos de concreto se consolidaram no mercado apenas em 1970 com as primeiras obras de alvenaria armada em blocos de concreto.



Figura 2.12: Bloco de concreto simples.

Fonte: (PARSEKIAN et al., 2018).

Blocos de concreto, ou unidade de alvenaria de concreto, são constituídos basicamente por cimento Portland, agregados e água, porém, outros materiais (cinza volante, escória de alto forno, adições, pozolanas, pigmentos, entre outros) podem ser adicionados na mistura, desde que não comprometam o desempenho da unidade (PARSEKIAN et al., 2018).

2.4.1. Métodos de produção

A produção dos blocos de concreto é realizada com concreto de consistência seca, com pouca umidade. A baixa incorporação de água resulta em um concreto facilmente moldável, porém com elevado índice de vazios, logo, a necessidade de máquinas especiais que confiram compacidade à mistura é imprescindível (IZQUIERDO, 2015).

Marchioni (2012) explana que os concretos secos não seguem a Lei de Abrams, logo, não há a proporcionalidade de resistência e relação água-cimento. Em misturas de concreto seco há um teor máximo de umidade (entre 5% a 8% da massa total, conforme o equipamento utilizado), na qual a maior umidade possui a

maior resistência. Isto é possível devido à água auxiliar na trabalhabilidade da mistura, reduzindo o atrito interparticular e melhorando o processo de compactação.

As máquinas especiais utilizadas para a produção de blocos de concreto são chamadas de vibro-prensas, as quais possuem mecanismo de vibração e prensagem dos blocos, permitindo que a mistura penetre e preencha adequadamente as formas (IZQUIERDO, 2015)

Segundo Frasson Júnior (2000), as máquinas vibro-prensas podem ser do tipo hidráulico ou mecânico. As principais diferenças entre ambas são o grau de compactação e a capacidade de produção, aferida em blocos/hora ou blocos/dia, sendo a máquina do tipo hidráulico capaz de produzir graus de compactação mais elevados, e por consequência, blocos mais resistentes e que atinjam outros requisitos normativos, tais como absorção, retração, entre outros.

O funcionamento das vibro-prensas resume-se na seguinte sequência da figura 2.11 abaixo, segundo Medeiros (1993), citado por Sousa (2001):

- (a) A gaveta alimentadora é preenchida com o concreto seco, em sequência, (b) o concreto seco é depositado no molde metálico, este sendo vibrado. (c) Os extratores compactam a mistura no molde. (d) O bloco é desmoldado e o (e, f) novo ciclo é iniciado após a retirada dos blocos já moldados.

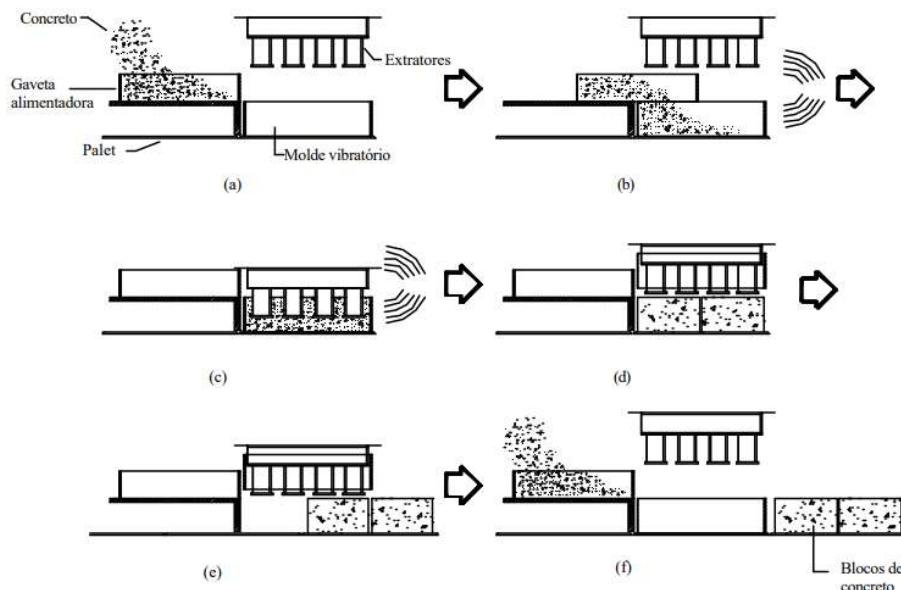


Figura 2.13: Sequência básica de funcionamento de uma vibro-presa.

Fonte: (MEDEIROS, 1993 *apud* SOUSA, 2001)

2.4.2. Métodos de dosagem

A variabilidade na produção de blocos de concreto ocorre principalmente devido ao maquinário adotado, logo, diversos métodos de dosagem foram propostos por fabricantes de vibro-prensas considerando os aspectos técnicos da máquina e determinadas frações granulométricas, porém o presente estudo se atém a dois métodos: a prática recomendada pela Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP e o método de menor volume de vazios, proposto por Buttler (2007).

2.4.2.1.Método ABCP

A ABCP (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND, 1995) apresentou boletim técnico com práticas recomendadas para a produção de blocos de concreto para alvenaria com os objetivos de:

- Minimizar o custo de fabricação e reduzir defeitos de produção, visando mais qualidade na produção dos blocos brasileiros;
- Fabricar produtos que estejam em conformidade com a normatização brasileira vigente;
- Possibilitar constância em qualidade e aparência dos blocos produzidos.

O boletim técnico apresenta recomendações para tipos de matérias-primas permitidas durante o processo, bem como para instalações, equipamentos, proporcionamento entre agregados e dosagem propriamente dita. A Tabela 2.10 abaixo apresenta, resumidamente, as recomendações para a matéria-prima adotada. A ABCP não recomenda o uso do pedrisco por não ser normatizado, e por haver heterogeneidade em sua composição.

Tabela 2.10: Matéria-prima utilizada na fabricação de blocos de concreto.

Matéria-prima	Recomendações
Agregado graúdo	Uso de brita 0 e areia natural ou artificial. O Boletim recomenda o uso de pó-de-pedra em pequenas quantidades. Evitar agregados que possuam torrões friáveis argilosos, pois prejudicam a estética e respostas mecânicas dos blocos. A avaliação do agregado miúdo deve seguir a NBR 7211.
Agregado miúdo	As impurezas orgânicas presentes em areias naturais podem comprometer a resistência do bloco, e normalmente não são identificadas visualmente. O agregado miúdo deve ser avaliado a partir das normas NBR 7221 e NBR 7220.
Cimento	Todos os tipos e classes de cimento Portland podem ser utilizados na fabricação de blocos de concreto, mesmo que alguns apresentem hidratação lenta, quando curados adequadamente o produto final não será afetado. O Boletim recomenda o uso do mesmo tipo e classe de cimento para todos os lotes fabricados para não haver variação de cor ou nível de resistência entre blocos.
Água	A água de amassamento deve ser potável. Quando não for utilizada a água da rede pública de abastecimento, deve-se analisar previamente para verificar possibilidade de uso no concreto.

Fonte: (ABCP, 1995).

A dosagem, conforme ABCP (1995), é o estudo que tem como finalidade determinar as quantidades dos constituintes da mistura de concreto, ou seja, o traço. O processo de dosagem deve alcançar determinadas características, e no caso dos blocos, as características são:

- Coesão no estado fresco, para desmoldagem, transporte rápido e eficiente;
- Resistência adequada para a aplicação;
- Máxima compacidade e absorção mínima;
- Aspecto de superfície ou textura superficial, conforme a aplicação do bloco.

A dosagem pelo método ABCP (1995) é apresentada em três etapas, as quais são: determinação da melhor composição de agregados, determinação da quantidade de água, e por fim, determinação da quantidade de cimento.

Os agregados são previamente secos e misturados, colocados em recipiente de dimensões conhecidas, adensados e posteriormente pesados. Caso sejam três agregados, o método determina a composição ideal entre os dois agregados mais graúdos, em sequência o agregado miúdo é considerado com a composição anterior. Quanto maior a massa obtida nas composições, maior a compacidade da mistura.

A determinação de água e de cimento são obtidos com o teor ótimo de água para proporcionar maior compacidade ao bloco. Estas etapas são realizadas na produção de blocos por tentativa e erro, sendo refeitas sempre que possível, porém, a composição dos agregados obtida na primeira etapa é fixada.

2.4.2.2.Método do Menor Volume de Vazios (Buttler, 2007)

O método, segundo Buttler (2007), baseia-se na formulação da mistura ótima entre agregados visando o menor índice de vazios possível, consequentemente, obtendo-se a maior massa unitária. A redução do índice de vazios gera maior resistência à compressão, pois a compactação da mistura apresenta relação direta com as respostas mecânicas obtidas. Os pesquisadores adotaram o uso de corpos de prova – CPs cilíndricos (5x10) cm após estudo desenvolvido por Frasson Júnior (2000) que buscava encontrar proporcionalidade entre resultados obtidos em CPs cilíndricos e blocos de concreto, de forma a reduzir o consumo de materiais e facilitar o manuseio das amostras durante o processo de adequação das proporções dos materiais.

Buttler (2007) ainda pondera que apesar da recomendação da ABCP propor que a composição seja feita inicialmente com os agregados graúdos e em seguida os agregados miúdos, outros pesquisadores (FRASSON JÚNIOR, 2000; FONSECA, 2002), ao utilizarem areias finas nas misturas identificaram um consumo excessivo do agregado fino para obter um menor volume de vazios, assim, a resistência mecânica dos blocos foi comprometida. Assim, o método modificado considera um teor fixo para a areia (20%), enquanto os outros componentes são variados.

Após as considerações, tem-se o método do menor volume de vazios adaptado conforme Buttler (BUTTLER, 2007):

Para o ensaio do método, utiliza-se um recipiente de volume conhecido para preenchimento das misturas secas e uma haste metálica de 16 mm e comprimento de 60 cm com extremidades arredondadas, para a compactação das misturas no recipiente. Desta forma, as seguintes etapas são efetuadas:

- Secagem prévia dos agregados (pó de pedra, brita zero e areia);
- Produção de misturas homogeneizadas, contendo diversas porcentagens de dois componentes da mistura (pó de pedra e brita zero);

- Lançamento das misturas no recipiente cilíndrico, em três camadas iguais, compactando cada uma com 25 golpes. Findada a compactação da última camada, o recipiente é rasado para retirada do material excedente e pesado;
- O ensaio é repetido, no mínimo duas vezes, para cada uma das composições de agregados.

A equação para o cálculo do volume de vazios para cada uma das composições é dada abaixo:

$$V_{vazios} = \frac{\left[V_{rec} - \left(\frac{\%_a \times M}{100 \times \gamma_a} + \frac{\%_{pe} \times M}{100 \times \gamma_{pe}} + \frac{\%_{po} \times M}{100 \times \gamma_{po}} \right) \right]}{V_{rec}} \times 100 \quad (3.1)$$

Onde:

V_{rec} , é o volume do recipiente; %, é a proporção dos materiais na composição; γ_a , é a massa específica dos agregados; M, é a massa da composição necessária.

2.4.3. Normatizações nacionais e internacionais

Os blocos vazados brasileiros são normatizados conforme Norma Brasileira – NBR 6136 (ABNT, 2016), que define bloco vazado de concreto simples como: “um componente para execução de alvenaria, com ou sem função estrutural, vazado nas faces superior e inferior, cuja área líquida é igual ou inferior a 75% da área bruta.”

A NBR 6136 (ABNT, 2016) especifica os requisitos mínimos para aceitação e produção de unidades de alvenaria de concreto como a Tabela 2.11 demonstra, mas as especificações são limitadas à resistência à compressão axial, absorção média e retração (esta última sendo opcional), sem considerar outros aspectos físicos e durabilidade em blocos de concreto.

Tabela 2.11: Requisitos para blocos de concreto no Brasil.

Classificação	Classe	Resistência característica à compressão axial (MPa)	Absorção (%)				Retração (%)
			Agregado normal		Agregado leve		
			Individual	Média	Individual	Média	
Com função estrutural	A	$f_{bk} \geq 8,0$	$\leq 9,0$	$\leq 8,0$			
	B	$4,0 < f_{bk} < 8,0$	$\leq 10,0$	$\leq 9,0$	$\leq 16,0$	$\leq 13,0$	$\leq 0,065$
Com ou sem função estrutural	C	$f_{bk} \geq 3,0$	$\leq 11,0$	$\leq 10,0$			

Fonte: (ABNT, 2016)

Normatizações internacionais consideram outros aspectos físicos e englobam blocos maciços e com formatos distintos, tais como a *American Society for Testing and Materials – ASTM C90* (ASTM, 2016) e *Australian Standards/ New Zealand Standards – AS/NZS 4455.1* (AUSTRALIAN STANDARDS, 2008). A norma australiana apresenta métodos de ensaio para durabilidade dos blocos, considerando potencial em eflorescência, ataque salino e corrosão, ainda que sejam opcionais. A Tabela 2.12 abaixo apresenta um resumo de propriedades obrigatórias e opcionais nas normas brasileira, americana e australiana.

Tabela 2.12: Resumo de características obrigatórias e opcionais para normas diversas.

Normatização	Tipos de blocos	Características obrigatórias	Características opcionais
NBR 6136:2016	Blocos Vazados de Concreto	Análise Dimensional, Resistência à Compressão, Absorção Média	Retração por secagem
ASTM C90-16a	Blocos Vazados e Maciços de Concreto	Análise Dimensional, Densidade, Absorção Média, Resistência à Compressão	Resistência à penetração de água, controle de fissuras
AS/NZS 4455.1:2008	Blocos Vazados e Maciços de Concreto	Análise Dimensional, Resistência à Compressão	Potencial de Eflorescência, Porcentagem de Núcleo e Espessura de Material, Teor de Umidade, Densidade Seca, Densidade Ambiente, Coeficientes de Expansão e Contração, Corrosão, Absorção de Água, Módulo de Ruptura Lateral, Permeabilidade à Água, Índice de Absorção Inicial

Fonte: (AUTORA, 2022)

Apesar da divergência nas características obrigatorias entre associações normativas, Parsekian *et al.* (2018) citam que as principais propriedades de blocos de concreto são a resistência à compressão, resistência à tração, absorção de água, acurácia dimensional, densidade e retração.

As propriedades atuam conjuntamente e podem expor problemas na fabricação dos blocos ou na dosagem utilizada. Absorções elevadas podem indicar falhas no processo de produção, especificamente durante a prensagem da peça e são relacionadas à baixa resistência à compressão. Caso o bloco possua elevada resistência e absorção supõe-se cimento em excesso na mistura, ocasionando em problemas por retração e risco de fissuração nos blocos (PARSEKIAN *et al.*, 2018).

Ainda em Parsekian *et al.* (2018), a resistência à compressão é intimamente ligada à durabilidade, bem como responsável por promover a resistência ao elemento estrutural de alvenaria. A resistência à tração representa o ponto de falha da alvenaria sob cargas verticais, por isso é de suma importância para evitar fissuras.

2.4.4. Estudos em blocos de concreto

A literatura nacional sobre blocos de concreto vem se desenvolvendo nos últimos anos. Inicialmente, estudos voltados para novas metodologias de dosagem foram realizados para propor melhorias na fabricação dos blocos brasileiros, considerando a granulometria dos materiais locais (FRASSON JUNIOR, 2000).

Posteriormente, estudos incorporando ao bloco de concreto agregados reciclados foram realizados (ALBUQUERQUE, 2005; BUTTLER, 2007; SOUSA, 2001). Os estudos adotam o método desenvolvido por Frasson Júnior (2000) e demonstram a possibilidade de fabricação, com qualidade, de blocos de concreto, reduzindo o impacto ambiental do consumo de matéria-prima da produção.

No estudo mais recente, Izquierdo (2015) utilizou fibras de sisal e pós residuais na fabricação de blocos de concreto, confeccionando unidades ecológicas, substituindo o cimento por pó de resíduo orgânico, areia por pó de pedra e acrescentando as fibras de sisal. A autora ainda analisou elementos estruturais como prismas e paredes, avaliando a interação do sistema argamassa-bloco.

Na literatura internacional, estudos que avaliam a viabilidade técnica da substituição parcial de cimento por resíduos industriais distintos são observados ao

longo dos últimos anos. A importância da incorporação dos resíduos em produção de larga escala de blocos de concreto é notória. Os respectivos estudos estão resumidos, conforme a proporção de substituição e os parâmetros avaliados pelos autores, na Tabela 2.13.

Chidiac e Mihaljevic (2011) avaliaram o desempenho de blocos de concreto com substituição parcial de 10 e 25%, em massa, de cimento por pó residual de vidro. Apesar da redução da resistência ao incorporar o resíduo, os blocos produzidos alcançaram os parâmetros mínimos de resistência estipulados em norma. Os parâmetros físicos (absorção de água e taxa de absorção inicial) apresentaram um aumento, porém não significativo.

Carrión *et al.* (2014) fabricaram blocos de concreto conforme a configuração definida por norma europeia e avaliaram o uso de cinza de lodo de esgoto nos teores de 0, 10 e 20%, em massa de cimento. Os blocos produzidos com resíduo até 20% de substituição apresentaram resultados compatíveis com as especificações normativas. A produção do bloco com ligante alternativo também é considerada comercialmente viável.

Os efeitos do uso da cinza da casca de arroz, pó residual de calcário e fibra de madeira na fabricação de blocos de concreto leve também foram avaliados. (TORKAMAN; ASHORI; SADR MOMTAZI, 2014). Os resultados demonstram que os blocos com pó de calcário obtiveram resistência à compressão superior a todas as outras composições avaliadas. A condição ótima foi obtida quando houve a combinação dos três resíduos.

Em estudo mais recente, Mashaly, Shalaby e Rashwan (2018) consideram o uso de lama de granito, resíduo proveniente da produção de pedras ornamentais, em incrementos de 10%, até 40% da massa total do ligante. O teor ótimo de substituição ‘obtido é de 20%, mesmo com a redução de propriedades físicas e mecânicas, os resultados obtidos satisfazem os requisitos normativos.

Tabela 2.13: Tabela resumo de estudos internacionais com resíduos industriais na composição de blocos de concreto.

Referência	Tipos de resíduo	Teores de substituição de cimento por resíduo (%)	Parâmetros avaliados
Chidiac, S; Mihaljevic, S (2011)	Pó residual de vidro	0, 10 e 25	Densidade, resistência à compressão, módulo de elasticidade, absorção de água, taxa de absorção inicial, reação álcali-sílica
Carrión, M <i>et al.</i> (2014)	Cinza de lama de esgoto	0, 10 e 20	Análise dimensional, densidade, resistência à compressão, absorção por capilaridade, propriedades térmicas
Mashaly, A.; Shalaby, B.; Rashwan M. (2018)	Lama de granito	0, 10, 20, 30 e 40	Absorção de água, densidade, porosidade aparente, absorção de água por capilaridade, resistência à compressão, resistência à flexão, resistência à abrasão, resistência ao gelo-degelo, resistência à sulfatos
Torkaman, J <i>et al.</i> (2014)	Cinza de casca de arroz e pó residual de calcário	0 e 25	Resistência à compressão, absorção de água, densidade antes e após absorção

Fonte: (AUTORA, 2022)

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O programa experimental é segmentado em três etapas:

- **Etapa I – Caracterização dos materiais**

Esta etapa visa coletar informações acerca dos materiais aplicados no estudo. Resultados acerca da composição química, fases mineralógicas, características morfológicas serão obtidos para caracterizar o resíduo, bem como a caracterização dos agregados e cimento aplicados no estudo será realizada.

- **Etapa II – Estudo de dosagem**

A identificação das proporções adequadas entre agregados e cimento é realizada. Nesta etapa, adota-se o método de Menor Volume de Vazios, adaptado por Buttler (2007), para identificar a proporção ideal entre agregados miúdos e graúdo, bem como um teste entre diversas proporções é realizado para avaliar a variabilidade da resistência à compressão e a interação entre cimento e agregados.

- **Etapa III – Substituição parcial do cimento**

A substituição parcial de cimento por resíduo de bauxita (0%, 5%, 10%, 15% e 20%) em relação à massa, e a moldagem de CPs é realizada durante este segmento.

Nesta etapa, os CPs serão avaliados conforme aspectos mecânicos (resistência à compressão e resistência à tração por compressão diametral) e físicos (massa específica, absorção de água por imersão e por capilaridade), visando identificar alterações obtidas devido à presença do resíduo na mistura.

O programa experimental é resumido na Figura 3.1 abaixo

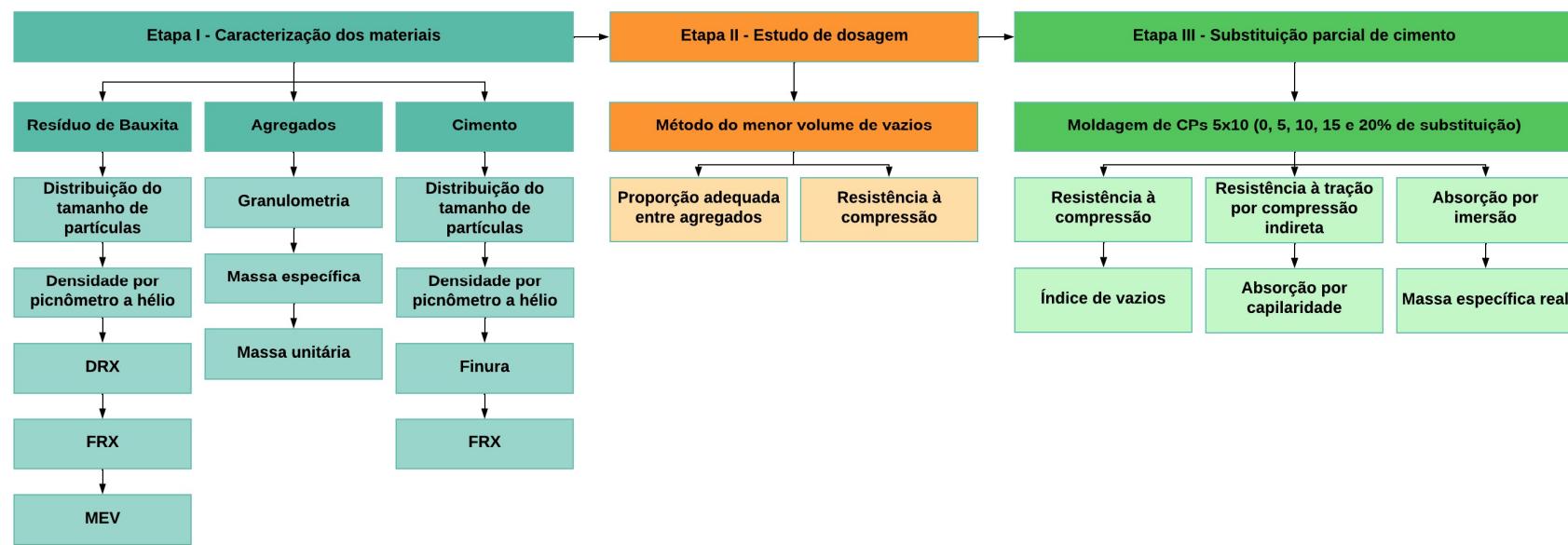


Figura 3.1: Programa experimental.

Fonte: (AUTORA, 2022)

3.1.Materiais

O principal aspecto a ser considerado durante a escolha da matéria-prima é sua aplicação. O concreto em estudo é do tipo seco, com baixo teor de umidade na mistura e agregados de granulometria fina, logo, a escolha dos materiais deve ser compatível. Os materiais foram coletados em uma fabricante de blocos de concreto, devidamente armazenados em bombonas plásticas.

O aglomerante adotado foi o cimento Portland CPV – ARI, analisado conforme NBR 16697 (ABNT, 2018). Os agregados miúdos considerados são areia fina e pó de pedra para promover compacidade de misturas dosadas e redução de índice de vazios no produto final. Os agregados foram avaliados conforme as considerações da NBR 7211 (ABNT, 2009). Ambos foram obtidos com determinada empresa da região de Bacabeira – MA.

O agregado graúdo considerado é a brita comercialmente definida como zero, utilizada em misturas de concreto seco para elevar a resistência da mistura e por possuir diâmetro máximo compatível com a espessura das paredes de blocos de concreto. O agregado também é avaliado conforme considerações da NBR 7211 (ABNT, 2009) e obtido a partir de determinada empresa da região de Bacabeira – MA, próxima à região metropolitana da cidade de São Luís – MA.

O resíduo adotado neste estudo é proveniente da planta de alumina localizada na cidade de São Luís – MA. O resíduo é coletado das lagoas artificiais, armazenado em baldes com capacidade de 5 Kg. O resíduo encontra-se com elevado teor de umidade, logo, foi levado à estufa de secagem à 105 ± 5 °C durante 24 horas para retirada da água excedente (Figura 3.2). Após a secagem houve o destorroamento dos grãos em moinho rotativo por 1 h, seguido de peneiramento à seco em peneira de abertura 150 μm . O material retido foi desconsiderado, conforme a Figura 3.2.

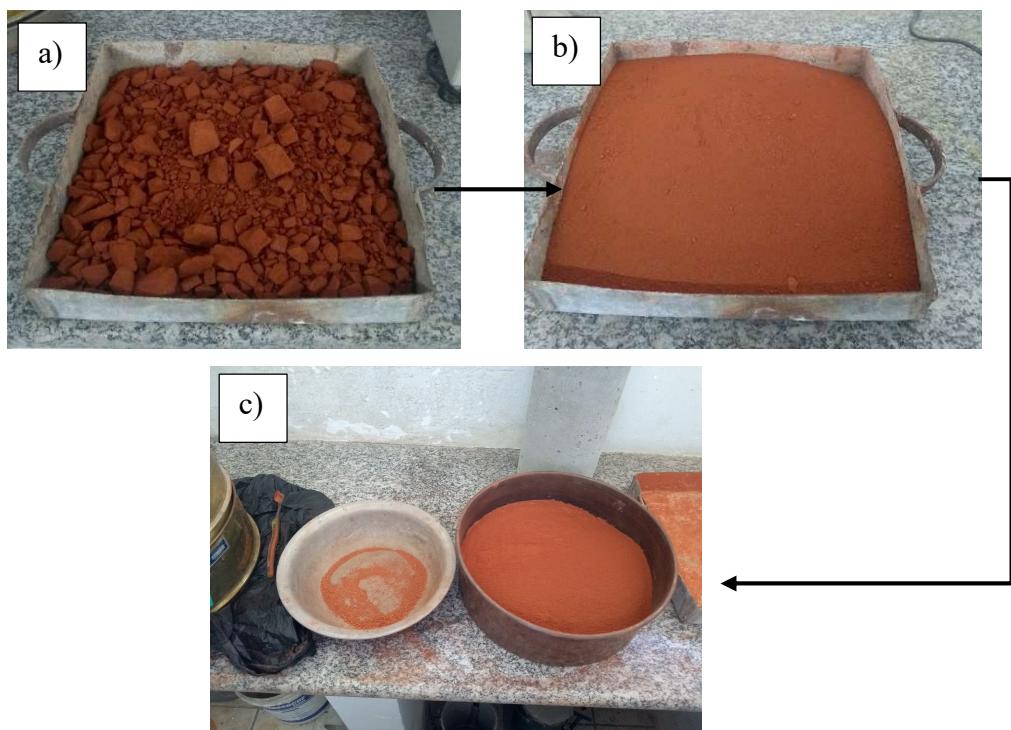


Figura 3.2: a) Resíduo após secagem em estufa, b) após destorramento em moinho rotativo, e c) material passante após peneiramento à seco em peneira 150 μm .

3.2. Métodos

3.2.1. Etapa I - Caracterização dos materiais

- **Cimento**

A técnica de espectrometria por fluorescência de raios X foi adotada para análise química quantitativa do cimento, em espectrômetro de fluorescência de raios X da Malvern Panalytical, modelo Zetium, com perda ao fogo realizada a 1020 °C por 2h.

A distribuição do tamanho de partículas foi obtida a partir da técnica de granulometria a laser em analisador de partículas da Malvern Panalytical, modelo Mastersizer 2000. O meio de dispersão adotado foi álcool isopropílico, velocidade da bomba a 2500 rpm e 1 min de ultrassom. A faixa de tamanho analisada é de 0,020 a 2000 μm .

A densidade foi efetuada por picnometria com instrusão de gás hélio, em equipamento da marca Micromeritics, modelo AccuPyc II 1340, com 10 ciclos de purga. As técnicas citadas acima foram realizadas pelo Laboratório de Caracterização Tecnológica da Universidade de São Paulo.

A finura do cimento foi obtida conforme NBR 11579 (ABNT, 2012), realizada no Laboratório de Concreto e Materiais da Universidade Estadual do Maranhão.

- **Agregados**

Os agregados, graúdos e miúdos, foram caracterizados conforme as especificações normativas brasileiras vigentes: massa específica conforme DNER-ME 194 (DNIT, 1998) e NM 53 (ABNT, 2009), massa unitária nos estados solto e compactado conforme NM 45 (ABNT, 2006), granulometria, diâmetro máximo característico e módulo de finura conforme NBR NM 248 (ABNT, 2003) e especificações determinadas para agregados em concreto segundo NBR 7211 (2009). A caracterização dos agregados foi realizada no Laboratório de Concreto e Materiais da Universidade Estadual do Maranhão.

- **Resíduo de Bauxita**

A distribuição do tamanho de partículas do resíduo foi feita a partir da técnica de granulometria a laser, em equipamento da Malvern Panalytical, modelo Mastersizer 2000. A água deionizada foi o meio de dispersão, com velocidade na bomba de 2500 rpm, e 1 min de ultrassom. A faixa de intervalo considerada para o ensaio é 0,02 a 2000 μm .

A densidade do resíduo foi realizada pelo método de picnometria com instruções de gás hélio, em equipamento da marca Micromeritics, modelo AccuPyc II 1340, com 10 ciclos de purga.

A técnica de espectrometria por fluorescência de raios X foi realizada para identificar a proporção de óxidos presentes no resíduo, em equipamento da Malvern Panalytical, modelo Zetium, com perda ao fogo realizada a 1020 °C por 2h.

As fases mineralógicas foram identificadas a partir da técnica de difração de raios X, a partir do método do pó, com uso do difratômetro de raios X com detector sensível a posição, em equipamento da Malvern Panalytical, modelo X'Pert. A identificação das fases cristalinas foi obtida por comparação do difratograma da amostra com bancos de dados *Powder Diffraction Files* (PDF2) do *International Centre for Diffraction Data* (ICDD) e *Inorganic Crystal Structure Database* (ICSD).

As técnicas analíticas citadas anteriormente foram realizadas pelo Laboratório de Caracterização Tecnológica da Universidade de São Paulo.

Para visualizar a morfologia da partícula, a técnica microscopia de varredura eletrônica foi adotada. A microscopia foi realizada em equipamento da marca Hitachi TM 3030, com ampliação de 15 a 30.000x, 5kV a 15kV, e energia dispersiva de raios X (EDS). A Tabela 3.1 abaixo apresenta um resumo dos ensaios e técnicas realizadas para a etapa de caracterização dos materiais.

Tabela 3.1: Resumo dos ensaios de caracterização realizados.

Materiais	Ensaio	Normas/ Técnicas
Cimento	Massa específica	Picnometria a hélio
	Finura	NBR 11579:2012
	FRX	Espectrometria
	Área superficial específica e distribuição do tamanho de partículas	Granulometria a laser
Agregados	Massa específica	DNER-ME 194/98 e NM 53:2009
	Massa unitária	NM 45:2006
	Granulometria	NBR 7211:2009 e NM 248:2003
Resíduo de Bauxita	Área superficial específica e distribuição do tamanho de partículas	Granulometria a laser
	DRX	Difração de raios-X
	FRX	Espectrometria
	Massa específica	Picnometria a hélio
	MEV	Microscopia eletrônica

Fonte: (AUTORA, 2022).

3.2.2. Etapa II – Estudo de dosagem

O método de menor volume de vazios para a determinação da composição ideal dos agregados foi considerado neste estudo por seu uso em concretos secos para blocos de concreto (IZQUIERDO, 2015; BUTTLER, 2007).

Buttler (2007) e Izquierdo (2015) entendem que o método apresenta algumas limitações, assim, ambos não consideram apenas a maior compacidade como fator definitivo para a escolha da proporção ideal entre agregados. Neste trabalho, as adaptações sugeridas por Frasson Júnior (2000) para o método de menor volume de vazios foram consideradas, as quais levam em conta a coesão no estado fresco do concreto moldado.

A ABCP (1995) apresenta traços utilizados na fabricação de concretos para blocos estruturais. Estes possuem a proporção cimento/agregados secos em três situações de consumo de cimento, sendo: rico (1:6), médio (1:10) e pobre (1:15). A presente metodologia não considera a variação do consumo de cimento, logo, adota-se o traço com consumo médio, 1:10. Conforme Izquierdo (2015), este traço médio apresenta uma resistência característica para blocos, $f_{bk} = 8 \text{ MPa}$.

3.2.3. Etapa III – Substituição parcial do cimento

Após a definição da proporção ideal entre brita zero, pó de pedra e areia grossa, substituições em relação à massa de cimento por RB foram realizadas nas porcentagens de 5%, 10%, 15% e 20%. Romano *et al.* (2020) demonstraram a possibilidade de substituição parcial em até 20% do ligante em ladrilhos hidráulicos, porém não há estudos na literatura considerando blocos de concreto como aplicação.

A substituição parcial tem como objetivo investigar a influência das propriedades físicas e morfológicas das partículas de RB na mistura, e averiguar a possibilidade do uso do resíduo como ligante alternativo. É importante frisar que o teor de umidade da mistura é fixado em 6%, conforme Izquierdo (2015) e Buttler (2007).

Os concretos produzidos foram misturados em betoneira e para simular o processo de fabricação dos blocos, os CPs serão preenchidos em quatro camadas, golpeadas 30 vezes com o soquete cilíndrico para argamassa fabricado em aço zinçado. Com seu peso, o soquete gera uma energia de adensamento de aproximadamente 3,3 N para conformar o concreto no molde.

Os CPs produzidos foram submetidos à cura úmida em solução saturada de óxido de cálcio durante as idades de hidratação 3, 7 e 14, e avaliados nos estados fresco e endurecido devido à importância de ambos durante a produção de blocos de concreto.

3.2.3.1.Critérios avaliados para o concreto no estado fresco

- **Coesão**

A coesão das misturas em estado fresco é avaliada a partir do posicionamento de duas amostras abaixo de uma superfície plana com dimensões (50x20) cm e espessura mínima de 1,5 cm, distantes em 30 cm em relação ao seu eixo, funcionando como apoios. Ao centro da superfície posiciona-se um cilindro de volume e massa conhecida, onde no decorrer do ensaio este cilindro é preenchido com água até que as duas amostras são esmagadas pela massa do cilindro em conjunto com a água inserida. A massa necessária, em kg, para o esmagamento representa a coesão obtida pela mistura no estado fresco.

Este ensaio é considerado no presente estudo para avaliar possíveis alterações na coesão das misturas a partir do incremento gradativo da lama vermelha. O esquema do ensaio (Figura 3.3) é representado abaixo.

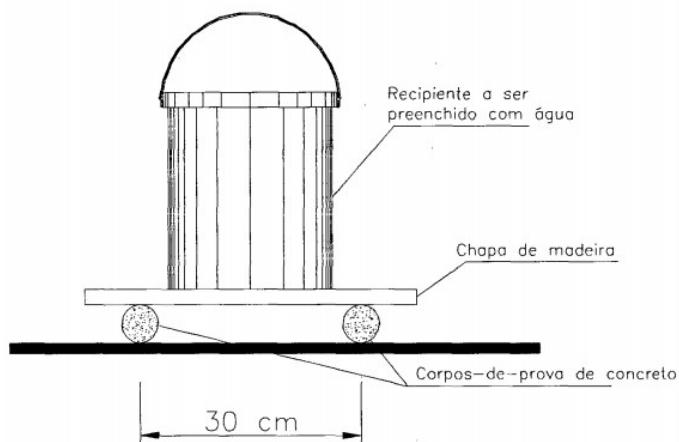


Figura 3.3: Detalhe do equipamento utilizado em ensaio.

Fonte: (FRASSON JÚNIOR, 2000)

3.2.3.2.Critérios avaliados para o concreto no estado endurecido

- **Absorção de água, massa específica e índice de vazios**

As propriedades dos concretos no estado endurecido para as misturas padrão e modificadas foram avaliadas em conformidade com a normatização brasileira

vigente, NBR 9778 (ABNT, 2009), na qual avalia-se a absorção de água, massa específica e índice de vazios do concreto endurecido.

- **Resistência à compressão**

Os concretos padrão e modificados com RB em sua composição foram avaliados mecanicamente a partir da resistência à compressão, ensaio realizado conforme a especificação da norma NBR 5739 (ABNT, 2018). A prensa eletrohidráulica com indicador digital, capacidade para 100 tf – 60 Hz, SOLOTEST foi utilizada para o ensaio de resistência à compressão e resistência à compressão diametral.

É importante frisar que a resistência à compressão será analisada, aos 3, 7 e 14 dias, estatisticamente por análise de variância (ANOVA) com auxílio do *plug-in Real Statistics* para *Microsoft Excel* ® para avaliar se há diferença significativa entre as médias obtidas entre grupos de substituição do resíduo conforme seu acréscimo.

- **Resistência à tração por compressão diametal**

Conforme o referencial bibliográfico, a resistência à tração indica o ponto de ruptura e fissuração nas alvenarias de bloco de concreto, logo, será avaliada conforme a NBR 7222 (ABNT, 2011) aos 14 dias de hidratação. Os resultados serão verificados a partir da ANOVA de uma via para comparação das médias obtidas nas diferentes porcentagens de resíduo, afim de avaliar semelhança ou distinção entre os resultados.

- **Absorção de água por capilaridade**

Para avaliar a ascensão capilar e possíveis alterações entre os traços moldados, o parâmetro físico de absorção por capilaridade será obtido conforme as especificações da NBR 9779 (ABNT, 2012). Os CPs foram avaliados após 14 dias de hidratação. A lâmina de água foi garantida com suportes metálicos posicionados no fundo de um recipiente retangular, conforme a Figura 3.4 ilustra.



Figura 3.4: Ensaio de absorção de água por capilaridade.

Fonte: (AUTORA, 2022).

Os critérios analisados estão resumidos na Tabela 3.2, bem como o total de CPs moldados para cada concreto avaliado e o traço adotado neste estudo. Considerando o total de 18 CPs para cada concreto analisado, e as substituições por LV em 0%, 5%, 10%, 15% e 20%, tem-se um total de 90 exemplares para a etapa II.

Tabela 3.2: Resumo da etapa II.

Método de dosagem	Critérios analisados	Normatização	Quantidade	Dimensões dos CPs	Traço adotado
	Coesão	Frasson Júnior (2000)	-		
Menor Volume de Vazios	Absorção de água				
	Massa específica	NBR 9778:2009	3		
	Índice de vazios				
	Absorção de água por capilaridade	NBR 9779:2012	3	Cilíndricos, (5 x 10) cm	1:10
	Resistência à compressão	NBR 5739:2018	9		
	Resistência à tração por compressão diametral	NBR 7222:2011	3		

Fonte: (AUTORA, 2022)

4. Resultados e discussões

4.1. Etapa I – Caracterização dos materiais

• Cimento

A Tabela 4.1 abaixo apresenta o resultado para as composições químicas do cimento Portland tipo V-ARI. Os três óxidos em maior proporção de massa são: CaO (53,5%), SiO₂(25,9%) e Al₂O₃(5,16%). O elevado teor de cálcio é relativo ao processo de fabricação deste tipo de cimento, que possui maior proporção de clínquer (ROMANO et al., 2019). As porcentagens em massa de óxidos presentes no CPV estão abaixo do limite máximo especificado pela NBR 16697 (ABNT, 2018).

Tabela 4.1: Óxidos presentes no CPV-ARI e limites especificados da norma brasileira.

Óxidos	Porcentagem de massa (%)	NBR 16697 (ABNT, 2018)
SiO ₂	25,9	-
Al ₂ O ₃	5,16	-
Fe ₂ O ₃	2,71	-
CaO	53,5	-
MgO	2,34	≤ 6,5
SO ₃	3,4	≤ 4,5
Na ₂ O	0,34	-
K ₂ O	0,99	-
TiO ₂	0,28	-
P ₂ O ₅	0,61	-
MnO	<0,05	-
SrO	0,06	-
PF	4,44	≤ 6,5

Fonte: (AUTORA, 2022)

A Figura 4.1 ilustra a distribuição de tamanho de partículas para o CPV-ARI, enquanto a Tabela 4.2 apresenta um resumo dos parâmetros físicos obtidos. A faixa de tamanho de partículas identificadas no CPV-ARI é de 0,710 a 79,963 µm. O tamanho médio das partículas é aproximadamente 10 µm, enquanto 90% das partículas são menores que 29,6 µm. A área superficial específica é 0,919 m²/g. A densidade, obtida a partir da técnica de piconometria por intrusão de gás hélio, é de 3,03 g/cm³. O resíduo na peneira 75 µm obtido a partir da NBR 11579 (ABNT,

2012) é de 4,05 g, abaixo do limite máximo normativo da NBR 16697 (ABNT, 2018).

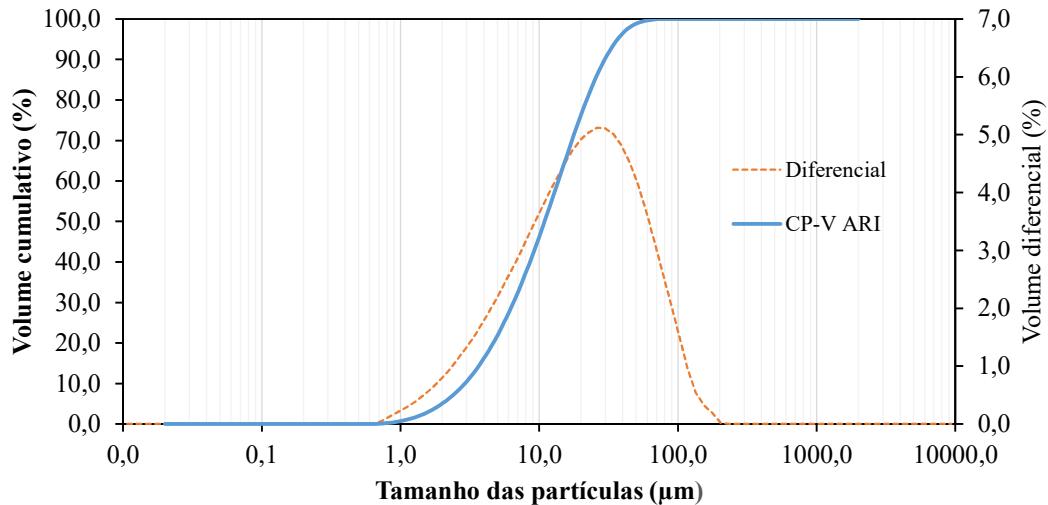


Figura 4.1: Distribuição de tamanho partículas do CPV-ARI.

Fonte: (AUTORA, 2022)

Tabela 4.2: Parâmetros físicos obtidos do CPV-ARI.

D₅₀ (μm)	D₉₀ (μm)	ASS (m ² /g)	Resíduo na peneira 75 μm (NBR 11579)	Resíduo na peneira 75 μm (NBR 16697)	Densidade por Picnômetro (g/cm ³)
10,927	29,607	0,919	4,05	≤ 6,0	3,03

Fonte: (AUTORA, 2022)

- **Agregados**

A determinação das composições granulométricas para areia, pó de pedra e brita zero utilizados foram realizadas em duas amostras para cada material. As tabelas Tabela 4.3, Tabela 4.4 e Tabela 4.5 apresentam os resultados obtidos durante o peneiramento a seco, realizado conforme a NM 248 (ABNT, 2003).

Tabela 4.3: Resultados do peneiramento das amostras 1 e 2 de areia.

Abertura (mm)	Amostra 1				Amostra 2			
	Peso Acumulado (g)	Peso Retido (g)	Retido (%)	Retido acumulado (%)	Peso Acumulado (g)	Peso Retido (g)	Retido (%)	Retido acumulado (%)
4,75	0,89	0,89	0,19	0,19	2,31	2,31	0,48	0,48
2,36	3,9	3,01	0,63	0,82	7,11	4,80	1,00	1,48
1,18	9	5,10	1,07	1,89	12,06	4,95	1,03	2,50
0,6	35,1	26,10	5,48	7,37	34,13	22,07	4,58	7,09
0,3	279,14	244,04	51,25	58,62	278,63	244,50	50,76	57,84
0,15	395,5	116,36	24,44	83,06	398,66	120,03	24,92	82,76
Fundo	476,18	80,68	16,94	100,00	481,71	83,05	17,24	100,00

Fonte: (AUTORA, 2022)

Tabela 4.4: Resultados do peneiramento das amostras 1 e 2 de pó de pedra.

Abertura (mm)	Amostra 1				Amostra 2			
	Peso Acumulado (g)	Peso Retido (g)	Retido (%)	Retido acumulado (%)	Peso Acumulado (g)	Peso Retido (g)	Retido (%)	Retido acumulado (%)
4,75	6,25	6,25	1,26	1,26	7,96	7,96	1,60	1,60
2,36	164,25	158,00	31,77	33,03	166,55	158,59	31,95	33,55
1,18	249,4	85,15	17,12	50,16	248,60	82,05	16,53	50,08
0,6	323,35	73,95	14,87	65,03	320,94	72,34	14,57	64,65
0,3	385,16	61,81	12,43	77,46	384,70	63,76	12,84	77,50
0,15	432,32	47,16	9,48	86,94	431,63	46,93	9,45	86,95
Fundo	497,25	64,93	13,06	100,00	496,40	64,77	13,05	100,00

Fonte: (AUTORA, 2022)

Tabela 4.5: Resultados de peneiramento para amostras 1 e 2 de brita zero.

Abertura (mm)	Amostra 1				Amostra 2			
	Peso Acumulado (g)	Peso Retido (g)	Retido (%)	Retido acumulado (%)	Peso Acumulado (g)	Peso Retido (g)	Retido (%)	Retido acumulado (%)
12,5	39,78	39,78	2,02	2,02	30,90	30,90	1,57	1,57
9,5	797,80	758,02	38,46	40,48	281,30	250,40	12,70	14,27
6,3	1639,00	841,20	42,69	83,17	1691,40	1410,10	71,51	85,77
4,75	1851,00	212,00	10,76	93,93	1852,20	160,80	8,15	93,93
2	1944,20	93,20	4,73	98,66	1941,30	89,10	4,52	98,44
Fundo	1970,70	26,50	1,34	100,00	1972,00	30,70	1,56	100,00

Fonte: (AUTORA, 2022)

A partir do peneiramento a seco obtém-se os valores de diâmetro máximo característico (D.M.C.) e módulo de finura (M.F.) dos agregados, parâmetros úteis para identificar e classificar os agregados. Os resultados obtidos para a areia, pó de pedra e brita estão resumidos na Tabela 4.6, em conjunto com as massas específica e unitária, parâmetros físicos relevantes para a dosagem do concreto.

Tabela 4.6: Resultados para D.M.C., M.F. e massas específica e unitária dos agregados.

Agregado	Diâmetro Máximo Característico (mm)	Módulo de Finura	Massa específica (g/cm³)	Massa Unitária (kg/m³)
Areia	1,18	1,52	2,65	1744,18
Pó de pedra	4,75	3,14	2,77	1709,22
Brita	12,5	6,00	2,89	1444,93

Fonte: (AUTORA, 2022)

Os resultados classificam a areia deste estudo como fina, abaixo da zona utilizável inferior e o pó de pedra como “areia grossa”, dentro do intervalo de zona utilizável superior para concreto.

O agregado graúdo apresenta uma faixa granulométrica entre 2 a 12,5 mm, transitando em brita 1 e brita 0 com presença de impurezas de pó de pedra. Ao considerar as zonas granulométricas propostas pela NBR 7211 (ABNT, 2009), a brita em análise pertence a zona granulométrica 4,75/12,5, a qual pertence à brita zero.

A Figura 4.2 apresenta a distribuição granulométrica dos agregados miúdos, bem como apresenta os limites inferior e superior da zona utilizável de agregado para concreto, conforme a NBR 7211. A areia apresenta distribuição uniforme, enquanto o pó de pedra possui distribuição bem graduada. Apesar da distribuição granulométrica não estar no intervalo proposto por norma, é possível utilizar o material em composições distintas conforme especificação da mesma norma, desde que apresentem resultados mecânicos adequados em testes laboratoriais para concreto.

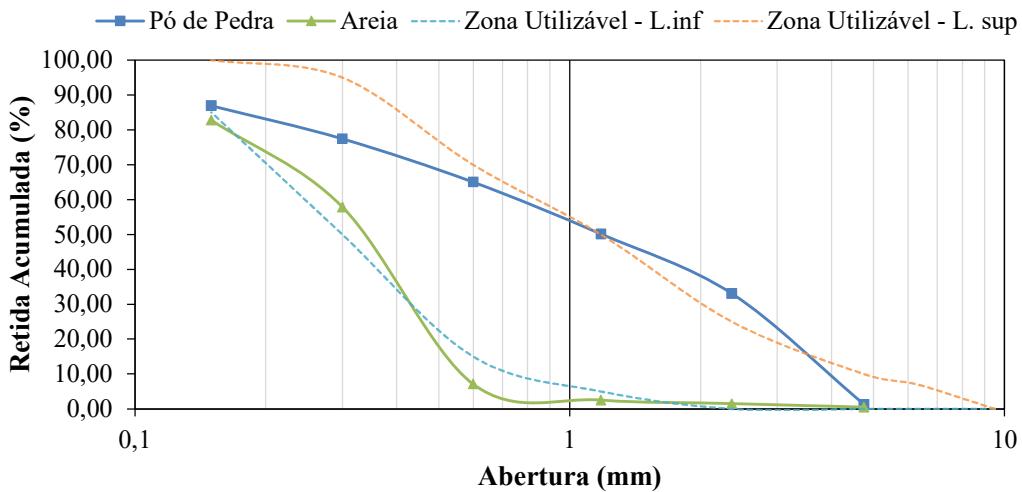


Figura 4.2: Distribuição granulométrica de pó de pedra e areia e limites da zona utilizável, conforme NBR 7211.

Fonte: (AUTORA, 2022).

A distribuição granulométrica da brita zero apresenta uniformidade, com alta declividade e grãos com dimensões próximas, conforme Figura 4.3. A distribuição granulométrica obtida possui uma região significativa fora da zona especificada pela NBR 7211, porém o agregado pode ser aplicado desde que apresente resultados adequados nos ensaios mecânicos em testes laboratoriais para concreto.

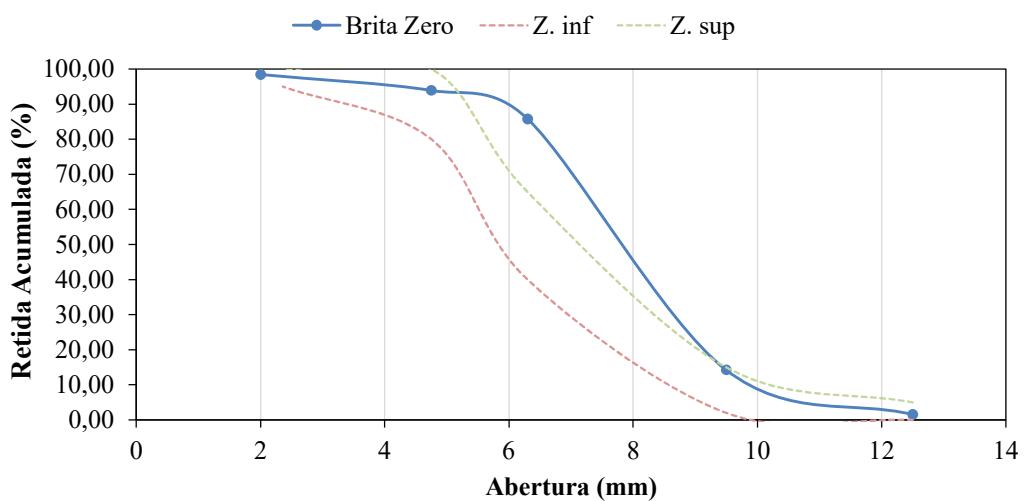


Figura 4.3: Distribuição granulométrica da brita zero e zona inferior e superior, conforme NBR 7211.

Fonte: (AUTORA, 2022).

- **Resíduo de Bauxita**

A Figura 4.4 apresenta o difratograma do resíduo de bauxita, com indicação dos respectivos picos encontrados e a identificação dos mesmos, de forma qualitativa. O *background* com elevações consideráveis indica a presença de fase amorfa na amostra devido à fluorescência do Fe. (MERCURY et al., 2011a) As fases mineralógicas encontradas são Hematita, Goethita, Sodalita, Calcita, Anatásio, Gibbsita e Quartzo e estão relacionadas à composição da bauxita originária, etapas do processo de dissolução ou a processos intermediários. A Tabela 4.7 resume os minerais, suas fórmulas químicas e seu padrão de identificação.

A calcita [CaCO_3] presente no resíduo de bauxita está relacionada à adição de cal hidratada [$\text{Ca}(\text{OH})_2$] durante a etapa de pré-dessilicatação. A gibbsita [$\text{Al}(\text{OH})_3$] identificada no resíduo é constituinte da bauxita originária, esta sendo uma bauxita predominantemente gibbsítica. A sodalita [$\text{Na}_8(\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24})\text{Cl}_2$] é proveniente da etapa de dessilicatação no processo Bayer e também responsável por parte significativa da natureza alcalina do resíduo.

Tabela 4.7: Fases mineralógicas identificadas no resíduo de bauxita.

ICDD	Mineral	Fórmula Química
01-087-1164	Hematita	Fe_2O_3
01-081-0464	Goethita	$\text{FeO}(\text{OH})$
98-007-9894	Sodalita	$\text{Na}_8(\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24})\text{Cl}_2$
01-086-2334	Calcita	CaCO_3
98-004-5374	Anatásio	TiO_2
01-074-1775	Gibbsita	$\text{Al}(\text{OH})_3$
01-085-0796	Quartzo	SiO_2

Fonte: (AUTORA, 2022).

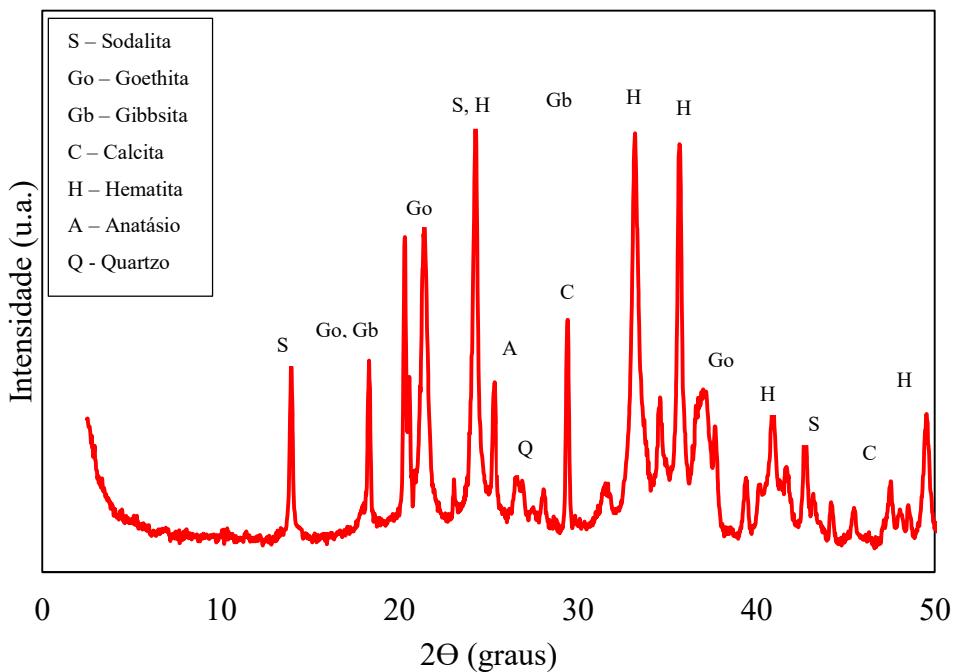


Figura 4.4: Difratrograma do resíduo de bauxita.

Fonte: (AUTORA, 2022)

As fases identificadas no resíduo também estão presentes em outros trabalhos. Apenas o Quartz não é encontrado no resíduo proveniente do Sudeste do país, similar ao resíduo indiano. Países como Gana (Hematita, Goethita, Quartz) e Austrália (Hematita, Sodalita, Anatásio, Gibbsita) apresentam algumas fases semelhantes, enquanto o resíduo proveniente da China possui apenas a Hematita. Essas variações estão relacionadas com a composição da bauxita originária e o processo de refinamento do minério. A Tabela 4.8 apresenta um resumo comparativo das fases deste estudo e dos resultados obtidos na literatura.

Tabela 4.8: Comparação entre fases mineralógicas encontradas neste estudo e na literatura.

Ref.	País de Origem	Fases mineralógicas						
		Hematita	Goethita	Sodalita	Calcita	Anatásio	Gibbsita	Quartzo
Autora (2022)	Brasil (NE)	+	+	+	+	+	+	+
Ribeiro, Labrincha, Morelli (2011)	Brasil (SE)	+	+	+	+	+	+	-
	China	+	-	-	-	-	-	-
Power,	Gana	+	+	-	-	-	-	+
Grafe,	Índia	+	+	+	+	+	+	-
Klauber (2011)	Austrália (Weipa)	+	-	+	-	+	+	-

Fase presente (+); Fase ausente (-).

Fonte: (AUTORA, 2022).

Assim como a mineralogia, a composição química também apresenta variações significativas. O resíduo em estudo possui predominância mássica de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 em sua composição, em concordância com as fases mineralógicas encontradas e com resultados obtidos por RB distintos na literatura nacional e internacional, conforme a Tabela 4.9. A análise realizada não avaliou a presença de Na_2O . O resíduo analisado apresenta teor de Fe_2O_3 elevado em relação ao resíduo do Sudeste do país, bem como a presença de outros óxidos residuais.

Tabela 4.9: Comparação entre óxidos presentes em resíduos de bauxita distintos.

Referência	País de Origem	Óxidos (%)										
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MnO	ZrO ₂	V ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	PF
Autora (2022)	Brasil (NE)	12,2	21,5	38,6	3,01	0,03	0,12	0,12	0,05	3,48	0,08	13,9
Ribeiro, Labrincha, Morelli (2011)	Brasil (SE)	14,34	19,87	19,85	4,61	0,21	-	-	-	2,66	-	27,20
	Jamaica	3	16,5	49,5	5,5	-	-	-	-	7	-	11,6
Reddy et al. (2020)	Espanha	3,81±0,16	12,40±1,07	37,22±0,33	6,30±0,20	0,06	-	-	-	20,10±0,59	0,51	11,34
	China	18,92	22,31	10,63	20,46	-	-	-	-	6,64	-	-
	Turquia	17,29	20,20	35,04	5,30	-	-	-	-	4	-	8,44

A distribuição do tamanho de partículas do resíduo em estudo é apresentada na Figura 4.5. O intervalo de partículas obtidas por granulometria a laser é de 0,71 a 79,621 μm . O tamanho médio das partículas é de 7 μm , valor compatível no intervalo de partículas citado por (REDDY et al., 2020)

O tamanho máximo das partículas é 24,2 μm e sua densidade é de 2,43 g/cm^3 . A distribuição do tamanho de partículas irregular e a densidade do resíduo são parâmetros semelhantes aos obtidos para o cimento (Figura 4.6), porém a área superficial específica equivale ao dobro do valor obtido para o ligante.

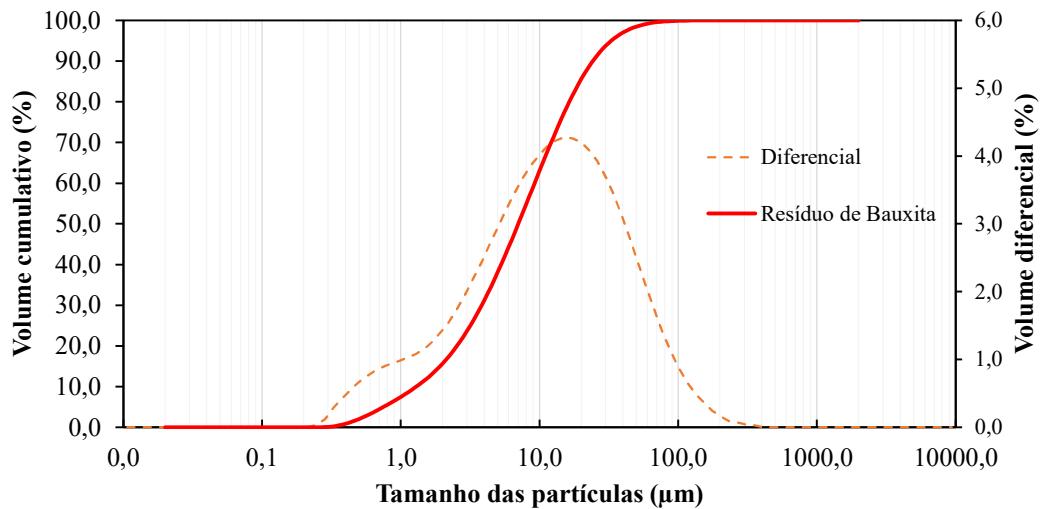


Figura 4.5: Distribuição do tamanho de partículas do resíduo de bauxita.

Fonte: (AUTORA, 2022).

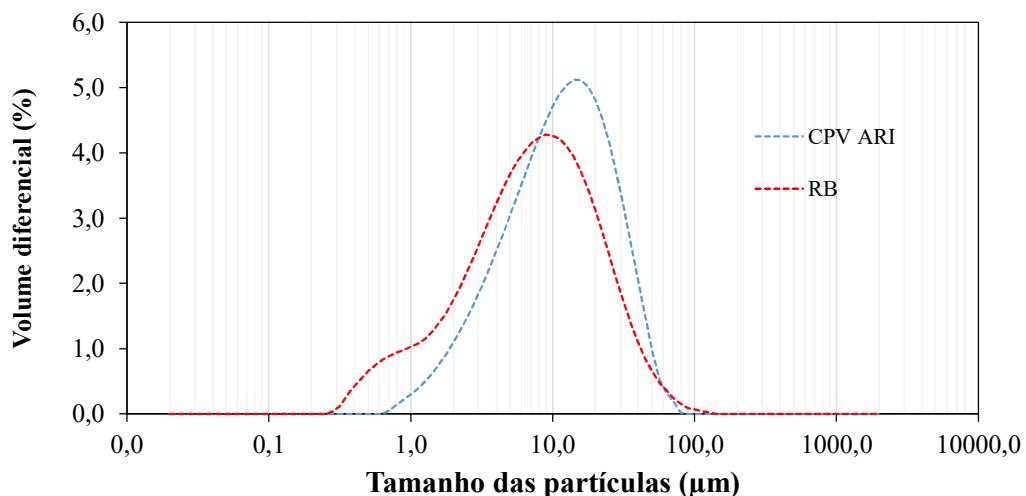


Figura 4.6: Comparação entre distribuição do tamanho de partículas do resíduo de bauxita e CP V ARI.

Fonte: (AUTORA, 2022).

A elevada área específica é consequência dos processos de moagem e dissolução de minerais durante o processo de beneficiamento do minério (POWER; GRÄFE; KLAUBER, 2011), enquanto a sua densidade está relacionada com a presença de átomos de Fe, estes sendo mais densos. Os parâmetros físicos estão resumidos na Tabela 4.10 abaixo.

Tabela 4.10: Resultados de granulometria e densidade.

D₁₀ (μm)	D₅₀ (μm)	D₉₀ (μm)	ASE (m²/g)	Densidade por Picnômetro (g/cm³)
1,295	7,028	24,200	1,87	2,43

Fonte: (AUTORA, 2022).

Os resultados obtidos acerca da técnica de MEV ilustram partículas com dimensões abaixo de 100 μm e a formação de aglomerados de micropartículas com estrutura porosa, aspecto que justifica a elevada área superficial (ZHANG et al., 2019) A Figura 4.7 ilustra a formação de aglomerados de micropartículas e sua estrutura porosa, com ampliação em 500 vezes, enquanto a Figura 4.8 apresenta outro aglomerado com ampliação de 1000 vezes. Nota-se a presença aglomerados particulares. A variabilidade morfológica também é observada, com partículas de formatos irregulares e aciculares.

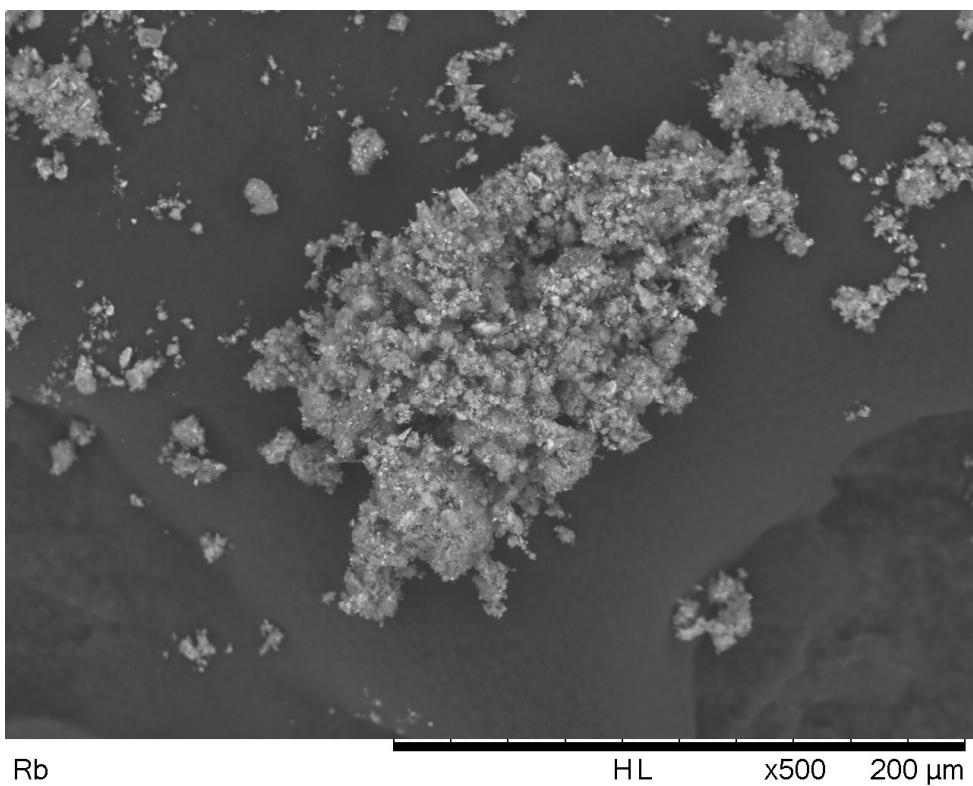


Figura 4.7: Microfotografia do resíduo de bauxita, ampliação em x500.

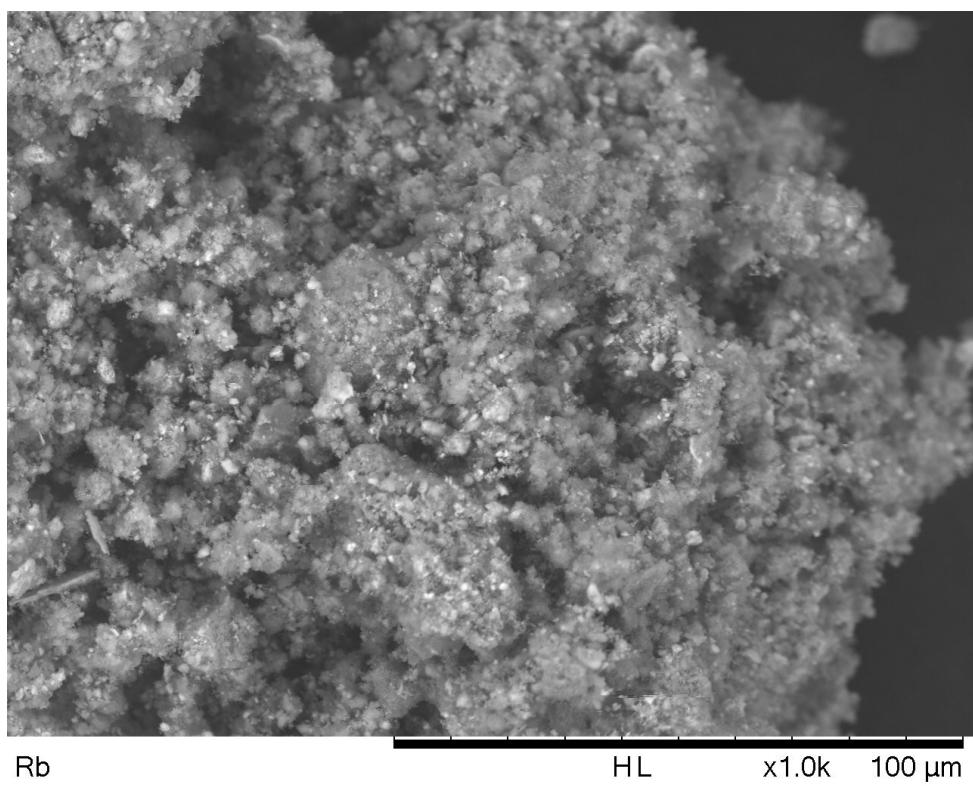


Figura 4.8: Microfotografia do resíduo de bauxita, ampliação em x1000.

Em conjunto com a técnica de MEV, a espectroscopia por energia dispersiva (EDS) foi aplicada em uma partícula para obter informações sobre os elementos prevalentes na amostra. Os elementos prevalentes são Si, Fe, Al, Na, Ti e Ca, em conformidade com as fases mineralógicas e a presença de óxidos, anteriormente apresentadas.

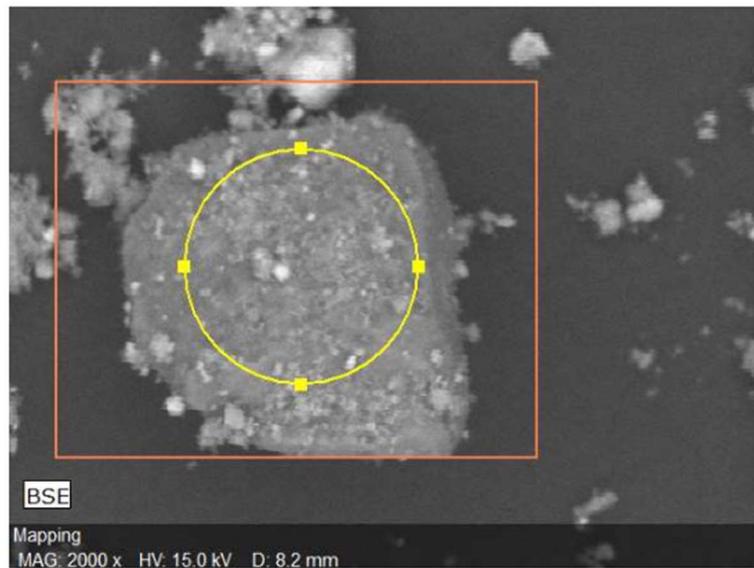


Figura 4.9: Partícula analisada com EDS.

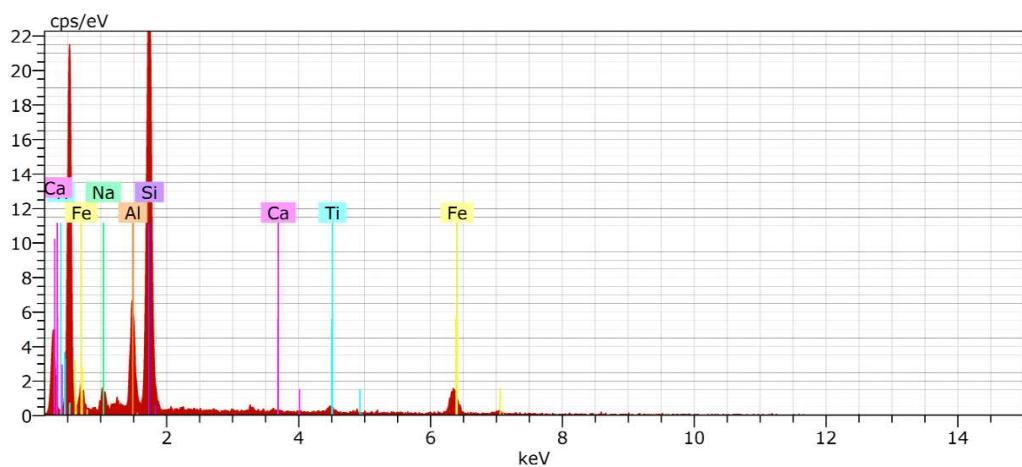


Figura 4.10: Elementos prevalentes na partícula analisada.

Fonte: (AUTORA, 2022).

4.2.Etapa II – Estudo de Dosagem

4.2.1. Definição do traço piloto

O estudo de dosagem realizado considera uma porcentagem fixa de areia (20%), enquanto os outros agregados (pó de brita e brita zero) são avaliados em diferentes proporções. O método de dosagem considera o preenchimento de um

recipiente com volume conhecido com as porcentagens variadas dos agregados até que se obtenha o menor volume de vazios. A Figura 4.11 ilustra o processo de mistura dos agregados.

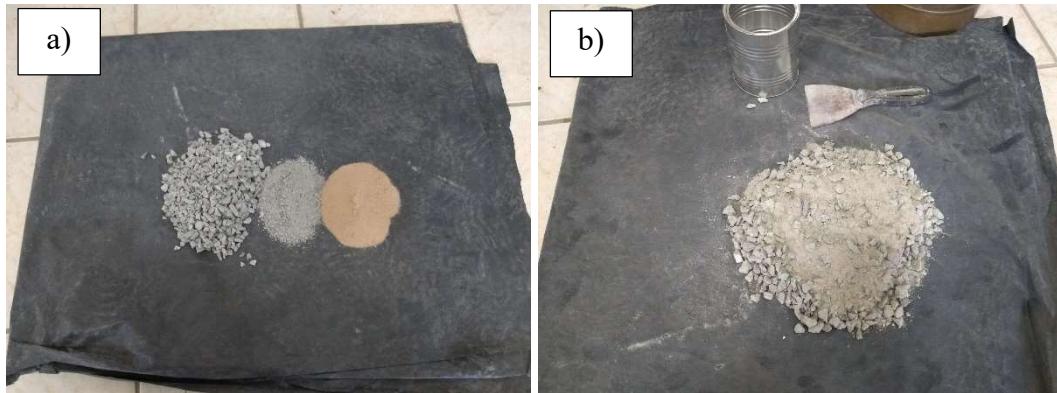


Figura 4.11: Agregados antes (a) e depois (b) da mistura para elaboração da curva de menor volume de vazios.

Fonte: (AUTORA, 2022).

Considerando 5 tipos de misturas distintas, as composições com 50%, 40% e 30% de brita apresentaram os menores valores para volume de vazios e foram adotadas para um teste-piloto, visando identificar os melhores resultados mecânicos e físicos.

A Tabela 4.11 apresenta os resultados para volume de vazios das diferentes composições consideradas. Observa-se também a relação entre a presença da brita e o volume de vazios a partir de uma equação de segundo grau (Figura 4.12), sendo o intervalo entre 20% a 40% ideal para obter o menor volume de vazios.

Tabela 4.11: Resultados de volume de vazios obtidos com porcentagens diversas de agregados.

Areia (%)	Areia (kg)	Pó (%)	Pó de Pedra (kg)	Brita (%)	Brita Zero (kg)	Massa Conjunto (kg)	Volume recipiente (m³)	Massa Unitária Conjunto (kg/m³)	Volume de vazios (%)
20	0,27	20	0,27	60	0,80	1,6360	0,00085	1924,71	31,62
20	0,32	30	0,48	50	0,80	1,6422	0,00085	1932,00	31,07
20	0,40	40	0,80	40	0,80	1,7334	0,00085	2039,29	26,94
20	0,53	50	1,33	30	0,80	1,7131	0,00085	2015,41	27,49
20	0,80	60	2,40	20	0,80	1,6941	0,00085	1993,00	28,00

Fonte: (AUTORA, 2022).

Para o teste piloto a resistência à compressão foi avaliada na idade de hidratação de 14 dias e a massa avaliada em seu estado endurecido. A Tabela 4.12 apresenta o consumo de materiais para as proporções com 50%, 40% e 30% de brita na mistura a partir de um traço 1:10 e $f_{bk} = 8$ MPa.

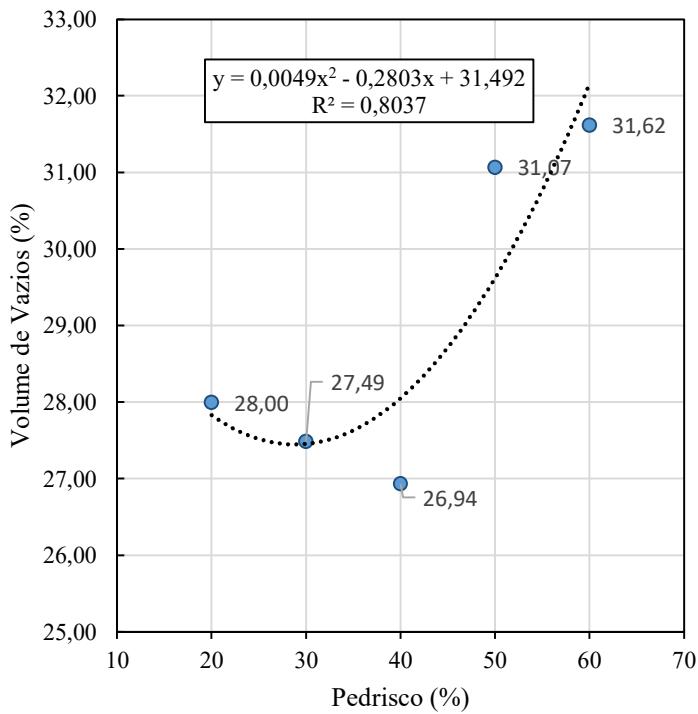


Figura 4.12: Relação entre volume de vazios e porcentagem de pedrisco presente na composição.

Fonte: (AUTORA, 2022).

Tabela 4.12: Testes piloto realizados e proporção de materiais para concreto.

Traço	Cimento (kg/m ³)	Areia (kg/m ³)	Pó de pedra (kg/m ³)	Brita zero (kg/m ³)	Água (l/m ³)
1:10, com					
50% de brita	256,4	512,8	769,2	1282,0	169,2
1:10, com					
40% de brita	255,4	510,8	1021,7	1021,7	168,6
1:10, com					
30% de brita	254,4	508,9	1272,2	763,3	167,9

Fonte: (AUTORA, 2022).



Figura 4.13: Corpo de prova do concreto seco após desmolde.

Fonte: (AUTORA, 2022).

A Figura 4.13 ilustra um corpo de prova do teste piloto após o desmolde. Os valores de resistência à compressão e massa dos corpos de prova avaliados estão resumidos na Tabela 4.13. Apesar de apresentar resultados inferiores de massa, a resistência à compressão do traço com 50% de brita possui os valores ideais, com resistência acima do f_{bk} proposto, logo este traço foi definido como padrão para as próximas etapas do estudo.

Tabela 4.13: Resultados obtidos de resistência à compressão e massa os testes piloto.

Traço	Massa (g)	Resistência (MPa)
50B0	424,28	9,49
	431,42	11,98
40B0	432,41	3,22
	430,1	3,93
30B0	462,88	4,1
	487,88	3,71

Fonte: (AUTORA, 2022).

4.3.Etapa III – Substituição parcial de cimento por resíduo de bauxita

A substituição parcial foi realizada considerando a densidade do ligante e do resíduo, afim de obter volumes ideais durante o processo de fabricação dos corpos de prova. A equação 4.1 abaixo representa o método utilizado para cálculo da substituição de massa de cimento por RB:

$$M_{rb} = \frac{M_{cim}}{\gamma_{cim}} * \gamma_{rb} \quad (4.1)$$

Onde:

M_{rb} é a massa, em g, do resíduo;

γ_{cim} , é a densidade, em g/cm³, do cimento;

γ_{rb} , é a densidade, em g/cm³, do resíduo;

M_{cim} , é a massa, em g, do cimento.

O traço piloto sem adição de RB é ilustrado na Figura 4.14. Conforme acréscimo na proporção de resíduo em relação ao teor de ligante a variação na coloração dos corpos de prova é notória (Figura 4.15, Figura 4.16, Figura 4.17 e Figura 4.18). O elevado teor de Fe₂O₃, óxido presente no RB e de cor avermelhada, justifica esta modificação, característica observada nos estudos realizados por (ROMANO et al., 2020)

A Tabela 4.14 abaixo apresenta o consumo de materiais para fabricação dos traços deste estudo, bem como o valor de RB incorporado. O teor de umidade (6%) manteve-se constante em todas as composições avaliadas.

Tabela 4.14: Resumo de consumo dos materiais conforme traço.

Traço	Cimento (g)	Areia (g)	Pó de pedra (g)	Brita (g)	Água (L)	Resíduo de bauxita (g)
RB0	1080	2150	3230	5390	0,71	0
RB5	1026	2150	3230	5390	0,71	43,3
RB10	972	2150	3230	5390	0,71	86,6
RB15	918	2150	3230	5390	0,71	129,9
RB20	864	2150	3230	5390	0,71	173,2

Fonte: (AUTORA, 2022).



Figura 4.14: Traço piloto sem adição de RB.

Fonte: (AUTORA, 2022).



Figura 4.15: Traço com adição de 5% de RB.

Fonte: (AUTORA, 2022).



Figura 4.16: Traço com adição de 10% de RB.

Fonte: (AUTORA, 2022).



Figura 4.17: Traço com adição de 15% de RB.

Fonte: (AUTORA, 2022).



Figura 4.18: Traço com adição de 20% de RB.

Fonte: (AUTORA, 2022).

Nota-se mudança de textura conforme o acréscimo de resíduo nas composições. Em RB0 houve maior facilidade para compactação e após o período inicial de cura no molde a superfície dos CPs possuem aspecto mais liso e melhor acabamento quando comparados aos traços com resíduo.

O aspecto áspero presente no acabamento dos CPs com resíduo traz vantagens quando se considera a interação de um sistema bloco-argamassa-revestimentos. A textura áspera melhora a aderência entre argamassas e revestimentos que possam ser aplicados na superfície, sendo essa textura adequada para blocos estruturais (FRASSON JÚNIOR, 2000).

4.3.1. Coesão

Os valores obtidos para coesão, segundo método proposto por Frasson Júnior (2000), estão resumidas para todas as composições na Tabela 4.15 abaixo. A Figura 4.19 ilustra o teste de coesão realizado em RB20.

Os valores obtidos não alcançaram o mínimo de 6 kg definido por Frasson Júnior (2000). O autor cita também que o elevado teor de finos na mistura beneficia a coesão. Por apresentar tamanho médio de partículas 7 μm o acréscimo de resíduo elevou consideravelmente a coesão, sendo o teor de 15% o maior valor obtido (4,088 kg).

Tabela 4.15: Valores de coesão obtidos para cada composição.

Composição	Coesão (Kg)
RB0	2,086
RB5	2,896
RB10	3,572
RB15	4,088
RB20	3,743

Fonte: (AUTORA, 2022).



Figura 4.19: Teste de coesão finalizado em RB20.

Fonte: (AUTORA, 2022).

4.3.2. Resistência à compressão

A resistência à compressão média considerando as idades de hidratação 3, 7 e 14 dias nos traços com substituição do ligante nas proporções 0%, 5%, 10%, 15% e 20% está representada na Figura 4.22. Os resultados detalhados coletados durante o ensaio estão expostos no Apêndice A.

Os rompimentos dos traços apresentaram um formato cônico semelhante. Após o ensaio, os CPs rompidos foram divididos em duas partes para visualizar a disposição da pasta de cimento e do agregado graúdo, conforme as Figura 4.20 e

Figura 4.21 abaixo. Observa-se a nível macroestrutural uma boa interação e aderência entre os agregados e pasta de cimento para os traços com e sem resíduo.



Figura 4.20: CPs de RB20 após ensaio de resistência à compressão.

Fonte: (AUTORA, 2022).



Figura 4.21: CPs de RB0 após ensaio de resistência à compressão.

Fonte: (AUTORA, 2022).

Há divergências na literatura acerca dos efeitos da RB na resistência à compressão. (NIKBIN et al., 2016) relatam o decréscimo da resistência ao elevar o teor de RB em 5, 10, 15, 20 e 25% aos 3 e 7 dias de hidratação em concretos leves, assim como (MANFROI; CHERIAF; ROCHA, 2014) ao elevar o teor de RB em 5, 10 e 15% em argamassas. (RIBEIRO; LABRINCHA; MORELLI, 2011) porém, demonstram otimização da resistência com até 15% de RB em argamassas. Nas pesquisas citadas não houve avaliação estatística da influência do RB.

Neste estudo, a resistência à compressão apresenta tendência de crescimento para todos os traços avaliados mas não há uma tendência bem definida em relação ao acréscimo do teor de RB, característica também relatada por Romano *et al.* (2020) em estudo com concreto com baixo teor de umidade para ladrilhos hidráulicos.

Aos 14 dias de hidratação o traço RB0 apresenta resistência média maior em comparação aos outros traços, exceto o RB20. Romano *et al.* (2018) demonstraram o efeito filer em composições com elevadas proporções de RB, que atua preenchendo os possíveis vazios e espaços entre partículas com novos pontos de nucleação, densificando a argamassa cimentícia.

Avaliando os dados estatisticamente, as variações entre médias de resistência à compressão foram comparadas conforme a idade de hidratação. As hipóteses nula e alternativa e os critérios de aceitação ou rejeição das hipóteses são:

H_0 : Não há diferenças entre as médias dos grupos avaliados

H_1 : há diferenças entre as médias dos grupos avaliados

Sendo $\alpha = 0,05 \rightarrow$ Se p – valor $< 0,05$; H_0 rejeitada; H_1 aceita

Sendo $\alpha = 0,05 \rightarrow$ Se p – valor $> 0,05$; H_0 aceita

Nas idades de hidratação 3 (p-valor = 0,22 $> 0,05$) e 14 (p-valor = 0,57 $> 0,05$) não houve distinção entre as médias dos grupos, logo não há influência no acréscimo de resíduo de bauxita para a resistência à compressão nas composições avaliadas. Aos 7 dias (p-valor = 0,03 $< 0,05$) de cura, entretanto, o resíduo de bauxita incorporado afetou as médias dos traços em estudo.

Para identificar entre quais grupos houve a diferença fez-se necessário o uso do teste *post-hoc* de Tukey. Identificou-se a diferença entre grupos a partir do p-valor < 0,05. A diferença de grupos entre 10% e 20% (p-valor = 0,02 < 0,05) demonstra que estes dois grupos possuem diferenças estatísticas significativas.

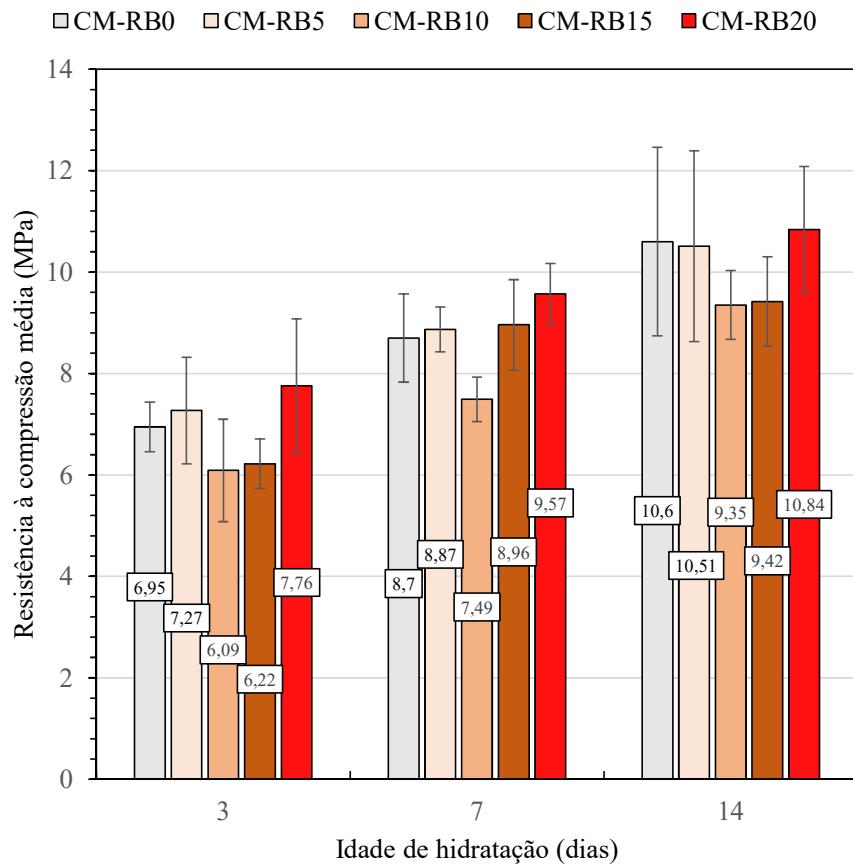


Figura 4.22: Resistência à compressão média com diferentes teores de RB nas idades de cura de 3, 7 e 14 dias.

Fonte: (AUTORA, 2022).

Considerando a especificação da NBR 6136 (ABNT, 2016) a partir do sétimo dia de hidratação todos os traços avaliados podem ser aplicados para blocos de concreto com função estrutural classe A, exceto RB10 que apresenta valores de resistência compatíveis com blocos de concreto com função estrutural de classe B. Apesar da distinção de classes, todos os traços elaborados estão no intervalo exigido na normatização brasileira para resistência à compressão em blocos de concreto estruturais.

4.3.3. Resistência à tração por compressão diametal

A resistência à tração por compressão diametal foi avaliada apenas no 14º dia de hidratação. A Figura 4.23 ilustra a resistência à tração média obtida para cada traço avaliado. Os resultados detalhados para este ensaio estão expostos no Apêndice B. Não há uma tendência definida de redução ou crescimento da resistência à tração conforme incremento do teor de RB.

A tendência observada neste trabalho entra em conflito com outros estudos. (VENKATESH; RUBEN; CHAND, 2020) observou acréscimo de resistência à tração ao incorporar até 10% de RB na composição com diferentes fatores águacimento, enquanto (NIKBIN et al., 2016) observou a redução da resistência conforme o teor de RB era elevado, sem que houvesse avaliação estatística de seus resultados.

A ANOVA de uma via realizada para a resistência à tração aos 14 dias de hidratação não apresentou diferença entre as médias dos grupos (p -valor = $0,40 > 0,05$), desta forma a adição de RB nas composições não afetou a resistência à tração dos concretos avaliados.

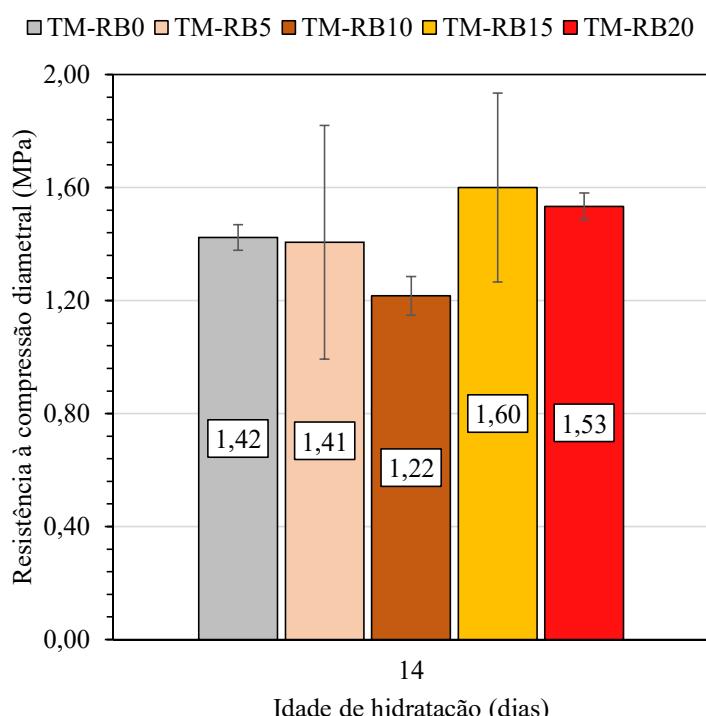


Figura 4.23: Resistência à compressão diametal média com diferentes teores de resíduo aos 14 dias de hidratação.

Fonte: (AUTORA, 2022).

4.3.4. Absorção de água por capilaridade

Os resultados para absorção de água por capilaridade são ilustrados na Figura 4.24. Os resultados detalhados obtidos durante o ensaio estão expostos no Apêndice C. Apesar de RB5 apresentar acréscimo de absorção por capilaridade (diferença de 0,39 g/cm² em relação ao traço padrão, às 72h), RB10, RB 15 e RB20 apresentam redução significativa (diferenças de 0,34; 0,56 e 0,5 g/cm² em relação ao traço padrão, respectivamente, às 72h).

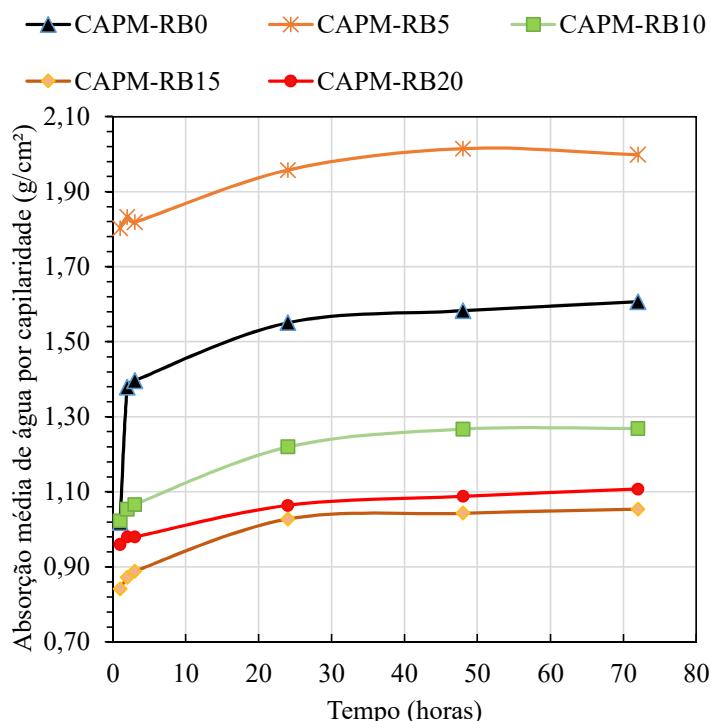


Figura 4.24: Absorção média de água por capilaridade em relação ao tempo de leitura.

Fonte: (AUTORA, 2022).

Ao avaliar a absorção de água por capilaridade em ladrilhos hidráulicos confeccionados com CPV, Romano *et al.* (2020) obtiveram resultados semelhantes de redução do coeficiente de absorção ao acrescentar resíduo na mistura. Resultados com teor de substituição acima de 10% apresentaram redução significativa de permeabilidade. A otimização é relacionada ao acréscimo do teor de finos, que promovem maior empacotamento e redução dos poros percoláveis.

4.3.5. Índice de vazios, absorção por imersão e massa específica real

As Figura 4.25, Figura 4.26 e Figura 4.27 ilustram os resultados de índice de vazios, absorção por imersão e massa específica real média em relação ao teor de resíduo incorporado na mistura. Os resultados obtidos diretamente nos ensaios estão dispostos no Apêndice D.

O índice de vazios apresenta redução de 0,55% em RB5 quando comparado a RB0. Em RB10, RB15 e RB20 entretanto, observa-se crescimento de 7,5%; 11,33% e 14,30%, respectivamente, em relação ao traço padrão. (VIGNESHWARAN; UTHAYAKUMAR; ARUMUGAPRABU, 2019) citam a influência do RB no processo de formação de vazios em matrizes poliméricas com fibras. Ao acrescentar a proporção de resíduos tem-se a formação de aglomerados e redução do material matriz, prejudicando a ligação entre os componentes e facilitando a formação de vazios.

A massa específica real apresenta apenas em RB5 uma redução de 3,7% em relação a RB 0. Em RB10, RB15 e RB20 nota-se a tendência de crescimento da massa específica em 4,9%, 4,1% e 3,3% em relação ao traço padrão, respectivamente. A presença significativa de óxidos com átomos de massa atômica elevada (Fe e Al) em sua composição química elevam a massa específica da mistura. (MERCURY et al., 2011a)

Apesar da tendência de crescimento, a ANOVA de uma via demonstrou que não há diferenças significativas entre as médias para índice de vazios ($p\text{-valor} = 0,072 > 0,05$) e massa específica real ($p\text{-valor} = 0,097 > 0,05$). Assim, o resíduo não influencia, até o ponto máximo avaliado de incorporação, estes parâmetros físicos.

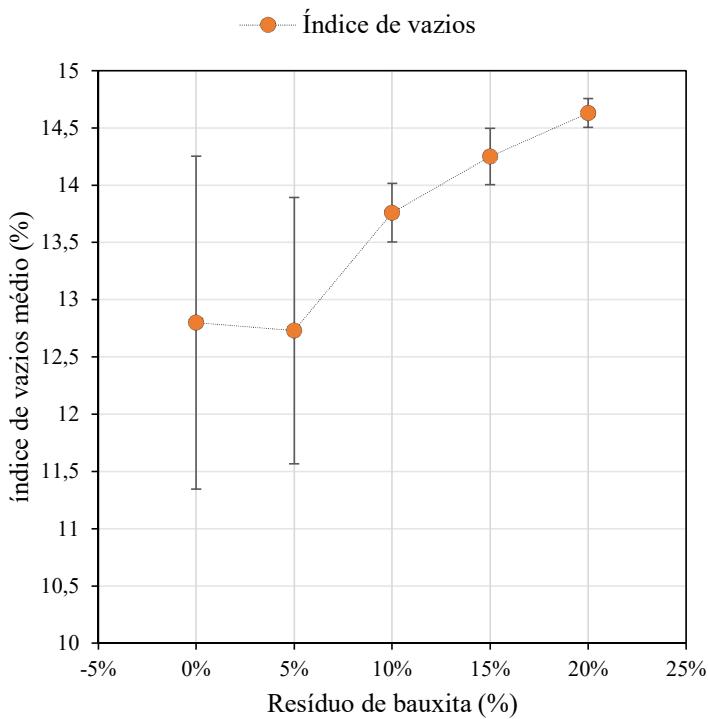


Figura 4.25: Índice de vazios em relação ao teor de resíduo de bauxita incorporado.

Fonte: (AUTORA, 2022).

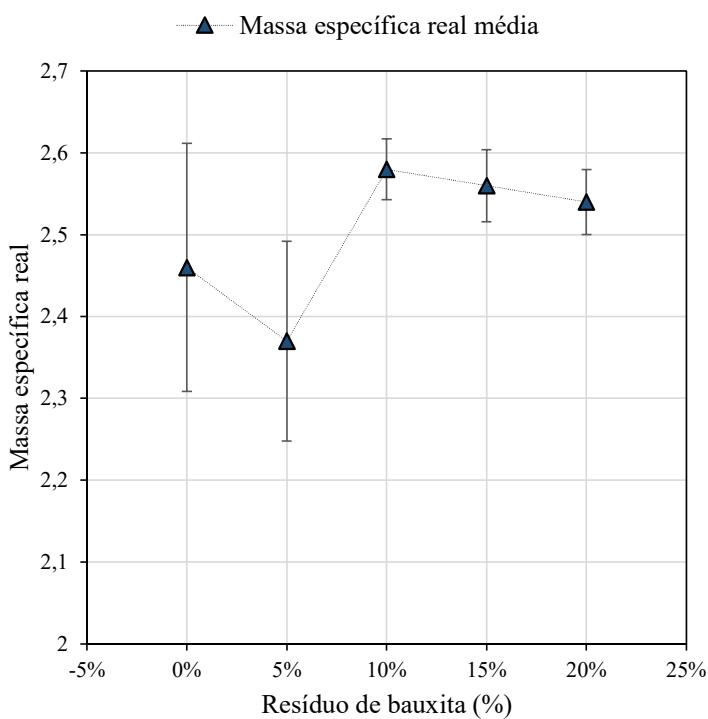


Figura 4.26: Massa específica real em relação ao teor de resíduo incorporado.

Fonte: (AUTORA, 2022).

Para a absorção por imersão (p -valor = 0,049) houve influência do resíduo nas respostas obtidas. A diferença entre médias foi observada entre os grupos RB0 e RB20 (p -valor = 0,046). A absorção por imersão apresenta uma tendência de crescimento, também encontrada em outros trabalhos (GHALEHNOVI et al., 2019; NIKBIN et al., 2016; SENFF; HOTZA; LABRINCHA, 2011)

Em relação ao RB para RB5 tem-se acréscimo de 2,8%; RB10; 3,5%; RB15; 8,5%. e RB20; 12,9%. Nota-se que (NIKBIN et al., 2016) apresentaram tendências de crescimento de absorção similares, com uma diferença de crescimento de 3% do teor de 15% de adição do resíduo para o teor de 20%, enquanto este trabalho apresentou uma diferença de 4,4% de RB15 para RB20.

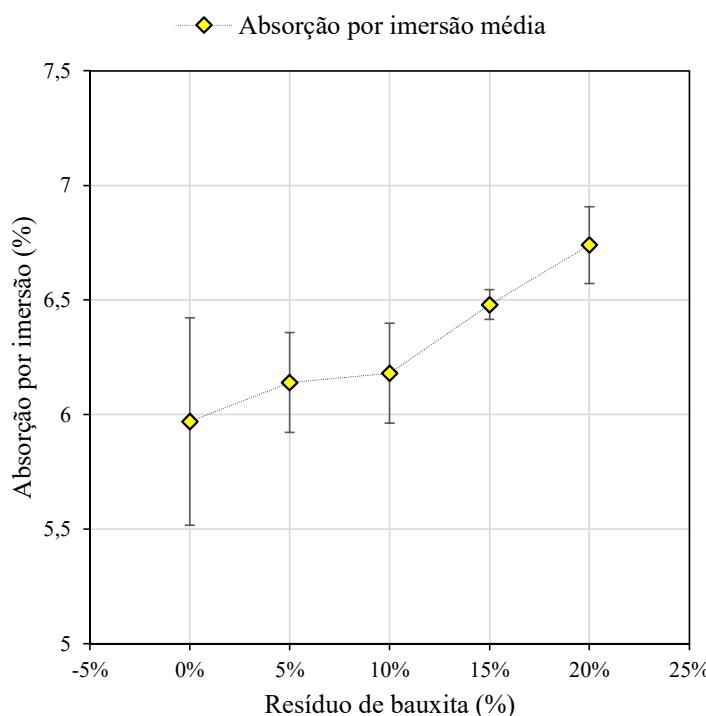


Figura 4.27: Absorção por imersão média em relação ao teor de resíduo incorporado.

Fonte: (AUTORA, 2022).

A influência do RB na absorção por imersão está relacionada com propriedades físicas e morfológicas do resíduo, com formação de microestruturas porosas e irregulares. A área superficial específica do RB é duas vezes o valor obtido para o cimento, elevando a taxa de absorção por imersão. Apesar da diferença entre RB0 e RB20, os resultados obtidos apresentaram valores de absorção inferiores aos limites individuais e médios da NBR 6136 (ABNT, 2016).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E ESTUDOS FUTUROS

5.1.Considerações finais

Conforme apresentado no Capítulo 4, a caracterização da matéria-prima e a confecção de CPs reduzidos foram realizados. A caracterização apresentou respostas físicas e químicas da matéria-prima, enquanto os traços moldados permitiram avaliar as propriedades mecânicas e físicas de concreto seco, com substituição parcial de Cimento Portland por RB. As principais conclusões obtidas deste estudo são:

- A incorporação de resíduo na mistura afeta a textura dos CPs para blocos de concreto, tornando-a áspera. Esta textura é adequada para blocos de concreto que serão revestidos, otimizando a interação física entre o substrato e revestimento;
- A coesão dos traços aumenta conforme o teor de resíduo é elevado, apesar dos resultados não estarem compatíveis com o valor mínimo estipulado por Frasson Júnior (2000);
- A resistência à compressão não apresentou tendência bem definida em relação ao acréscimo do teor de RB. A ANOVA de uma via demonstrou que houve diferença estatística entre os grupos RB10 e RB20, aos 7 dias de hidratação;
- A resistência à tração por compressão diametral não apresentou tendência bem definida em relação ao acréscimo de RB na mistura, conforme observado também na resistência à compressão. A ANOVA de uma via demonstrou que não há diferença estatística entre os grupos, logo, a incorporação de RB não afeta esta propriedade mecânica;
- O acréscimo de resíduos na mistura reduz a absorção por capilaridade. Nota-se que a redução é elevada após RB10. Esta redução ocorre devido à presença de finos no resíduo, que promovem empacotamento e refinamento de poros percoláveis;
- A massa específica, índice de vazios e absorção por imersão em água apresentam tendência de crescimento conforme o teor de RB é elevado na mistura, porém, apenas a absorção por imersão apresenta diferenças estatísticas significativas entre grupos avaliados. A diferença entre médias é observada entre RB0 e RB20. A microestrutura porosa, irregular e com

área superficial específica elevada em relação ao cimento afeta a capacidade de absorção de água, entretanto os valores individuais e médios de absorção são inferiores ao máximo estipulado pela NBR 6136.

Assim, a substituição parcial de cimento em composições de concreto seco possuem propriedades físicas e mecânicas adequadas para blocos de concreto estruturais, conforme especificações da NBR 6136.

5.2. Estudos futuros

Os próximos estudos devem considerar:

- Avaliar o uso de superplasticificantes em composições com teores distintos de RB incorporado em concreto seco, visando a otimização do processo de moldagem, reduzindo a porosidade e índice de vazios;
- Confeccionar blocos de concreto com adição de RB adotando o método de produção industrial para avaliar alterações mecânicas e físicas;
- Avaliar a alteração das fases mineralógicas conforme a incorporação de RB nas misturas de concreto seco nos tempos de hidratação iniciais (1, 3 e 7 dias);
- Avaliar substituições em taxas mais elevadas (20%, 40% e 60%), afim de encontrar o teor máximo de incorporação possível para concretos secos.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 16606: **Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da pasta de consistência normal.** Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 16607: **Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação dos tempos de pega.** Rio de Janeiro, 2018.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NM 53: **Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água.** Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR NM 45: **Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios.** Rio de Janeiro, 2006.

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

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR NM 248: **Agregados – Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 10004: **Resíduos sólidos – Classificação.** Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 10005: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 6136: Blocos vazados de concreto simples para alvenaria - Requisitos. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 9833: Concreto fresco – Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 12118: Blocos vazados de concreto simples para alvenaria – Métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009.

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

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

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C1585: **Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes.** West Conshohocken, 2013.

AUSTRALIAN/NEW ZEALAND STANDARD. AS/NZS 4456.6: **Masonry units, segmental pavers and flags – Determining potential to effloresce.** Sydney, 2003.

ABDUL-WAHAB, S. A. et al. **An overview of alternative raw materials used in cement and clinker manufacturing** International Journal of Sustainable Engineering Taylor and Francis Ltd., , 2021.

ALBUQUERQUE, S. M. DE. **Estudo para uso de agregado de resíduos de construção e demolição em blocos de concreto para alvenaria.** [s.l.] Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. Boletim Técnico - Produção de Blocos de Concreto para Alvenaria - Prática Recomendada. São Paulo: [s.n.].

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. Bauxita no Brasil: Mineração responsável e competitividade. [s.l: s.n.].

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. Plano Energético para a indústria de alumínio no Brasil. [s.l: s.n.].

BRASIL. Anuário Mineral Brasileiro: Principais substâncias metálicas. [s.l: s.n.].

BUDAPESTE. The Kolontár Report: Causes and lesson from the red mud disaster. [s.l: s.n.].

BUTTLER, A. M. Uso de agregados reciclados de concreto em blocos de alvenaria estrutural. Tese de Doutorado—[s.l.] Universidade de São Carlos, 2007.

CALLISTER, W. D. Materials Science and Engineering: An Introduction. [s.l.] John Wiley & Sons, 2000.

CHIDIAC, S. E.; MIHALJEVIC, S. N. Performance of dry cast concrete blocks containing waste glass powder or polyethylene aggregates. Cement and Concrete Composites, v. 33, n. 8, p. 855–863, set. 2011.

DA LUZ, A.; ALMEIDA, S. Manual de agregados para a construção civil. Rio de Janeiro: [s.n.].

FRASSON JUNIOR, A. Proposta de metodologia de dosagem e controle do processo produtivo de blocos de concreto para alvenaria estrutural. [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2000.

GHALEHNOVI, M. et al. Self-compacting architectural concrete production using red mud. Construction and Building Materials, v. 226, p. 418–427, 2019.

GLOBAL CEMENT AND CONCRETE ASSOCIATION. Key Facts. Disponível em: <<https://gccassociation.org/key-facts/>>. Acesso em: 8 maio. 2022.

GOW, N. N.; LOZEJ, G. P. Bauxite. Geoscience Canada, v. 20, n. 1, p. 8, 1993.

GRÄFE, M.; POWER, G.; KLAUBER, C. Bauxite residue issues: III. Alkalinity and associated chemistry. Hydrometallurgy, v. 108, n. 1–2, p. 60–79, 1 jun. 2011.

HABASHI, F. HUNDRED YEARS OF THE BAYER PROCESS FOR ALUMINA PRODUCTION. CIM Bulletin, v. 81, n. 909, p. 70–76, jan. 1988.

HAMMOND, K. **RECOVERY OF VALUE-ADDED PRODUCTS FROM RED MUD AND FOUNDRY BAG-HOUSE DUST.** [s.l: s.n.].

INTERNATIONAL ALUMINIUM INSTITUTE. **Bauxite Residue Management: Best Practice.** [s.l: s.n.]. Disponível em: <www.world-aluminium.org>. Acesso em: 11 mar. 2020.

INTERNATIONAL ALUMINIUM INSTITUTE. **Mining and Refining – Process.** Disponível em: <<http://bauxite.world-aluminium.org/refining/process/>>. Acesso em: 15 mar. 2020.

IZQUIERDO, I. S. **Utilização de pós residuais e fibra de sisal em blocos de concreto.** [s.l.] Universidade de São Paulo, 2015.

KHAIRUL, M. A.; ZANGANEH, J.; MOGHTADERI, B. The composition, recycling and utilisation of Bayer red mud. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 141, p. 483–498, 1 fev. 2019.

LIMA, M. S. S.; THIVES, L. P. Evaluation of red mud as filler in Brazilian dense graded asphalt mixtures. **Construction and Building Materials**, v. 260, p. 119894, 2020.

LIU, W.; YANG, J.; XIAO, B. **Review on treatment and utilization of bauxite residues in China** *International Journal of Mineral Processing* Elsevier, , 8 dez. 2009.

MACÊDO, A. N. et al. Comportamento de blocos cerâmicos estruturais produzidos a partir da mistura de lama vermelha e argila. **Ambiente Construído**, v. 11, n. 4, p. 25–36, dez. 2011.

MANFROI, E. P.; CHERIAF, M.; ROCHA, J. C. Microstructure, mineralogy and environmental evaluation of cementitious composites produced with red mud waste. **Construction and Building Materials**, v. 67, p. 29–36, 2014.

MARCHIONI, M. L. **Desenvolvimento de técnicas para caracterização de concreto seco utilizado na fabricação de peças de concreto para pavimentação intertravada.** [s.l.] Universidade de São Paulo, 2012.

MASHALY, A. O.; SHALABY, B. N.; RASHWAN, M. A. Performance of mortar and concrete incorporating granite sludge as cement replacement. **Construction and Building Materials**, v. 169, p. 800–818, 30 abr. 2018.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete - Microstructure, properties and materials.** Fourth ed. [s.l.] McGraw-Hill, 2014.

MERCURY, J. M. R. et al. Thermal behavior and evolution of the mineral phases of Brazilian red mud. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 104, n. 2, p. 635–643, maio 2011a.

MERCURY, J. M. R. et al. Thermal behavior and evolution of the mineral phases of Brazilian red mud. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 104, n. 2, p. 635–643, 22 maio 2011b.

MEYER, F. M. Availability of Bauxite Reserves. **Natural Resources Research**, v. 13, n. 3, p. 161–172, set. 2004.

MOHAMAD, N. et al. **Environmental impact of cement production and Solutions: A review**. Materials Today: Proceedings. Anais...Elsevier Ltd, 2021.

NAQI, A.; JANG, J. G. **Recent progress in green cement technology utilizing low-carbon emission fuels and raw materials: A review**Sustainability (Switzerland)MDPI, , 21 jan. 2019.

NIKBIN, I. M. et al. Environmental impacts and mechanical properties of lightweight concrete containing bauxite residue (red mud). **Journal of Cleaner Production**, v. 172, p. 2683–2694, 13 jul. 2016.

NOVAIS, R. M. et al. Innovative application for bauxite residue: Red mud-based inorganic polymer spheres as pH regulators. **Journal of Hazardous Materials**, v. 358, p. 69–81, 2018.

PARSEKIAN, G. et al. Concrete block. In: **Long-term Performance and Durability of Masonry Structures: Degradation Mechanisms, Health Monitoring and Service Life Design**. [s.l.] Woodhead Publishing, 2018. p. 21–57.

PATEL, S.; PAL, B. K. Current Status of an Industrial Waste: Red Mud an Overview. **International Journal of Latest Technology in Engineering, Management and Applied Science**, v. 4, n. 8, p. 16, 2015.

PEPPER, R. A.; COUPERTHWAITE, S. J.; MILLAR, G. J. Value adding red mud waste: Impact of red mud composition upon fluoride removal performance of synthesised akaganeite sorbents. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 6, n. 2, p. 2063–2074, 2018.

PÉREZ-CARRIÓN, M. et al. Potential use of sewage sludge ash (SSA) as a cementreplacement in precast concrete blocks. **Materiales de Construccion**, v. 64, n. 313, 2014.

PONTIKES, Y.; ANGELOPOULOS, G. N. Bauxite residue in cement and cementitious applications: Current status and a possible way forward. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 73, p. 53–63, 2013.

PORLAND CEMENT ASSOCIATION. **How Concrete is Made**. Disponível em: <<https://www.cement.org/cement-concrete-applications/how-concrete-is-made>>. Acesso em: 20 out. 2020.

POWER, G.; GRÄFE, M.; KLAUBER, C. Bauxite residue issues: I. Current management, disposal and storage practices. **Hydrometallurgy**, v. 108, n. 1–2, p. 33–45, 1 jun. 2011.

RAI, S. et al. Neutralization and Utilization of red mud for its better waste management. **Archives of Environmental Science**, v. 6, p. 13–33, 2012.

REDDY, P. S. et al. Properties and Assessment of Applications of Red Mud (Bauxite Residue): Current Status and Research Needs. **Waste and Biomass Valorization**, p. 1–33, 19 maio 2020.

RIBEIRO, D. V.; LABRINCHA, J. A.; MORELLI, M. R. Potential use of natural red mud as pozzolan for Portland cement. **Materials Research**, v. 14, n. 1, p. 60–66, jan. 2011.

RIBEIRO, D. V.; LABRINCHA, J. A.; MORELLI, M. R. Effect of the addition of red mud on the corrosion parameters of reinforced concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 42, n. 1, p. 124–133, 2012.

RIVERA, R. M. et al. Extraction of rare earths from bauxite residue (red mud) by dry digestion followed by water leaching. **Minerals Engineering**, v. 119, n. October 2017, p. 82–92, 2018.

ROMANO, R. C. DE O. et al. Influência da utilização de diferentes teores de lama vermelha nas propriedades de ladrilhos hidráulicos. **Ambiente Construído**, v. 20, n. 3, p. 647–659, jul. 2020.

ROMANO, R. C. O. et al. Hydration of Portland cement with red mud as mineral addition. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 131, n. 3, p. 2477–2490, 1 mar. 2018.

ROMANO, R. C. O. et al. Using isothermal calorimetry, X-ray diffraction, thermogravimetry and FTIR to monitor the hydration reaction of Portland cements associated with red mud as a supplementary material. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 137, n. 6, p. 1877–1890, 2019.

RUYS, A. Bauxite: The principal aluminum ore. In: **Alumina Ceramics**. [s.l.] Elsevier, 2019. p. 39–47.

SAMPAIO, J.; DE ANDRADE, M.; DUTRA, A. Bauxita. In: **Rochas e Minerais Industriais no Brasil: usos e especificações**. Rio de Janeiro: CETEM/MTC, 2008. p. 311–337.

SCRIVENER, K. L.; JOHN, V. M.; GARTNER, E. M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. **Cement and Concrete Research**, v. 114, p. 2–26, 1 dez. 2018.

SENFF, L. et al. Influence of red mud addition on rheological behavior and hardened properties of mortars. **Construction and Building Materials**, v. 65, p. 84–91, 2014.

SENFF, L.; HOTZA, D.; LABRINCHA, J. A. Effect of red mud addition on the rheological behaviour and on hardened state characteristics of cement mortars. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 1, p. 163–170, jan. 2011.

SINGH, M.; UPADHAYAY, S. N.; PRASAD, P. M. **PREPARATION OF SPECIAL CEMENTS FROM RED MUDWaste Management**. [s.l.] Elsevier Science ktd All rights reserved, 1996.

SNARS, K.; GILKES, R. J. Evaluation of bauxite residues (red muds) of different origins for environmental applications. **Applied Clay Science**, v. 46, n. 1, p. 13–20, set. 2009.

SOUSA, J. G. **Contribuição ao estudo da relação entre propriedades e proporcionamento de blocos de concreto: Aplicação ao uso de entulho como agregado reciclado**. [s.l.] Universidade de Brasília, 2001.

TABEREAUX, A. **Addressing the Challenge of Bauxite Residue**. Disponível em: <<https://www.lightmetalage.com/news/industry-news/smelting/article-addressing-the-challenge-of-bauxite-residue/>>. Acesso em: 10 abr. 2020.

TANG, W. C. et al. Influence of red mud on fresh and hardened properties of self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 178, p. 288–300, 30 jul. 2018.

THE GUARDIAN. **Outrage as plant bosses acquitted over fatal toxic spill in Hungary**. Disponível em: <<https://www.theguardian.com/world/2016/jan/28/outrage-plant-bosses-acquitted-fatal-toxic-spill-hungary>>. Acesso em: 13 abr. 2020.

TORKAMAN, J.; ASHORI, A.; SADR MOMTAZI, A. Using wood fiber waste, rice husk ash, and limestone powder waste as cement replacement materials for lightweight concrete blocks. **Construction and Building Materials**, v. 50, p. 432–436, 2014.

UNITED NATIONS. **ADOPTION OF THE PARIS AGREEMENT**. [s.l: s.n.].

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. **Bauxite and Alumina Statistics and Information**. Disponível em: <https://www.usgs.gov/centers/nmic/bauxite-and-alumina-statistics-and-information?qt-science_support_page_related_con=0#qt-science_support_page_related_con>. Acesso em: 12 mar. 2020.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. **Mineral Commodity Summaries 2020**. [s.l: s.n.]. Acesso em: 11 mar. 2020.

VENKATESH, C.; RUBEN, N.; CHAND, M. S. R. Red mud as an additive in concrete: comprehensive characterization. **Journal of the Korean Ceramic Society**, v. 57, n. 3, p. 281–289, 1 maio 2020.

VIGNESHWARAN, S.; UTHAYAKUMAR, M.; ARUMUGAPRABU, V. Development and sustainability of industrial waste-based red mud hybrid composites. **Journal of Cleaner Production**, v. 230, p. 862–868, 1 set. 2019.

WEB OF SCIENCE. **Web of Science Core Collection**. Disponível em: <http://apps-webofknowledge.ez3.periodicos.capes.gov.br/WOS_GeneralSearch_input.do?product=WOS&search_mode=GeneralSearch&SID=7FMMPEkwXiFn8Hfj2q&preferencesSaved=>>. Acesso em: 27 mar. 2020.

WORLD BUSINESS COUNCIL FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT. **TOWARD A SUSTAINABLE CEMENT INDUSTRY**. [s.l: s.n.].

ZHANG, J. et al. Experimental study on rheological properties and moisture susceptibility of asphalt mastic containing red mud waste as a filler substitute. **Construction and Building Materials**, v. 211, p. 159–166, 30 jun. 2019.

Apêndice A: Resultados para resistência à compressão

Tabela A1: Resultados individuais para resistência à compressão aos 3 dias de hidratação.

Corpos de prova	Força de ruptura (tf)	Resistência à compressão diametral (MPa)	Média	Desvio-padrão
RCRB0-1	1,54	7,11		
RCRB0-2	1,59	7,34	6,95	0,49
RCRB0-3	1,36	6,4		
RCRB5-1	1,34	6,56		
RCRB5-2	1,41	6,77	7,27	1,05
RCRB5-3	1,73	8,47		
RCRB10-1	1,54	7,25		
RCRB10-2	1,20	5,65	6,09	1,01
RCRB10-3	1,12	5,38		
RCRB15-1	1,33	6,64		
RCRB15-2	1,27	6,34	6,22	0,49
RCRB15-3	1,14	5,69		
RCRB20-1	1,26	6,29		
RCRB20-2	1,63	8,14	7,76	1,32
RCRB20-3	1,77	8,84		

RCRB_Y-X – Resistência à compressão; Y – Teor de resíduo adicionado na mistura; X – Número do CP.

Fonte: (AUTORA, 2022).

Tabela A2: Resultados individuais para resistência à compressão aos 7 dias de hidratação.

Corpos de prova	Força de ruptura (tf)	Resistência à compressão diametral (MPa)	Média	Desvio-padrão
RCRB0-1	1,87	8,63		
RCRB0-2	2,00	9,60	8,7	0,87
RCRB0-3	1,64	7,87		
RCRB5-1	1,77	8,66		
RCRB5-2	1,99	9,37	8,87	0,44
RCRB5-3	1,82	8,57		
RCRB10-1	1,46	7,01		
RCRB10-2	1,64	7,87	7,49	0,44
RCRB10-3	1,58	7,58		
RCRB15-1	1,59	7,94		
RCRB15-2	1,92	9,59	8,96	0,89
RCRB15-3	1,87	9,34		
RCRB20-1	1,82	9,09		
RCRB20-2	2,05	10,24	9,57	0,6
RCRB20-3	1,88	9,39		

RCRBY-X – Resistência à compressão; Y – Teor de resíduo adicionado na mistura; X – Número do CP.

Fonte: (AUTORA, 2022).

Tabela A3: Resultados individuais para resistência à compressão aos 14 dias de hidratação.

Corpos de prova	Força de ruptura (tf)	Resistência à compressão diametral (MPa)	Média	Desvio-padrão
RCRB0-1	1,83	8,61		
RCRB0-2	2,27	10,90	10,6	1,86
RCRB0-3	2,61	12,29		
RCRB5-1	2,59	12,68		
RCRB5-2	1,92	9,4	10,51	1,88
RCRB5-3	1,97	9,46		
RCRB10-1	1,97	9,46		
RCRB10-2	1,87	8,63	9,35	0,68
RCRB10-3	2,16	9,97		
RCRB15-1	1,89	9,44		
RCRB15-2	2,06	10,29	9,42	0,88
RCRB15-3	1,71	8,54		
RCRB20-1	2,22	11,09		
RCRB20-2	2,39	11,93	10,84	1,24
RCRB20-3	1,90	9,49		

RCRBY-X – Resistência à compressão; Y – Teor de resíduo adicionado na mistura; X – Número do CP.

Fonte: (AUTORA, 2022).

Apêndice B: Resultados para resistência à tração por compressão diametral

Tabela B1: Resultados individuais para resistência à tração por compressão diametral aos 14 dias de hidratação.

Corpos de prova	Força de ruptura (tf)	Resistência à tração por compressão diametral (MPa)	Média	Desvio-padrão
RTRB0-1	1,47	1,84		
RTRB0-2	1,38	1,72	1,42	0,05
RTRB0-3	1,42	1,77		
RTRB5-1	0,94	1,17		
RTRB5-2	1,73	2,16	1,41	0,41
RTRB5-3	1,55	1,94		
RTRB10-1	1,24	1,55		
RTRB10-2	1,27	1,59	1,22	0,07
RTRB10-3	1,14	1,42		
RTRB15-1	1,47	1,84		
RTRB15-2	1,35	1,69	1,60	0,33
RTRB15-3	1,98	2,47		
RTRB20-1	1,48	1,85		
RTRB20-2	1,57	1,96	1,53	0,05
RTRB20-3	1,55	1,94		

RTRBY-X – Resistência à compressão por tração diametral; Y – Teor de resíduo adicionado na mistura; X – Número do CP.

Fonte: (AUTORA, 2022).

Apêndice C:Resultados para absorção de água por capilaridade

Tabela C1: Leituras individuais obtidas durante absorção de água por capilaridade
após absorção em 1 h, 2 h, 3 h, 24 h, 72 h.

Corpos de prova	Massa seca (g)	Leitura após 1h em lâmina (g)	Leitura após 2h em lâmina (g)	Leitura após 3h em lâmina (g)	Leitura após 24h em lâmina (g)	Leitura após 48h em lâmina (g)	Leitura após 72h em lâmina (g)
CAPRB0-1	450,8	461,24	491,7	492,21	495,54	496,13	496,39
CAPRB0-2	465,1	490,2	480,2	480,45	483,11	483,37	484,14
CAPRB0-3	447,6	460,9	461,66	461,93	465,04	466,07	466,45
CAPRB5-1	456,8	475	475,55	475,19	478,75	480,21	479,66
CAPRB5-2	481,2	486,6	497,56	497,29	499,7	500,5	500,5
CAPRB5-3	449,3	496,9	487,16	486,99	489,2	490,3	489,9
CAPRB10-1	448,3	463,1	463,3	463,45	466	467,5	467,3
CAPRB10-2	460,9	475,5	476,07	476,29	478,5	478,9	479,1
CAPRB10-3	451,7	474	475,06	475,43	479,7	480,6	480,7
CAPRB15-1	446,8	454,91	455,72	456,15	459,2	458,9	459,25
CAPRB15-2	459,3	463,12	463,8	464,15	466,8	467,4	467,46
CAPRB15-3	481,8	483,88	484,23	484,4	486,9	487,5	487,73
CAPRB20-1	461,42	465,25	466,1	466,32	467,9	468,77	469,4
CAPRB20-2	460,11	463,15	463,5	463,4	465,22	465,45	465,9
CAPRB20-3	478,67	480,53	480,5	480,36	481,93	482,25	482,3

CAPRBY-X – Absorção por capilaridade; Y – Teor de resíduo adicionado na mistura; X – Número do CP.

Fonte: (AUTORA, 2022).

Tabela C2: Resultados individuais obtidos para os coeficientes de capilaridade.

Corpos de prova	Coef. de Capilaridade em 1h (g/cm²)	Coef. de Capilaridade em 2h (g/cm²)	Coef. de Capilaridade em 3h (g/cm²)	Coef. de Capilaridade em 24h (g/cm²)	Coef. de Capilaridade em 48h (g/cm²)	Coef. de Capilaridade em 72h (g/cm²)
CAPRB0-1	0,53	2,08	2,11	2,28	2,31	2,32
CAPRB0-2	2,01	1,50	1,51	1,65	1,66	1,70
CAPRB0-3	0,51	0,55	0,57	0,73	0,78	0,80
CAPRB5-1	1,23	1,26	1,24	1,42	1,50	1,47
CAPRB5-2	1,82	2,38	2,37	2,49	2,53	2,53
CAPRB5-3	2,35	1,85	1,84	1,96	2,01	1,99
CAPRB10-1	0,63	0,64	0,64	0,77	0,85	0,84

CAPRB10-2	1,26	1,29	1,30	1,41	1,43	1,44
CAPRB10-3	1,18	1,24	1,26	1,47	1,52	1,52
CAPRB15-1	0,21	0,25	0,27	0,43	0,41	0,43
CAPRB15-2	0,63	0,66	0,68	0,82	0,85	0,85
CAPRB15-3	1,69	1,70	1,71	1,84	1,87	1,88
CAPRB20-1	0,74	0,78	0,79	0,87	0,92	0,95
CAPRB20-2	0,63	0,65	0,64	0,73	0,75	0,77
CAPRB20-3	1,51	1,51	1,51	1,59	1,60	1,61

CAPRBY-X – Absorção por capilaridade; Y – Teor de resíduo adicionado na mistura; X –

Número do CP.

Fonte: (AUTORA, 2022).

Tabela C3:Resultados médios e desvio-padrão obtidos para os coeficientes de capilaridade.

Corpos de prova	Coeficiente de Capilaridade média em 1h (g/cm ²)	Coeficiente de Capilaridade média em 2h (g/cm ²)	Coeficiente de Capilaridade média em 3h (g/cm ²)	Coeficiente de Capilaridade média em 24h (g/cm ²)	Coeficiente de Capilaridade média em 48h (g/cm ²)	Coeficiente de Capilaridade média em 72h (g/cm ²)
CAPMRB0	1,02	1,38	1,40	1,55	1,58	1,61
Desvio-padrão	0,86	0,77	0,78	0,78	0,77	0,77
CAPMRB5	1,80	1,83	1,82	1,96	2,01	2,00
Desvio-padrão	0,56	0,56	0,56	0,53	0,52	0,53
CAPMRB10	1,02	1,05	1,07	1,22	1,27	1,27
Desvio-padrão	0,34	0,36	0,37	0,39	0,36	0,37
CAPMRB15	0,84	0,87	0,89	1,03	1,04	1,05
Desvio-padrão	0,76	0,75	0,74	0,73	0,75	0,75
CAPMRB20	0,96	0,98	0,98	1,06	1,09	1,11
Desvio-padrão	0,48	0,47	0,46	0,46	0,45	0,44

CAPMRBY– Absorção de água por capilaridade média; Y – Teor de resíduo adicionado na mistura.

Fonte: (AUTORA, 2022).

Apêndice D: Resultados para massa específica, índice de vazios e absorção de água por imersão

Tabela D1: Leituras individuais realizadas nos CPs para absorção, índice de vazios e massa específica real.

Corpos de prova	Massa após permanência em estufa por 72h	Massa hidrostática (g)	Massa após saturação por 72h (g)	Absorção (%)	Índice de vazios (%)	Massa específica real
CPRB0-1	461,07	275	490,14	6,30	13,51	2,48
CPRB0-2	487,05	275	513,6	5,45	11,13	2,30
CPRB0-3	447,05	275	474,5	6,14	13,76	2,60
CPRB5-1	484,9	275	513	5,80	11,81	2,31
CPRB5-2	487,19	275	517,1	6,14	12,35	2,30
CPRB5-3	456,64	275	486,3	6,50	14,04	2,51
CPRB10-1	469,79	290	497,8	5,96	13,48	2,61
CPRB10-2	456,08	280	484,3	6,19	13,81	2,59
CPRB10-3	453,58	275	482,6	6,40	13,98	2,54
CPRB15-1	462,61	280	492,3	6,42	13,98	2,53
CPRB15-2	453,02	275	482,68	6,55	14,28	2,54
CPRB15-3	445,32	275	474,15	6,47	14,48	2,61
CPRB20-1	454,64	275	485,66	6,82	14,73	2,53
CPRB20-2	440,26	270	469,1	6,55	14,49	2,59
CPRB20-3	440,68	265	470,9	6,86	14,68	2,51

CPRBY-X – CPs para ensaios de massa específica, absorção por imersão e índice de vazios; Y –

Teor de resíduo adicionado na mistura; X – Número do CP.

Fonte: (AUTORA, 2022).

Tabela D2: Resultados para absorção índice de vazios e massa específica médias e desvio-padrão.

Corpos de prova	Absorção média (%)	Índice de vazios médio (%)	Massa específica real média
CPMRB0	5,97	12,80	2,46
Desvio-padrão	0,45	1,45	0,15
CPMRB5	6,14	12,73	2,37

Desvio-padrão	0,35	1,16	0,12
CPMRB10	6,18	13,76	2,58
Desvio-padrão	0,22	0,25	0,04
CPMRB15	6,48	14,25	2,56
Desvio-padrão	0,06	0,25	0,04
CPMRB20	6,74	14,63	2,54
Desvio-padrão	0,17	0,13	0,04

CPMRBY – CPs médios para ensaios de massa específica, absorção por imersão e índice de vazios; Y – Teor de resíduo adicionado na mistura.

Fonte: (AUTORA, 2022).

Apêndice E: Resultados obtidos para ANOVA de uma via e *post-hoc* com teste de Tukey

Tabela E1: ANOVA de uma via para resistência à compressão aos 3 dias de hidratação.

Grupos	Contagem	Somatório	Média	Variância	Soma dos quadrados	Erro Padrão	Inferior	Superior
0%	3	20,85	6,9500	0,2401	0,4802	0,5373	5,7528	8,1472
5%	3	21,8	7,2667	1,0970	2,1941	0,5373	6,0695	8,4639
10%	3	18,28	6,0933	1,0216	2,0433	0,5373	4,8961	7,2905
15%	3	18,67	6,2233	0,2358	0,4717	0,5373	5,0261	7,4205
20%	3	23,27	7,7567	1,7358	3,4717	0,5373	6,5595	8,9539

Fonte de variação	SQ	Grau de liberdade	MQ	F	P-valor	RMSSE	Omega Sq
Entre grupos	5,9118	4,0000	1,4779	1,7065	0,2246	0,7542	0,1585
Dentro dos grupos	8,6609	10,0000	0,8661				
Total	14,5726	14,0000	1,0409				

Fonte: (AUTORA, 2022).

Tabela E2: ANOVA de uma via para resistência à compressão aos 7 dias de hidratação.

Grupos	Contagem	Somatório	Média	Variância	Soma dos quadrados	Erro Padrão	Inferior	Superior
0%	3	26,10	8,7000	0,7519	1,5038	0,3900	7,8309	9,5691
5%	3	26,6	8,8667	0,1920	0,3841	0,3900	7,9976	9,7357
10%	3	22,46	7,4867	0,1914	0,3829	0,3900	6,6176	8,3557
15%	3	26,87	8,9567	0,7908	1,5817	0,3900	8,0876	9,8257
20%	3	28,72	9,5733	0,3558	0,7117	0,3900	8,7043	10,4424

Fonte de variação	SQ	Grau de liberdade	MQ	F	P-valor	RMSSE	Omega Sq
Entre grupos	6,9815	4,0000	1,7454	3,8241	0,0388	1,1290	0,4296

Dentro dos grupos	4,5641	10,0000	0,4564
Total	11,5455	14,0000	0,8247

Tabela E3: Teste de Tukey após Anova para resistência à compressão aos 7 dias de hidratação.

Grupo	Média	Contagem	SQ	Grau de liberdade	q-crit
0%	8,70	3	1,5038		
5%	8,866667	3	0,3840667		
10%	7,49	3	0,3828667		
15%	8,956667	3	1,5816667		
20%	9,573333	3	0,7116667		
		15	4,5640667	10	4,654

Grupo 1	Grupo 2	Média	Erro padrão	q-stat	Inferior	Superior	p-valor	média crítica
0%	5%	0,1666667	0,3900456	0,42730049	-1,64861	1,981939	0,997864	1,815272
0%	10%	1,2133333	0,3900456	3,11074754	-0,60194	3,028605	0,254595	1,815272
0%	15%	0,2566667	0,3900456	0,65804275	-1,55861	2,071939	0,988902	1,815272
0%	20%	0,8733333	0,3900456	2,23905455	-0,94194	2,688605	0,5381	1,815272
5%	10%	1,38	0,3900456	3,53804803	-0,43527	3,195272	0,165995	1,815272
5%	15%	0,09	0,3900456	0,23074226	-1,72527	1,905272	0,999811	1,815272
5%	20%	0,7066667	0,3900456	1,81175406	-1,10861	2,521939	0,707758	1,815272
10%	15%	1,47	0,3900456	3,76879029	-0,34527	3,285272	0,130445	1,815272
10%	20%	2,0866667	0,3900456	5,34980209	0,271395	3,901939	0,023326	1,815272
15%	20%	0,6166667	0,3900456	1,5810118	-1,19861	2,431939	0,794067	1,815272

Fonte: (AUTORA, 2022).

Tabela E4: Anova de uma via para resistência à compressão aos 14 dias de hidratação.

Grupos	Contagem	Somatório	Média	Variância	Soma dos quadrados	Erro Padrão	Inferior	Superior
RB0	3	31,80	10,6000	3,4531	6,9062	0,8056	8,8050	12,3950
RB5	3	31,54	10,5133	3,5217	7,0435	0,8056	8,7184	12,3083

RB10	3	28,06	9,3533	0,4574	0,9149	0,8056	7,5584	11,1483
RB15	3	28,27	9,4233	0,7658	1,5317	0,8056	7,6284	11,2183
RB20	3	32,51	10,8367	1,5365	3,0731	0,8056	9,0417	12,6316

Fonte de variação	SQ	Grau de liberdade	MQ	F	P-valor	RMSSE	Omega Sq
Entre grupos	5,9059	4,0000	1,4765	0,7584	0,5753	0,5028	-0,0689
Dentro dos grupos	19,4693	10,0000	1,9469				
Total	25,3752	14,0000	1,8125				

Fonte: (AUTORA, 2022).

Tabela E5: Anova de uma via para resistência à tração por compressão diametral aos 14 dias de hidratação.

Grupos	Contagem	Somatório	Média	Variância	Soma dos quadrados	Erro Padrão	Inferior	Superior
0%	3	5,33	1,7767	0,0036	0,0073	0,1745	1,3880	2,1654
5%	3	5,27	1,7567	0,2702	0,5405	0,1745	1,3680	2,1454
10%	3	4,56	1,5200	0,0079	0,0158	0,1745	1,1313	1,9087
15%	3	6	2,0000	0,1713	0,3426	0,1745	1,6113	2,3887
20%	3	5,75	1,9167	0,0034	0,0069	0,1745	1,5280	2,3054

Fonte de variação	SQ	Grau de liberdade	MQ	F	P-valor	RMSSE	Omega Sq
Entre grupos	0,4028	4,0000	0,1007	1,1028	0,4071	0,6063	0,0267
Dentro dos grupos	0,9130	10,0000	0,0913				
Total	1,3158	14,0000	0,0940				

Fonte: (AUTORA, 2022).

Tabela E6: Anova de uma via para absorção por imersão.

Grupos	Contagem	Somatório	Média	Variância	Soma dos quadrados	Erro Padrão	Inferior	Superior
0%	3	17,90	5,9654	0,2051	0,4102	0,1649	5,5981	6,3328
5%	3	18,429568	6,1432	0,1226	0,2452	0,1649	5,7759	6,5105
10%	3	18,55	6,1826	0,0475	0,0950	0,1649	5,8153	6,5499
15%	3	19,439102	6,4797	0,0042	0,0084	0,1649	6,1124	6,8470

20%	3	20,231239	6,7437	0,0283	0,0565	0,1649	6,3764	7,1111
-----	---	-----------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

Fonte de variação	SQ	Grau de liberdade	MQ	F	P-valor	RMSSE	Omega Sq
Entre grupos	1,1384	4,0000	0,2846	3,4905	0,0495	1,0787	0,3991
Dentro dos grupos	0,8153	10,0000	0,0815				
Total	1,9537	14,0000	0,1396				

Fonte: (AUTORA, 2022).

Tabela E7: Teste de Tukey após ANOVA de uma via para absorção por imersão.

Grupo	Média	Contagem	SQ	Grau de liberdade	q-crit
0%	5,97	3	0,41025		
5%	6,143189	3	0,245205		
10%	6,18	3	0,094976		
15%	6,479701	3	0,0084		
20%	6,743746	3	0,056514		
		15	0,815345	10	4,654

Grupo 1	Grupo 2	Média	Erro padrão	q-stat	Inferior	Superior	p-valor	média crítica
0%	5%	0,17774323	0,164858	1,0781596	-0,58951	0,944992	0,935802	0,767249
0%	10%	0,2171336	0,164858	1,3170947	-0,55012	0,984383	0,878407	0,767249
0%	15%	0,51425454	0,164858	3,1193788	-0,25299	1,281504	0,252481	0,767249
0%	20%	0,7783004	0,164858	4,7210352	0,011051	1,54555	0,046467	0,767249
5%	10%	0,03939036	0,164858	0,2389351	-0,72786	0,806639	0,999783	0,767249
5%	15%	0,33651131	0,164858	2,0412192	-0,43074	1,10376	0,616578	0,767249
5%	20%	0,60055717	0,164858	3,6428756	-0,16669	1,367806	0,148885	0,767249
10%	15%	0,29712094	0,164858	1,8022841	-0,47013	1,06437	0,711449	0,767249
10%	20%	0,56116681	0,164858	3,4039404	-0,20608	1,328416	0,190404	0,767249
15%	20%	0,26404586	0,164858	1,6016564	-0,5032	1,031295	0,786725	0,767249

Tabela E8: Anova de uma via para índice de vazios.

Grupos	Contagem	Somatório	Média	Variância	Soma dos quadrados	Erro Padrão	Inferior	Superior
0%	3	38,40	12,7996	2,1126	4,2251	0,4903	11,7073	13,8920
5%	3	38,198036	12,7327	1,3508	2,7015	0,4903	11,6403	13,8251
10%	3	41,27	13,7570	0,0647	0,1294	0,4903	12,6647	14,8494
15%	3	42,743039	14,2477	0,0613	0,1226	0,4903	13,1553	15,3401
20%	3	43,887361	14,6291	0,0161	0,0322	0,4903	13,5367	15,7215

Fonte de variação	SQ	Grau de liberdade	MQ	F	P-valor	RMSSE	Omega Sq
Entre grupos	8,6716	4,0000	2,1679	3,0064	0,0720	1,0011	0,3486
Dentro dos grupos	7,2109	10,0000	0,7211				
Total	15,8825	14,0000	1,1345				

Tabela E9: Anova de uma via para massa específica real.

Grupos	Contagem	Somatório	Média	Variância	Soma dos quadrados	Erro Padrão	Inferior	Superior
0%	3	7,37	2,4577	0,0230	0,0461	0,0534	2,3387	2,5768
5%	3	7,12013969	2,3734	0,0149	0,0298	0,0534	2,2543	2,4924
10%	3	7,74	2,5810	0,0014	0,0028	0,0534	2,4620	2,7001
15%	3	7,69270043	2,5642	0,0019	0,0039	0,0534	2,4452	2,6833
20%	3	7,6250738	2,5417	0,0016	0,0032	0,0534	2,4226	2,6608

Fonte de variação	SQ	Grau de liberdade	MQ	F	P-valor	RMSSE	Omega Sq
Entre grupos	0,0906	4,0000	0,0226	2,6429	0,0969	0,9386	0,3046
Dentro dos grupos	0,0857	10,0000	0,0086				
Total	0,1762	14,0000	0,0126				

Fonte: (AUTORA, 2022).