



Celestina Lima de Rezende Farias

Utilização do Resíduo de Agregado Sintético, de Bauxita, como substituição ao Cimento Portland

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

2025

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



Celestina Lima de Rezende Farias

Utilização do Resíduo de Agregado Sintético, de Bauxita, como substituição ao Cimento Portland.

Dissertação de Mestrado

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

Orientador: Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço

Belém
Setembro 2025

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Celestina Lima de Rezende Farias.

TÍTULO: Utilização do Resíduo de Agregado Sintético, de Bauxita, como substituição ao Cimento Portland.

GRAU: Mestre ANO: 2025

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.

Celestina Lima de Rezende Farias.

Passagem São Paulo, nº 04, apartamento 1007, bloco A.

Bairro: Atalaia.

CEP: 67.013-600 Ananindeua – PA – Brasil.

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)

F224u Farias, Celestina Lima de Rezende.

Utilização do Resíduo de Agregado Sintético, de Bauxita, como substituição ao Cimento Portland / Celestina Lima de Rezende Farias. — 2025.

77 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço Picanço

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Belém, 2025.

1. Resíduo de Bauxita. 2. Caracterização. 3. Cimento Portland. 4. Substituição. I. Título.

CDD 624



Celestina Lima de Rezende Farias

Utilização do Resíduo de Agregado Sintético, de Bauxita, como substituição ao Cimento Portland.

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

Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço
Faculdade de Engenharia Civil – UFPA
Orientador – Membro Interno

Prof. Dr. Helder Mansur Chaves
Instituto de Tecnologia - UFPA
Membro Interno

Profª. Dra. Andrielli Morais de Oliveira
Faculdade de Engenharia Civil – UFG
Membro Externo

Setembro de 2025.



UTILIZAÇÃO DO RESÍDUO DE BAUXITA COMO ADIÇÃO AO CIMENTO PORTLAND

AUTORA:

CELESTINA LIMA DE REZENDE FARIAS

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

APROVADO EM: 03 / 09 / 2025.

Documento assinado digitalmente



MARCELO DE SOUZA PICANÇO
Data: 24/11/2025 09:47:20-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

BANCA EXAMINADORA:

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

Documento assinado digitalmente



ANDRIELLI MORAIS DE OLIVEIRA
Data: 25/11/2025 16:01:16-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Andrielli Morais de Oliveira
Membro Externo (UFG)

Documento assinado digitalmente



HELEDER MANSUR CHAVES
Data: 24/11/2025 11:38:36-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Helder Mansur Chaves
Membro Interno (UFPA)

Visto:

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

“Entregue o seu caminho ao Senhor;
confie nele e ele agirá”. Salmos 37:5

Agradecimentos

Segundo o dicionário Aurélio, “agradecer” é um ato de mostrar ou manifestar gratidão, render graças; reconhecer. Desta forma, agradeço antes de tudo, à Deus, pela presença onipresente em minha vida, permitindo o dom da vida e da família.

Ao professor Dr. Marcelo de Souza Picanço, orientador de minha pesquisa e de atos acadêmicos durante o mestrado.

Aos Doutores das disciplinas ministradas, que em sala de aula, passaram seus conhecimentos e experiências para contribuir com nossa formação.

Aos meus pais (*in memoriam*) que sempre fizeram tudo o que podiam para me dar uma educação de qualidade. Ao meu marido, Marcelo Farias e meus Filhos, Enzo Marcelo e Valentina, que são peças fundamentais na minha vida, alicerce para meus estudos e meus apoios diáários.

A todos que contribuíram direta e indiretamente para conclusão desta pesquisa.
MUITO OBRIGADO!

Resumo

Farias, C. L. R. Utilização do Resíduo de Agregado Sintético, de Bauxita, como substituição ao Cimento Portland.

Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Pará. Belém, 2025.

O cimento é o material mais consumido globalmente, com cerca de 14 bilhões de metros cúbicos de concreto utilizados anualmente, representando 13% do PIB mundial destinado à construção civil. A indústria global do concreto anunciou em 2023 a meta de atingir a neutralidade de carbono até 2050, comprometendo-se com a produção e comercialização de cimentos “verdes” capazes de substituir o clínquer por materiais reutilizados da construção civil.

A construção civil, apesar de sua relevância econômica, destaca-se como um dos setores que mais gera resíduos sólidos e consome recursos naturais no mundo. Ressaltam-se, sobretudo, as emissões significativas de dióxido de carbono (CO₂) oriundas da produção de cimento Portland.

No âmbito da mineração, embora esta desempenhe papel essencial para a economia e o desenvolvimento social, produz grandes volumes de rejeitos com altos custos de gerenciamento. Entre esses resíduos destaca-se o resíduo da bauxita (RB), principal rejeito da indústria de alumina.

O objetivo desta pesquisa é avaliar a viabilidade técnica do uso do Resíduo de Agregado Sintético com Resíduo de Bauxita (RASRB) como substituição parcial ao cimento Portland, atuando como fíler, por meio do beneficiamento, caracterização e estudo das propriedades mecânicas em argamassas, com foco na resistência à compressão e no comportamento microestrutural.

Para cumprir esse propósito, o estudo emprega uma metodologia estruturada em três etapas: (1) caracterização física, química e granulométrica do resíduo, incluindo beneficiamento e moagem; (2) definição das melhores proporções de substituição, entre 11%, 18% e 25%; e (3) avaliação das propriedades mecânicas das argamassas, por meio de ensaios de resistência à compressão aos 7, 14 e 28 dias seguindo normas da ABNT.

Os resultados demonstram que o RASRB apresenta características adequadas para uso como fíler, com composições químicas compatíveis e comportamento satisfatório após beneficiamento; em termos mecânicos, os valores de resistência à compressão revelam que determinadas combinações de substituição, especialmente o RASRB 70, atingem ou

superam o desempenho do clínquer de referência, com resistências de 26,90 MPa (11%), 25,37 MPa (18%) e 26,02 MPa (25%) aos 28 dias, superando o clínquer (24,38 MPa)

O estudo conclui que o RASRB, especialmente na composição 70, é tecnicamente viável como substituto parcial do cimento Portland até 25%, contribuindo para redução de resíduos industriais e impactos ambientais, além de atender especificações normativas de desempenho

Palavra-chave:

Resíduo de Bauxita; Caracterização; Cimento Portland; Substituição.

Abstract

Farias, C. L. R. Use of Synthetic Bauxite Aggregate Residue as a substitute for Portland Cement.

Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Pará. Belém, 2025.

Cement is the most widely consumed material worldwide, with approximately 14 billion cubic meters of concrete produced annually, accounting for 13% of the global GDP directed toward the construction sector. In 2023, the global concrete industry announced its commitment to achieving carbon neutrality by 2050, emphasizing the development and commercialization of “green” cements capable of replacing clinker with recycled construction materials.

Despite its economic importance, the construction sector is one of the largest generators of solid waste and consumers of natural resources globally. A particularly critical issue involves the substantial carbon dioxide (CO₂) emissions associated with Portland cement production.

In the mining sector, although essential for economic activity and social development, large quantities of waste with high management costs are produced. Among these, bauxite residue (BR), the primary by-product of the alumina industry, stands out due to its significant volume and environmental relevance.

This study aims to assess the technical feasibility of employing Synthetic Aggregate Residue containing Bauxite Residue (SARBR) as a partial replacement for Portland cement, functioning as a filler. The investigation encompasses beneficiation, physical-chemical characterization, and the evaluation of mechanical performance in mortars, focusing on compressive strength and microstructural behavior.

The research methodology comprises three main stages: (1) physical, chemical, and particle-size characterization of the residue, including beneficiation and grinding; (2) determination of optimal replacement levels of 11%, 18%, and 25%; and (3) evaluation of mortar mechanical properties through compressive strength tests at 7, 14, and 28 days in accordance with ABNT standards.

The results demonstrate that SARBR exhibits suitable characteristics for use as a filler, with compatible chemical composition and satisfactory performance after beneficiation. Mechanically, the compressive strength results indicate that certain replacement levels, particularly the SARBR 70 formulation, meet or surpass the performance of the reference

clinker, achieving strengths of 26.90 MPa (11%), 25.37 MPa (18%), and 26.02 MPa (25%) at 28 days, all exceeding the clinker value of 24.38 MPa.

The study concludes that SARBR, especially in the 70 formulation, is technically viable as a partial substitute for Portland cement at replacement levels up to 25%. Its use contributes to industrial waste reduction and environmental impact mitigation while complying with normative performance requirements.

Keyword:

Bauxite Residue; Characterization; Portland Cement; Replacement.

Sumário

Capítulo	Página
1. INTRODUÇÃO	17
1.1 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	18
2. OBJETIVOS	20
2.1 OBJETIVO GERAL.....	20
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
3.1 RESÍDUO DE BAUXITA	20
3.1.1 PROCESSO BAYER	20
3.1.2 CARACTERÍSTICAS DO RESÍDUO DE BAUXITA.....	21
3.1.3 O RESÍDUO DE BAUXITA COMO UMA MATÉRIA PRIMA SUSTENTÁVEL PARA A PRODUÇÃO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL.....	22
3.1.4 UTILIZAÇÃO DO RESÍDUO DE BAUXITA.....	24
3.1.5 AGREGADOS SINTÉTICOS	25
3.2 CIMENTO PORTLAND.....	26
3.2.1 PRODUÇÃO DO CIMENTO	26
3.2.2 COMPOSIÇÃO QUÍMICA.....	27
3.2.3 ENSAIOS EM CIMENTOS.....	29
3.2.4 TIPOS DE CIMENTO PORTLAND	31
3.3 ADIÇÕES MINERAIS	36
3.3.1 TIPOS DE ADIÇÕES MINERAIS	37
3.4 ARGAMASSAS.....	40
3.4.1 PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS	41
4. MATERIAIS E MÉTODOS	43
4.1 MATERIAIS UTILIZADOS	43

4.1.1 RESÍDUO DO AGREGADO SINTÉTICO DO RESÍDUO DE BAUXITA	43
4.1.2 CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO DO AGREGADO SINTÉTICO ...	45
4.1.3 AREIA NORMATIZADA PARA PRODUÇÃO DA ARGAMASSA	48
4.1.4 GESSO	49
4.1.5 ÁGUA	50
4.1.6 CLÍNQUER	50
4.2 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	53
4.3 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO EM ARGAMASSAS.....	53
4.3.1 DESENVOLVIMENTO DAS ARGAMASSAS	53
4.3.2 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	54
4.3.3 MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA (MEV).....	54
5. RESULTADOS E DISCURSSÕES.....	58
6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	70
6.1 CONCLUSÕES	70
6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	71
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72

Lista de Figuras

Figura	Página
Figura 1.1: Estrutura da Dissertação	19
Figura 3.1: Fluxograma e Esquema do processo Bayer	21
Figura 3.2: Agregado sintético de resíduo de bauxita.	26
Figura 3.3: Minerais composto no Cimento Portland	29
Figura 3.4: Tipos de adições minerais	37
Figura 3.5: Modelo microestrutural das argamassas	40
Figura 4.1: (a) Vista de satélite da Hydro Alunorte S.A. (b) Vista de satélite com identificação de cada área (1) área da refinaria, (2) depósito de DR 1, (3) depósito de DR 2, (4) descarte de água licenciado para Rio Pará e (5) estação de tratamento de efluentes industriais.	44
Figura 4.2: (a) AGS-70, (b) AGS-80 e (c) AGS-90.	45
Figura 4.3: Resumo da caracterização física do agregado graúdo natural e sintético.	47
Figura 4.4: Fatores geométricos dos agregados graúdos naturais e sintéticos.	47
Figura 4.5: Curvas granulométricas dos agregados graúdos (natural e sintéticos)	48
Figura 4.6: Areia Normal utilizada nos ensaios	48
Figura 4.7: (a) Gesso passante na 0,075mm, (b) Detalhe do material fino, aglomerado, sem condições de peneiramento.	49
Figura 4.8: Granulometria a laser com seus respectivos tempos de moagem (a) 30 minutos, (b) 60 minutos, (c) 90 minutos	50
Figura 4.9: (a) Entrada da empresa CIBRASA (b) Planta Industrial da CIBRASA	51
Figura 4.10: Distribuição granulométrica do clínquer	52
Figura 4.11: Estrutura do planejamento experimental	53
Figura 4.12: (a) Cristais de alita e belita no interior 20kV/ 500x (b) seleção de cristais de alita e belita 20kV/2kx, (c) Detalhes do cristal de alita com uma cavidade, provocado pela bola do moinho (d) Detalhes da belita	55
Figura 4.13: (a) (a) Cristal de alita 20kV/ 8kx (b) seleção de cristais de belita 20kV/20kx, (c) Detalhes do cristal de belita, (d) fase intersticial 40kx	56
Figura 4.14: (a) imagens de Elétrons do clínquer, (b) Imagens EDS em camadas do clínquer	57
Figura 4.15: Espectro do clínquer, da imagem EDS apresentado na figura 4.3	57
Figura 5.1: (a) RASRB 70 moído no moinho de bolas (b) Amostra de resíduo passante e retido na peneira #200 (c) amostra de todas as proporções de resíduo passante na peneira #200.	59
Figura 5.2: (a) e (b) moldagem do ensaio de determinação do índice de consistência RASRB 70 – 11% (c) e (d) espalhamento da pasta com RASRB 70 – 11% com medida de diâmetros.	60
Figura 5.3: (a) moldagem do ensaio de determinação do índice de consistência RASRB 70 – 18% (b) espalhamento da pasta com RASRB 70 – 18% com medida de diâmetro.	60
Figura 5.4: (a) e (b) moldagem do ensaio de determinação do índice de consistência RASRB 70 – 25% (c) e (d) espalhamento da pasta com RASRB 70 – 25% com medida de diâmetros.	61
Figura 5.5: (a) Amostra de resíduo RASRB 80, passante e retido, na peneira #200 (b) amostra de todas as proporções de resíduo passante na peneira #200.	62
Figura 5.6: (a) Amostra de resíduo RASRB 80, passante e retido, na peneira #200 (b) desmoldagem do corpo-de-prova (c) e (d) espalhamento da pasta com RASRB 80 – 11%.	62

Figura 5.7: (a) Amostra de resíduo RASRB 80, passante e retido, na peneira #200 (b) desmoldagem do corpo-de-prova (c) e (d) espalhamento da pasta com RASRB 80 – 18% 63	
Figura 5.8: (a) Amostra de resíduo RASRB 80, passante e retido, na peneira #200 (b) desmoldagem do corpo-de-prova (c) e (d) espalhamento da pasta com RASRB 80 – 25% 64	
Figura 5.9: (a) RASRB 90 moído no moinho de bolas (b) Amostra de resíduo passante e retido na peneira #200 (c) amostra de todas as proporções de resíduo passante na peneira #200 65	
Figura 5.10: (a) Amostra de resíduo RASRB 90, passante e retido, na peneira #200 (b) desmoldagem do corpo-de-prova (c) e (d) espalhamento da pasta com RASRB 90– 11% 66	
Figura 5.11: (a) Amostra de resíduo RASRB 90, passante e retido, na peneira #200 (b) espalhamento da pasta com RASRB 90– 18% 66	
Figura 5.12: (a) Amostra de resíduo RASRB 90, passante e retido, na peneira #200 (b) espalhamento da pasta com RASRB 90– 25% 66	
Figura 5.13: Consistência média 67	
Figura 5.14: Resistência das Argamassas aos 7 Dias 68	
Figura 5.15: Resistência das Argamassas aos 14 Dias 68	
Figura 5.16: Resistência das Argamassas aos 28 Dias 69	

Lista de Tabelas

Tabela	Página
Tabela 3.1: Principais compostos do cimento Portland	28
Tabela 3.2 - Designação normalizada, sigla e classe do cimento Portland.	31
Tabela 3.3 - Limite de composição do cimento Portland (porcentagem em massa).	32
Tabela 3.4 - Requisitos químicos do cimento Portland (porcentagem em massa).	33
Tabela 3.5 - Requisitos físicos e mecânicos.	33
Tabela 3.6 - Composição do Cimento Portland Composto (% em massa)	34
Tabela 3.7 - Composição do Cimento Portland de Alto-Forno (% em massa)	35
Tabela 3.8 - Composição do Cimento Portland Pozolânico (% em massa)	35
Tabela 3.9 - Composição do Cimento Portland de Alta Resistência Inicial	36
Tabela 3.10 - Exigências químicas e físicas dos materiais pozolânicos.	38
Tabela 4.1 - Composição química do RB utilizado na produção dos agregados sintéticos	44
Tabela 4.2 - Composição, massa específica, temperatura e tempo de sinterização das amostras de agregado	44
Tabela 4.3 - Composição química do resíduo de bauxita	45
Tabela 4.4 - Resultados de FRX apresentados termos de óxidos	46
Tabela 4.5 – Caracterização dos agregados graúdo sintéticos.	46
Tabela 4.6: Composição química do Clínquer	51
Tabela 4.7: Procedimento experimental	54
Tabela 5.1: Quantitativo de material utilizado com RASRB 70	58
Tabela 5.2: Quantitativo de material utilizado com RASRB 80.	61
Tabela 5.3: Quantitativo de material utilizado para RASRB 90.	64
Tabela 5.4: Resistência à Compressão das Argamassas.	67

Lista de Abreviaturas e Siglas

Símbolo	Significado
<i>a/c</i>	Relação água/cimento
<i>ABNT</i>	Associação Brasileira de Normas Técnicas
<i>AGS</i>	Agregado Sintético
<i>Al₂O₃</i>	Óxido de Alumínio - Alumina
<i>C₂S</i>	Silicato Dicálcico
<i>C₃A</i>	Aluminato Tricálcico
<i>C₃S</i>	Silicato Tricálcico
<i>C₄AF</i>	Ferro Aluminato Tetracálcico
<i>CaO</i>	Óxido de Cálcio
<i>CO₂</i>	Gás Carbônico
<i>CETEM</i>	Centro de Tecnologia Mineral
<i>CH</i>	Hidróxido de Cálcio
<i>CPI</i>	Cimento Portland Comum
<i>CPII</i>	Cimento Portland Composto
<i>CPIII</i>	Cimento Portland de Alto-Forno
<i>CPIV</i>	Cimento Portland Pozolânico
<i>CPV-ARI</i>	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
<i>C-S-H</i>	Silicato de Cálcio Hidratado
<i>Fe₂O₃</i>	Óxido de ferro (III)
<i>GCCA</i>	<i>Global Cement and Concrete Association</i>
<i>MPa</i>	Mega Pascal
<i>Mt</i>	Milhões de toneladas
<i>Na₂O</i>	Óxido de Sódio
<i>NaOH</i>	Hidróxido de Sódio (soda cáustica)
<i>NBR</i>	Norma Brasileira Regulamentada
<i>RASRB</i>	Resíduo de Agregado Sintético com Resíduo de Bauxita
<i>RB</i>	Resíduo de Bauxita
<i>SiO₂</i>	Dióxido de Silício – Sílica
<i>AGS</i>	Agregado Sintético
<i>LEC</i>	Laboratório de Engenharia Civil
<i>IPT</i>	Instituto de Pesquisas Tecnológicas

1. INTRODUÇÃO

O cimento é o material mais consumido no mundo, cerca de 14 bilhões de metros cúbicos (m³) de concreto são utilizados por ano, segundo a Global Cement and Concrete Association (GCCA), representando 13% do PIB mundial para a indústria da construção civil (ISTO É Revista, 2024).

A indústria global do concreto, anunciou no ano de 2023 tem a meta de atingir a neutralidade de carbono até 2050. A indústria está comprometida com a comercialização de novos cimentos “verdes” para que possam vir a substituir o clínquer por materiais reutilizados da indústria da construção civil (ISTO É Revista, 2024).

Além de ter uma participação expressiva na taxa de geração de poluentes e representar a maior fonte de geração de resíduos sólidos, a construção civil é o setor que mais consome recursos naturais no mundo. Enfatizam-se as quantidades significativas das emissões de gás carbônico (CO₂) geradas na produção de cimento Portland. (RESENDE, 2013).

A mineração apesar de seus benefícios para a economia e desenvolvimento social, gera uma grande quantidade de rejeitos com elevados custos de gerenciamento. No que se refere a mineração, destacaremos a indústria da alumina, sendo seu principal rejeito, o resíduo da bauxita (RB), popularmente conhecido como “lama vermelha”.

Segundo CARTER et al. (2008), a produção de 1 Ton de alumina gera em torno de 2 Ton de Resíduo de Bauxita (RB) e 1 Ton de CO₂. Atualmente, são produzidas cerca de 150 milhões de toneladas (MTon) de lama vermelha por ano, das quais cerca de 2 a 3% são reutilizadas ou recicladas de forma produtiva. Da produção brasileira de RB, 6,1 MTon, são depositados na Amazônia 4,9 MTon. De acordo com a tecnologia mais recente, parte de sua umidade é removida e o RB é empilhado em depósitos impermeáveis especialmente construídos.

Com isso, devido ao grande consumo de concreto no mundo e a busca por materiais alternativos descartados por outras atividades, diversos estudos estão sendo realizados na busca por materiais que possam adicionar e/ou substituir os atuais componentes do concreto de forma eficiente sustentável, reduzindo custos e minimizando os impactos ambientais (MENDES, 2016).

Portanto, esta pesquisa vem propor o estudo viabilidade técnica do uso do Resíduo de Agregado Sintético com Resíduo de Bauxita – RASRB, como substituição ao cimento Portland (efeito filer), para avaliar caracterização do agregado sintético proveniente do resíduo da bauxita para produção de concreto, utilizando diferentes técnicas: composição granulométrica, índice de forma, perda ao choque, absorção de água, resistência ao desgaste, dosagem do concreto e ensaios mecânicos, para identificar a potencialidade e discutir possíveis aplicações deste agregado sintético proveniente do resíduo da bauxita (RB).

1.1 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente pesquisa se desenvolverá em cinco capítulos, conforme descrito a seguir, e demonstrado na Figura 1.1.

O primeiro capítulo terá introdução abordando a importância do tema, através das justificativas, os objetivos e a estruturação da pesquisa.

O segundo capítulo apresentará os objetivos, geral e específico proposto por esta dissertação.

O terceiro capítulo será constituído por revisão bibliográfica, onde inicialmente será feita uma breve descrição sobre o Resíduo de Bauxita, Adições Minerais, Cimento Portland com composição química, hidratação, classificação e suas características físico-químicas e mecânicas. Assim como, uma breve revisão sobre adições minerais e sua influência em argamassas.

O quarto capítulo abordará materiais e métodos, com planejamento experimental e materiais a serem utilizados; realizará ainda as caracterizações físicas do resíduo de bauxita; investigará a atividade pozolânica da amostra como filer; avaliará a resistência à compressão aos 7, 14 e 28 dias e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

O quinto capítulo será apresentação e análise dos resultados obtidos dos ensaios.

O sexto capítulo finalizará o trabalho com as conclusões e sugestões para futuras pesquisas.

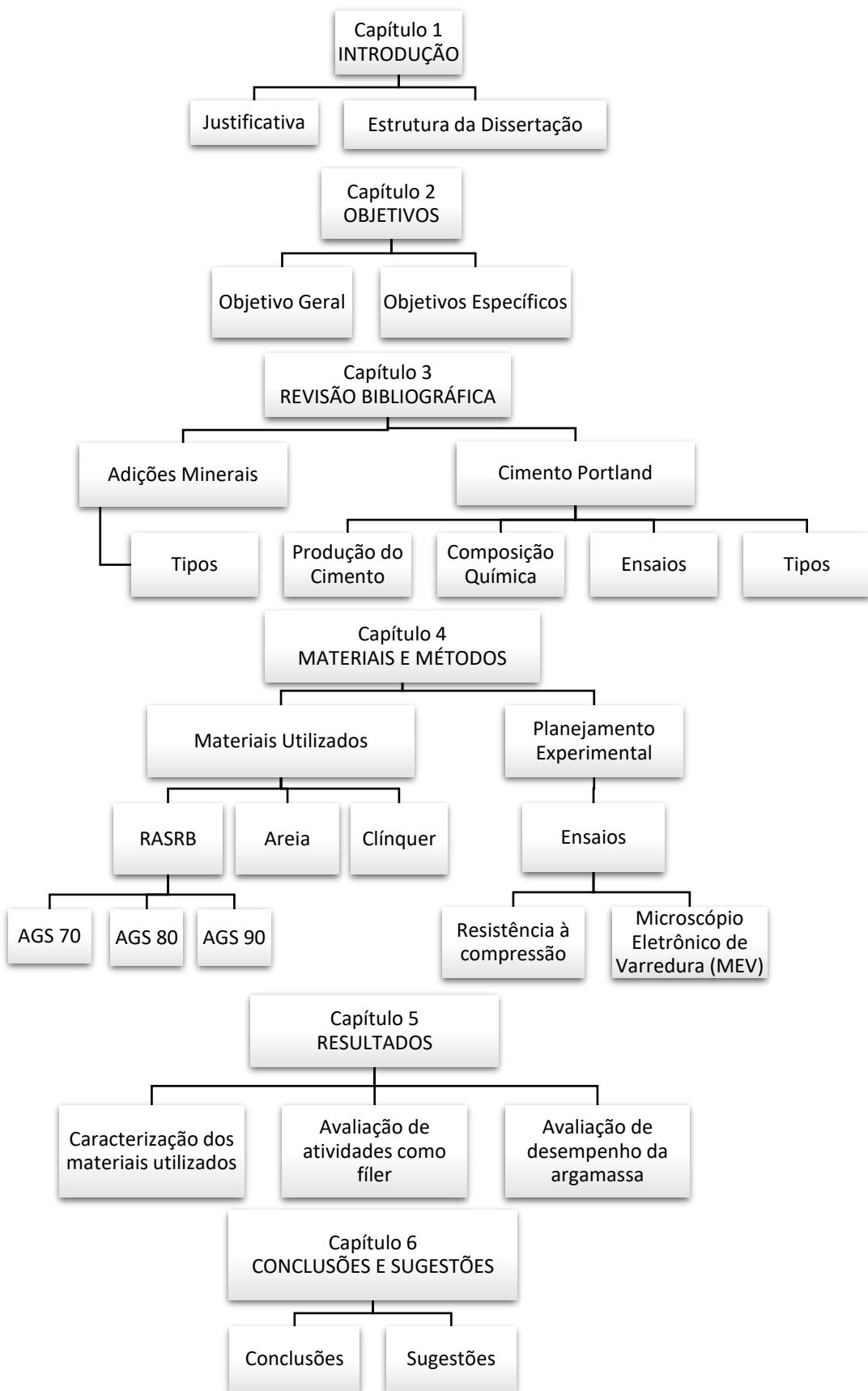


Figura 1.1: Estrutura da Dissertação
Fonte: Autora

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem como objetivo geral estudar a viabilidade técnica do uso do Resíduo de Agregado Sintético com Resíduo de Bauxita – RASRB, como substituição ao cimento Portland (efeito filer).

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Beneficiamento e caracterização do Resíduo do Agregado Sintético com Resíduo de Bauxita – RASRB e dos materiais utilizados;
- Avaliar o desempenho da resistência à compressão das argamassas com substituição do RASRB.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 RESÍDUO DE BAUXITA

3.1.1 PROCESSO BAYER

De acordo com SILVA FILHO et al., (2007), o processo Bayer é utilizado para o refino da bauxita na produção da alumina, onde começou a ser adotado pois reduziu drasticamente os custos do processo, somente substituindo o carbonato de sódio (Na_2CO_3) pelo hidróxido de sódio (NaOH) e pela pressão durante a digestão.

Dentre os 250 minerais que contém alumínio, são considerados minérios de alumínio: os bauxitos, as argilas cauliníticas, nefelina e alunita. O minério mais utilizado é o bauxito, onde dois processos são utilizados para seu beneficiamento: o processo Le Chatelier, em que o bauxito e o carbonato de sódio são calcinados para formar o aluminato de sódio, e o processo Bayer desenvolvido pelo químico Austríaco K. J. Bayer, especialmente aplicáveis aos bauxitos gibsíticos (Magalhães, 2012).

Independentemente do processo de produção, a composição do resíduo de bauxita contém seis maiores substâncias químicas constituintes, são elas, Fe_2O_3 , Al_2O_3 , TiO_3 , SiO_3 , Na_2O , CaO . Também se encontra traços de V, Ga, Cr, P, Mn, Cu, Cd, Ni, Zn, Pb, Mg, Zr,

Hf, Nb, U, Th, Y, K, Ba, Sr e raros traços de outros elementos (Kalkan, 2006; Singh et al., 1996, 1997; Tsakiridis et al., 2004).

O processo Bayer é composto de quatro etapas ilustradas na Figura 3.1, quais sejam: digestão, clarificação, precipitação e calcinação. O resíduo utilizado para esta pesquisa passa pelo filtro pressa, onde sai 80% do sólido e a água segue para tratamento de resíduo.

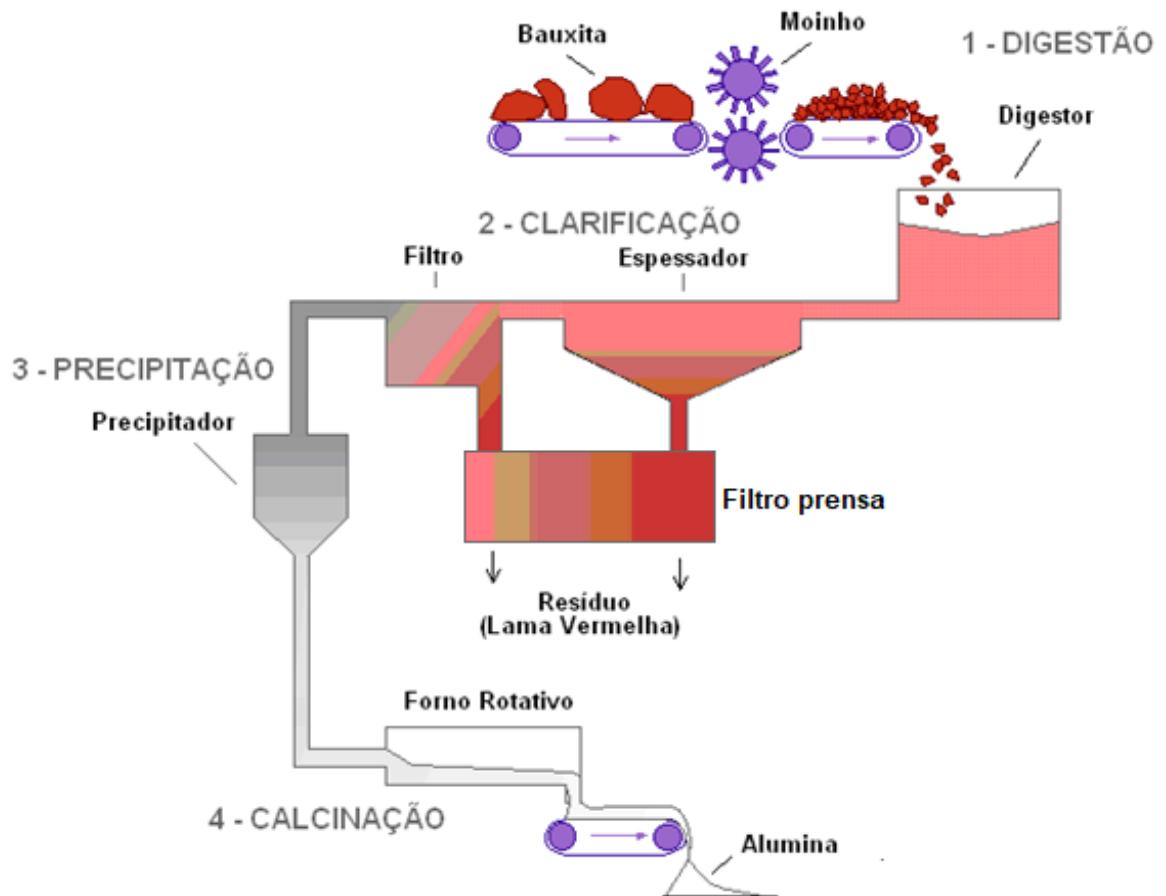


Figura 3.1: Fluxograma e Esquema do processo Bayer

Fonte: Adaptado de DEGEN, Maxwell K. et al. (2019); Autora

3.1.2 CARACTERÍSTICAS DO RESÍDUO DE BAUXITA

O Resíduo de Bauxita é constituído por partículas muito finas (cerca de 95 % < 44 μm , i.e. 325 mesh), apresenta uma área superficial de 13-22 $\text{m}^2 \text{ g}^{-1}$ e tem como principal característica uma elevada alcalinidade, com pH na faixa de 10 a 13 (Silva Filho et al., 2007). Ele se apresenta como um material marrom avermelhado, geralmente composta por dois grupos de minerais, sendo o primeiro composto com os hidróxidos e óxidos de alumínio (gibbsita, boemita, diáspero), ferro (hematita e goethita) e outros (rutilo, anatásio, calcita, dolomita, quartzo); o segundo grupo composto com aluminossilicatos de sódio hidratados

(zeólitas – sodalita e cancrenita), aluminatos tricálcio, muscovita, titanatos de Na, Ca ou Mg e outros (Lima, 2006).

Como visto nos resultados com relação aos compostos químicos presentes no resíduo de bauxita analisado, a sílica (SiO_2), a alumina (Al_2O_3) e o óxido de ferro (Fe_2O_3) são os principais componentes, além de ter uma importante porcentagem de óxido de sódio (Na_2O) e de dióxido de titânio (TiO_2).

A sílica presente é um composto que, promove melhora nas respostas mecânicas das pastas após o endurecimento, devido à nucleação heterogênea acelerada, ao melhor empacotamento das misturas e à maior reatividade das partículas por serem finas (Flores et al., 2017). A alumina também aumenta a resistência a compressão de pastas de cimento Portland devido sua capacidade de refinar os poros da mistura, além disso, acelera a hidratação e diminui a trabalhabilidade (GOWDA et al., 2017). Ela também melhora as propriedades refratárias em concretos, tem alto ponto de fusão e possui boas propriedades mecânicas, se tornando adequada para aplicações em altas temperaturas (KUMAR et al., 2014).

Já o dióxido de titânio acelera a formação do gel C-S-H e melhora a microestrutura do concreto levando à melhora na durabilidade e aumento de resistência (JALAL; FATHI; FARZAD, 2013). No entanto, esse composto não atua como material pozolânico, por isso não aumenta o consumo de cal livre (ESSAWY; Abd, 2014). Além disso, o Anastásio (TiO_2) é muito utilizado como catalisador, pigmento e em materiais eletrônicos, mas essas aplicações requerem titânica de alta pureza para isso é necessário controlar o tamanho, a morfologia e a textura das partículas do cristal (HSIANG; LIN, 2006).

3.1.3 O RESÍDUO DE BAUXITA COMO UMA MATÉRIA PRIMA SUSTENTÁVEL PARA A PRODUÇÃO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL

O setor da alumina e alumínio tornou-se extremamente competitivo em questões relacionadas a diminuição de custos e melhorias em seus processos, os resíduos do setor de alumina e alumínio costumam ser estocados em razão de suas propriedades físico-químicas pouco estudadas e de sua abundância, o que torna sua valorização desafiadora. O Brasil é um dos principais países produtores de minérios do mundo. Em 2020, apesar da pandemia, o Brasil teve um crescimento de 36,2% comparado com o ano de 2019, atingindo R\$ 208,9

bilhões (IBRAM, 2020), que representa uma participação de 4,0% no PIB brasileiro. As substâncias minerais com maior destaque no setor de mineração brasileiro são: ferro, calcário, bauxita, fosfato, manganês e nióbio (IBRAM, 2020).

O Brasil possui a terceira maior reserva de bauxita do mundo com 2,6 bilhões de toneladas, ficando atrás apenas da Guiné, com 7,4 bilhões e da Austrália, com 6,2 bilhões. Em 2018, o País produziu 32 milhões de toneladas do material. De acordo com os dados da Associação Brasileira do Alumínio, o estado do Pará concentra 91% da produção de Bauxita para fins de uso metálico no Brasil. (ABAL 2017).

A reutilização do resíduo da bauxita ainda é desafiadora a indústria do alumínio, uma possível alternativa para solucionar os problemas causados pelo grande volume produzido e estocado do substrato da bauxita é o avanço de tecnologias que tendam a sua reutilização.

A produção global anual de alumínio foi de pouco mais de 64 milhões de toneladas em 2020, e deve crescer para 88 milhões de toneladas até 2050. O alumínio é o 3º elemento mais abundante depois do oxigênio e do silício na crosta terrestre, mas não ocorre naturalmente como metal. Minérios ricos em alumínio (principalmente bauxita) são refinados para produzir alumina (Al_2O_3), que é então reduzido eletroliticamente a alumínio metálico primário usando o processo Hall Héroult. A indústria continua buscando, com crescente sucesso, opções técnica e economicamente viáveis para a extração e aproveitamento do valor dos resíduos com o estado futuro ideal de produção zero de resíduos (IAI, 2022).

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

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

A substituição dos materiais convencionais por agregados sintéticos de resíduos de mineração, tal como, pode suceder em economia na aquisição da matéria-prima. A adesão de rejeitos e resíduos provenientes da exploração mineral ocasiona benefícios de ordem econômica, social e ambiental. O conhecimento das propriedades de agregados provenientes do resíduo da bauxita em substituição ainda é pouco explorado, desta forma, é necessário estudos para complementar, alguns destes estudos podem ser acerca da dosagem de concretos com a inclusão deste material e sua influência nas diferentes propriedades mecânicas.

Portanto, o uso de agregado sintético pode fazer uma diferença significativa no esforço de melhorar a sustentabilidade da indústria da construção, tornando-a econômica e ecológica.

3.1.4 UTILIZAÇÃO DO RESÍDUO DE BAUXITA

Ao longo dos anos, diversos países têm explorado o potencial de reaproveitamento do resíduo da bauxita como matéria-prima viável para a construção civil. Essa motivação global está diretamente ligada ao aumento na geração de resíduo da bauxita durante o processo de refino, transformando-o em um passivo ambiental significativo, além da progressiva escassez de reservas de matérias-primas não renováveis, como os agregados.

Na área da construção civil, propostas para utilizar o resíduo da bauxita na produção de agregados graúdos, através da calcinação com outros materiais como argila, sílica e areia, têm ganhado espaço, visando seu uso em concretos. Vários estudos (ROSSI, 2009; ROSÁRIO, 2013; SOUZA, 2010; AIRES et. al. 2014; MUDGAL et. al. 2018; SOUZA et. al. 2019 e TIAN et. al. 2021); indicam um desempenho superior dos agregados sintéticos em comparação aos naturais, tanto em suas propriedades (por exemplo, abrasão, resistência ao choque, absorção de água) quanto nas propriedades conferidas aos concretos que os incorporam (como resistência à compressão/tração, módulo de elasticidade e absorção capilar de água). Segundo ROSÁRIO (2013) e SUN et al. (2021), a produção de agregados sintéticos visa atender à alta demanda por agregados naturais, especialmente na construção civil.

A utilização desses novos agregados, devido à variabilidade na composição do resíduo da bauxita, requer estudos prévios para avaliar seu desempenho nas aplicações desejadas. Conforme TIAN et. al. (2021), um dos principais desafios nesse contexto é

alcançar um desempenho satisfatório ao utilizar uma proporção maior de resíduo da bauxita, devido à sua elevada alcalinidade in natura.

3.1.5 AGREGADOS SINTÉTICOS

O processo de sinterização define-se como sendo uma transformação física e química a nível permanente, sendo acompanhada, geralmente, de uma redução da porosidade do material pelo sistema de crescimento e contorno de grão (Reis, 2014).

A produção dos agregados sintéticos é feita por meio do aquecimento da matéria prima, triturada ou moída, na maioria das vezes pelotizada, utilizando geralmente um forno rotativo para o agregado adquirir uma forma arredondada. Ainda segundo o último autor citado, ao se observar os estudos relacionados a produção de agregados sintéticos, conclui-se que quase todo material argiloso (após hidratado e pelotizado), forma grãos rígidos ao ser submetidos à queima.

Desenvolvidos durante o processo de sinterização, os poros podem ser totalmente fechados dentro de uma determinada partícula ou expostos à sua superfície externa, sendo que a superfície da partícula do agregado sintético é mais resistente que o interior devido à sinterização da argila expandida em um material do tipo cerâmico (Gao, 2021). Estudos apresentaram várias aplicações de sucesso de agregado sintético como um material de preenchimento geotécnico na década de 1980, incluindo a reabilitação de um terminal portuário fluvial e a construção de uma ponte. Devido à sua granulometria e natureza leve, o agregado sintético é fácil de transportar, preencher e manusear.

O agregado sintético é um material polivalente utilizado em diversas aplicações, no processo de produção de produtos sinterizados como agregados sintéticos, é utilizado como matéria-prima principalmente argilas e areias, e existe a possibilidade de incorporação de resíduos sólidos. A incorporação de resíduos tem como intuito reintroduzir os mesmos na escala produtiva, e aprimorar o controle de produção dos produtos sinterizados, como reduzir a temperatura de sinterização, a absorção de água e porosidade, aumento da massa específica e resistência à compressão (Njindam et al., 2018).

As características dos agregados sintéticos artificiais como resistência satisfatória, são normalmente obtidas por meio da queima destes materiais em altas temperaturas. Vale ressaltar ainda que a qualidade do produto acabado depende fundamentalmente de três

fatores: matéria prima utilizada, temperatura de queima e do processo de conformação da massa cerâmica (Cabral et al., 2008).

O agregado sintético é formado a partir de sílico-aluminatos submetidos a um processo de sinterização em elevadas temperaturas, geralmente processados em fornos rotativos, resultando em um aumento da porosidade dos grãos e características singulares, como: leveza, capacidade de absorção de água e isolamento, ambos térmicos e acústico. A sua baixa densidade torna esse material apropriado para uso em construção como aterros sobre solos com baixa rigidez e como material de enchimento em estruturas de retenção, visando à redução de pressões ativas (Roces-Alonso et al., 2021). Na Figura 3.2 é apresentado o agregado sintético de resíduo de bauxita desenvolvido neste projeto de estudo.



Figura 3.2: Agregado sintético de resíduo de bauxita.

Fonte: Farias, M. M. (Tese Doutorado, 2025).

3.2 CIMENTO PORTLAND

3.2.1 Produção do Cimento

O processo de produção consiste em moer as matérias-primas cruas de um material cárlico, como o calcário ou giz, e a sílica e a alumina encontradas em argilas ou folhetos, até a obtenção de um pó bastante fino misturando em proporções pré-determinadas e queimá-las em um grande forno rotativo a uma temperatura próxima de 1400°C. No forno ocorre a sinterização do material e a sua função parcial na forma de clínquer, que após ser resfriado receber uma determinada quantidade de gipsita (sulfato de cálcio), sendo então novamente moído até resultar em um pó fino. Este produto resultante é o Cimento Portland comercial (NEVILLE, 2013).

A mistura e a moagem das matérias primas podem ser feitas tanto com o uso de água como em condição seca: daí as denominações processo por via úmida e processo por via seca. A mistura é levada a um forno rotativo, levemente inclinado e a mistura é carregada pela extremidade superior, enquanto o carvão pulverizado (ou outra fonte de calor) é insuflado por um jato de ar na extremidade mais baixa do forno.

Como a mistura das matérias-primas se movimentam no forno, ela encontra temperaturas progressivamente mais altas, de modo que várias reações químicas ocorrem ao longo do forno. Primeiramente a água é eliminada e o gás carbônico é liberado do carbonato de cálcio, na sequência o material seco passa por uma série de reações químicas, até que na parte mais quente do forno, cerca de 20 a 30 % do material se liquefaz e o cal (CaO), sílica e alumina se recombinam. A massa se funde na forma de esferas com diâmetros variáveis entre 3 e 25 mm, sendo esse material conhecido como clínquer.

O clínquer passa por resfriadores que proporcionam meios para uma troca de calor com o ar a ser utilizado na combustão do carvão pulverizado. O clínquer resfriado é um material bastante duro, então é moído em conjunto com o sulfato de cálcio de maneira a prevenir a pega instantânea do cimento (NEVILLE, 2013).

3.2.2 Composição Química

O cimento Portland é o principal aglomerante utilizado na construção civil, sendo a base para concretos e argamassas. A compreensão do seu comportamento reológico é fundamental para otimizar propriedades como trabalhabilidade, resistência mecânica e durabilidade. A reologia, ciência que estuda a deformação e o escoamento de materiais, permite analisar a pasta de cimento como um fluido não newtoniano no qual existe uma tensão de escoamento mínima para que ocorra fluxo, cujo comportamento é influenciado por fatores físicos e químicos, impactando diretamente no desempenho da argamassa.

Alguns fatores que influenciam a reologia podem incluir: A Relação água/cimento (a/c), onde o aumento desta relação reduz a viscosidade e melhora a fluidez, porém, compromete a resistência mecânica (NEVILLE, 2016); Granulometria do cimento: partículas mais finas aumentam a demanda de água e alteram a tensão de escoamento (MEHTA; MONTEIRO, 2014); Os Aditivos químicos plastificantes e superplastificantes, reduzem a viscosidade, permitindo manter baixa relação a/c; retardadores e aceleradores modulam o tempo de pega (SCRIVENER; SNELLINGS; LOTHENBACH, 2018); A Temperatura influencia a cinética de hidratação, acelerando ou retardando a evolução da

viscosidade (TATTERSALL; BANFILL, 1983). À medida que a hidratação progride, ocorre a formação de produtos como C-S-H e etringita, que aumentam a rigidez da pasta, reduzindo a mobilidade da argamassa e impactando a reologia ao longo do tempo (SCRIVENER; SNELLINGS; LOTHENBACH, 2018).

O cimento pode ser considerado como em equilíbrio congelado, admite-se que os produtos resfriados reproduzem o equilíbrio existente na temperatura de clinquerização. Essa consideração é de fato adotada no cálculo da composição de compostos de cimentos comerciais: a composição potencial é calculada a partir da quantidade medida de óxidos presentes no clínquer.

Quatro compostos são destacados como principais constituintes do cimento, listados na tabela 3.1, essa denominação abreviada utilizada pela química do cimento, descreve cada óxido por uma letra, ou seja, $\text{CaO} = \text{C}$, $\text{SiO}_2 = \text{S}$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = \text{A}$, $\text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{F}$, da mesma forma que o H_2O no cimento hidratado é representado por H.

Tabela 3.1: Principais compostos do cimento Portland

Nome do Composto	Composto em óxidos	Abreviatura
Silicato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S
Silicato dicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
Ferroaluminato tetracálcio	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

Fonte: NEVILLE, 2013

Os principais compostos do cimento Portland, são os silicatos tricálcico (C_3S), silicato dicálcico (C_2S), conforme figura 3.3, pois são responsáveis pela resistência da pasta de cimento hidratada; o aluminato tricálcico (C_3A) no cimento é indesejável, pois ele contribui pouco para resistência do cimento, exceto nas primeiras idades. Além disso, quando a pasta endurecida de cimento é atacada por sulfatos, a formação de sulfoaluminato de cálcio (etricita) pode causar desagregação do concreto, mas o C_3A é benéfico na produção do cimento, pois facilita a combinação de óxidos de cálcio com a sílica; e o ferro aluminato tetracálcico (C_4AF) não afeta significativamente o comportamento comparado com os outros três compostos, entretanto ele reage com o gipsita para formar sulfoferrito de cálcio e sua presença pode acelerar a hidratação dos silicatos (NEVILLE, 2013 e 2016).

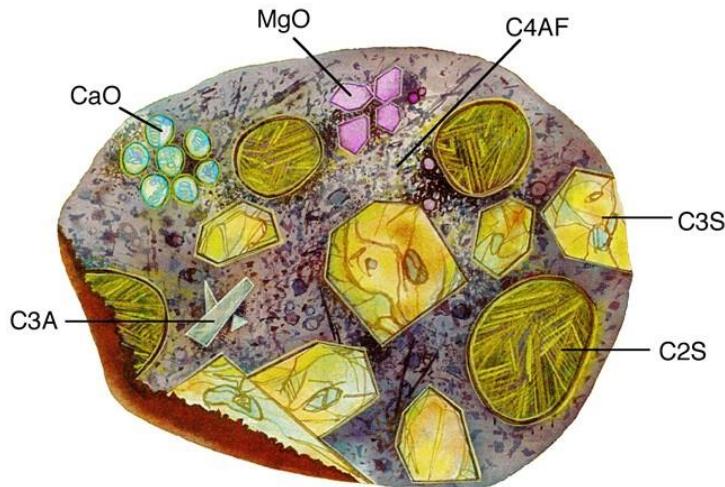


Figura 3.3: Minerais compostos no Cimento Portland

Fonte: <https://civilblog.org/2017/07/14/4-primary-cement-compounds-roles/>.

3.2.3 Ensaios em Cimentos

3.2.3.1 Finura do Cimento

A granulometria ou finura do cimento pode ser identificada de duas formas: pelo tamanho máximo das partículas, quando as especificações estabelecem uma proporção em peso do material retido na operação de peneiramento em malha de abertura definida, especificada pela NBR 11579 (ABNT, 2013).

A área superficial total do cimento representa o material disponível para hidratação, iniciando na superfície das partículas do cimento. Com isso, a velocidade de hidratação depende da finura das partículas e para um rápido desenvolvimento de resistência é necessária uma finura elevada. NBR 11579 (ABNT, 2013).

3.2.3.2 Pasta de Consistência Normal

Para este ensaio deve utilizar uma pasta de cimento pura com consistência padrão, para determinação dos tempos de início e fim de pega e para o ensaio de expansibilidade de *Le Chatelier* sendo necessário determinar, para qualquer cimento, a quantidade de água que produzirá essa pasta.

A consistência é determinada pelo aparelho de Vicat, que mede a profundidade de penetração de uma sonda de 10mm de diâmetro sob ação do seu peso próprio. A quantidade de água necessária expressa como uma porcentagem da massa de cimento seco, situando-se entre 26 e 33%, conforme NBR 16606 (ABNT, 2018).

3.2.3.3 Tempo de Pega

O aparelho de Vicat é novamente utilizado para determinação do tempo de início e fim de pega. Dessa vez com uma agulha de 1mm de diâmetro, sob ação de um peso normalizado, penetrando em uma pasta de cimento de consistência normal, quando a agulha não penetra mais que (6 ± 2) mm, a partir do fundo do molde (placa base), considera-se que o início de pega ocorreu, sendo o tempo medido desde a adição de água ao cimento.

O fim de pega é determinado pelo intervalo de tempo transcorrido desde o momento em que o cimento entra em contato com a água até o momento em que a agulha de Vicat penetra 0,5mm na pasta, estabelecido pela NBR 16607 (ABNT, 2018).

3.2.3.4 Resistência

Uma argamassa de cimento e areia e, em alguns casos, concretos com proporções normalizadas, produzida com materiais específicos sob condições rigidamente controladas, é utilizada para determinação da resistência do cimento. Os ensaios não são feitos na pasta de cimento pura, devido à dificuldade de obtenção de bons corpos de provas e de ensaio e, portanto, a variabilidade dos resultados.

No Brasil, o ensaio é prescrito pela NBR 7215 (ABNT, 2025) onde o método compreende a determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura. Estes são elaborados com argamassa composta de uma parte de cimento e três de areia normalizada, em massa, e com relação água/cimento de 0,48.

A compreensão da reologia do cimento é essencial para o controle das propriedades da argamassa. Em estado fresco, a tensão de escoamento e a viscosidade determinam a trabalhabilidade, a aderência ao substrato e a facilidade de aplicação. Já em estado endurecido: a microestrutura resultante da hidratação define resistência, durabilidade e retração.

Segundo a NBR 7215 (ABNT, 2025), a resistência à compressão é o método de determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos de argamassa de cimento Portland através de ensaio. Essa propriedade é diretamente afetada por condições reológicas no estado fresco. Excesso de água (baixa viscosidade) melhora a fluidez, mas aumenta a porosidade após a cura, reduzindo a resistência à compressão. Já a baixa trabalhabilidade (alta viscosidade) pode gerar falhas de adensamento e heterogeneidade na argamassa, comprometendo a resistência.

Por outro lado, o uso de aditivos superplastificantes permite manter baixa relação a/c com alta fluidez, resultando em maior resistência conforme ensaiado pela norma.

Assim, a reologia controla a distribuição e a compacidade da mistura fresca, influenciando diretamente o desempenho mecânico medido e fornecem parâmetros essenciais para a classificação e controle de qualidade do cimento Portland, segundo a NBR 7215 (ABNT, 2025).

3.2.4 Tipos de Cimento Portland

A partir de 1904 a indústria limitou-se a produzir apenas alguns tipos de cimentos, devido à introdução das primeiras especificações da *American Society for Testing and Materials* (ASTM).

A tabela 3.2, apresenta os principais tipos de cimento Portland, designação normalizada, sigla e classe do cimento Portland, enquanto a tabela 3.4 mostra os valores mínimos e máximos admissíveis na composição de cada tipo de cimento, conforme classificação da NBR 16697 (ABNT 2018).

Os cimentos Portland são denominados por seu tipo que correspondem a adições e propriedades especiais. Estes, são identificados por suas siglas, seguidas de sua classe de resistência (25, 32, 40 ou ARI), acrescidas dos sufixos RS e BC, quando aplicáveis, conforme tabela 3.3. NBR 16697 (ABNT 2018).

Tabela 3.2 - Designação normalizada, sigla e classe do cimento Portland.

Designação normalizada (tipo)	Subtipo	Sigla	Classe de resistência	Sufixo
Cimento Portland comum	Sem adição	CP I	25, 32, 40 ^c	RS ^a ou BC ^b
	Com adição	CP I-S		
Cimento Portland composto	Com escória granulada de alto forno	CP II - E	25, 32, 40 ^c	-
	Com material carbonático	CP II - F		
	Com material pozolânico	CP II - Z		
Cimento Portland de alto-forno		CP III	ARI ^d	-
Cimento Portland pozolânico		CP IV		
Cimento Portland de alta resistência inicial		CP V	25, 32, 40 ^c	-
Cimento Portland branco	Estrutural	CPB		
	Não estrutural	CPB		

^a O sufixo RS significa resistente a sulfatos e se aplica a qualquer tipo de cimento Portland que atenda aos requisitos estabelecidos em 5.3, além dos requisitos para seu tipo e classe originais.

^b O sufixo BC significa baixo calor de hidratação e se aplica a qualquer tipo de cimento Portland que atenda aos requisitos estabelecidos em 5.4, além dos requisitos para seu tipo e classe originaria.

^c As classes 25, 32, e 40 representam os mínimos de resistência à compressão aos 28 dias de edade, em megapascal (Mpa), conforme método de ensaio estabelecido pela ABNT NBR 7215.

^d Cimento Portland de alta resistência inicial, CP V, que apresenta a 1 dia de idade resistência igual ou maior que 14 Mpa, quando ensaiado de acordo com a ABNT NBR 7215 e atende aos demais requisitos estabelecidos nesta Norma para esse tipo de cimento.

Fonte: NBR 16697 (ABNT, 2018)

Tabela 3.3 - Limite de composição do cimento Portland (porcentagem em massa).

Designação normalizada	Sigla	Classe de resistência	Sufixo	Clínquer + sulfatos de cálcio	Escória granulada de alto-forno	Material pozolânico	Material carbonático
Cimento Portland comum	CP I	25, 32 ou 40	RS ou BC	95 – 100	0 – 5		
	CP I-S			90 – 94	0	0	6 – 10
Cimento Portland composto com escória granulada de alto- forno	CP II-E			51 – 94	6 – 34	0	0 - 15
Cimento Portland composto com material pozolânico	CP II-Z			71 – 94	0	6 – 14	0 – 15
Cimento Portland composto com material carbonático	CP II-F			75 – 89	0	0	11 – 25
Cimento Portland de alto forno ^b	CP III			25 – 65	35 – 75	0	0 – 10
Cimento Portland pozolânico ^c	CP IV			45 – 85	0	15 – 50	0 – 10
Cimento Portland de alta resistência inicial	CP V ^a	ARI		90 – 100	0	0	0 – 10
Cimento Portland branco	Estrutural	25, 32 ou 40	CPB	75 – 100	-	-	0 – 25
	Não estrutural			-	50 – 74	-	26 - 50

^a No caso do cimento Portland de alta resistência inicial resistente a sulfatos (CP V-ARI RS), podem ser adicionadas escórias
granuladas de alto-forno ou materiais pozolânicos.

Fonte: NBR 16697 (ABNT, 2018)

Ainda na NBR 16697 (ABNT 2018) são apresentados os requisitos químicos do cimento Portland, demonstrado na tabela 3.4 e os requisitos físicos e mecânicos para cada tipo de cimento, conforme tabela 3.5.

Tabela 3.4 - Requisitos químicos do cimento Portland (porcentagem em massa).

Sigla ^a	Resíduo Insolúvel (RI)	Perda ao Fogo (PF)	Óxido de magnésio (MgO)	Trióxido de Enxofre (SO ₃)
CP I	≤ 5,0	≤ 4,5	≤ 6,5	≤ 4,5
CP I-S	≤ 3,5	≤ 6,5	≤ 6,5	≤ 4,5
CP II-E	≤ 5,0	≤ 8,5	-	≤ 4,5
CP II-F	≤ 7,5	≤ 12,5	-	≤ 4,5
CP II-Z	≤ 18,5	≤ 8,5	-	≤ 4,5
CP III	≤ 5,0	≤ 6,5	-	≤ 4,5
CP IV	-	≤ 6,5	-	≤ 4,5
CP V ^b	≤ 3,5	≤ 6,5	≤ 6,5	≤ 4,5
CPB Estrutural	≤ 3,5	≤ 12,0	≤ 6,5	≤ 4,5
CPB Não Estrutural	≤ 7,0	≤ 27,0	≤ 10,0	≤ 4,5

^a Requisitos aplicáveis também aos cimentos resistentes a sulfatos e de baixo calor de hidratação, identificados por sua sigla seguida do sufixo RS ou BC, respectivamente.

^b No caso de cimentos resistentes a sulfatos derivado dos cimentos tipo CPV, não há limitação para RI e MgO.

Fonte: NBR 16697 (ABNT, 2018)

Tabela 3.5 - Requisitos físicos e mecânicos.

Sigla ^a	Classe	Finura	Tempo de Início de pega min	Expansibilidade a quente mm	Resistência à compressão MPa				Índice de branura
					1 dia	3 dias	7 dias	28 dias	
CP I	25	≤ 12,0	≥ 60	≤ 5	-	≥ 8,0	≥ 15,0	≥ 25,0	-
CP I-S		≤ 12,0	≥ 60	≤ 5	-	≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 32,0	-
CP II-E		≤ 12,0	≥ 60	≤ 5	-	≥ 15,0	≥ 25,0	≥ 40,0	-
CP II-F		≤ 10,0	≥ 60	≤ 5	-	≥ 15,0	≥ 25,0	≥ 40,0	-
CP II-Z		≤ 8,0	≥ 60	≤ 5	-	≥ 8,0	≥ 15,0	≥ 25,0	-
CP III	32	≤ 8,0	≥ 60	≤ 5	-	≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 32,0	-
CP IV		≤ 8,0	≥ 60	≤ 5	-	≥ 12,0	≥ 23,0	≥ 40,0	-
CP V		ARI	≤ 6,0	≥ 60	≤ 5	≥ 14,0	≥ 24,0	≥ 34,0	-
CPB Estrutural	40	≤ 12,0 ^b	≥ 60	≤ 5	-	≥ 8,0	≥ 15,0	≥ 25,0	≥ 78
		≤ 12,0 ^b	≥ 60	≤ 5	-	≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 32,0	
		≤ 12,0 ^b	≥ 60	≤ 5	-	≥ 15,0	≥ 25,0	≥ 40,0	

CPB Não Estrutural	-	$\leq 12,0^b$	≥ 60	≤ 5	-	$\geq 5,0$	$\geq 7,0$	$\geq 10,0$	≥ 82
--------------------	---	---------------	-----------	----------	---	------------	------------	-------------	-----------

^a Requisitos aplicáveis também aos cimentos resistentes aos sulfatos e de baixo calor de hidratação, identificados por sua sigla seguida do sufixo RS ou BC, respectivamente.

^b Resíduo na peneira 45 μm

Fonte: NBR 16697 (ABNT, 2018)

O cimento Portland Comum é constituído por 95-100% de clínquer e sulfato de cálcio, 0-5% de constituintes secundários (escória granulada de alto-forno, material pozolânico e/ou material carbonático)

Cimento Portland Comum com Adições CP I-S, com 6-10% de material carbonático em massa é utilizado quando não são requeridas propriedades especiais. Este é adequado para o uso em construções de concreto em geral quando não há exposição a sulfatos do solo ou de águas subterrâneas.

O Cimento Portland Composto (CPII), é o aglomerante hidráulico obtido pela moagem de clínquer Portland ao qual se adiciona, durante a operação, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio. Durante a moagem é permitido adicionar a esta mistura materiais pozolânicos, escórias granuladas de alto-forno e/ou materiais carbonáticos nos teores especificados na seguir Tabela 3.6:

Tabela 3.6 - Composição do Cimento Portland Composto (% em massa)

Sigla	Classe de resistência	Clínquer + sulfato de cálcio	Escória granulada de alto-forno	Material pozolânico	Material carbonático
	25				
CP II - E	32	51 a 94	6 a 34	0	0 a 15
	40				
	25				
CP II- Z	32	71 a 94	0	6 a 14	0 a 15
	40				
	25				
CP II- F	32	75 a 89	0	0	11 a 25
	40				

CPII-E: Cimento Portland Composto com Escória; CPII-Z: Cimento Portland Composto com Pozolana; CPII-F: Cimento Portland Composto com Fíler

Fonte: NBR 16697 (ABNT, 2018)

O Cimento Portland de Alto-Forno (CPIII), segundo a NBR 16697 (ABNT, 2018) é um aglomerante hidráulico obtido pela mistura homogênea de clínquer Portland e escória granulada de alto-forno, moído em conjunto ou separado. Durante a moagem é permitida a adição de uma ou mais formas de sulfato de cálcio e materiais carbonáticos nos teores abaixo na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 - Composição do Cimento Portland de Alto-Forno (% em massa)

Sigla	Classe de resistência	Clínquer + sulfato de cálcio	Escória granulada de alto-forno	Material pozolânico	Material carbonático
	25				
CP III	32	25 a 65	35 a 75	-	0 a 10
	40				

Fonte: NBR 16697 (ABNT, 2018).

O Cimento Portland Pozolânico (CPIV), NBR 16697 (ABNT, 2018) é um aglomerante hidráulico obtido pela mistura homogênea de clínquer Portland e materiais pozolânicos, moídos em conjunto ou separados. Durante a moagem é permitido adicionar uma ou mais formas de sulfato de cálcio e materiais carbonáticos no teor especificado a seguir na Tabela 3.8.

Tabela 3.8 - Composição do Cimento Portland Pozolânico (% em massa)

Sigla	Classe de resistência	Clínquer + sulfato de cálcio	Escória granulada de alto-forno	Material pozolânico	Material carbonático
	25				
CP IV	32	45 a 85	-	15 a 50	0 a 10
	40				

Fonte: NBR 16697 (ABNT, 2018).

O Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CPV), NBR 16697 (ABNT, 2018) é um aglomerante hidráulico que atende as exigências de alta resistência inicial, obtido pela moagem de clínquer Portland, constituído em sua maior parte de silicatos de cálcio hidráulicos, ao qual se adiciona, durante a operação, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio. Durante a moagem é permitido adicionar a esta mistura materiais carbonáticos, no teor especificado a seguir na Tabela 3.9.

Tabela 3.9 - Composição do Cimento Portland de Alta Resistência Inicial

Sigla	Classe de resistência	Clínquer + sulfato de cálcio	Escória granulada de alto-forno	Material pozolânico	Material carbonático
CP V	ARI	90 a 100	-	-	0 a 10

Fonte: NBR 16697 (ABNT, 2018).

A alta resistência inicial se deve à utilização de uma dosagem diferente de calcário e argila na produção do clínquer e, principalmente, à moagem mais fina do cimento, que conduz a uma área específica maior, pois um grande aumento do teor de alita e aluminatos para acelerar o endurecimento acarretaria um grande aumento do calor de hidratação (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

O Cimento Portland Branco (CPB), NBR 16697 (ABNT, 2018) é um tipo de cimento que se diferencia dos demais pela coloração. A cor branca é conseguida a partir de matérias-primas com baixos teores de óxido de ferro e manganês e por condições especiais durante a fabricação, especialmente com relação ao resfriamento e à moagem dos produtos.

3.3 ADIÇÕES MINERAIS

Adição mineral é qualquer material, que não seja água, agregados, cimentos hidráulicos ou fibras, usado como ingrediente do concreto ou argamassa e, adicionado à massa imediatamente ou durante a mistura (ASTM C125, 2001).

MEHTA; MONTEIRO (2008), definem adições minerais como materiais silicosos finamente divididos, com propriedades pozolânicas, cimentícias ou de preenchimento de poros (fíler), normalmente adicionados ao concreto e argamassas.

De acordo com a NBR 12653 (ABNT, 2015) os materiais silicosos ou silicoaluminosos têm pouca ou nenhuma adesão por si própria, mas quando finamente divididos e na presença de água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente, formando um composto adesivo.

Segundo NBR 12653 (ABNT, 2015), os materiais pozolânicos reagem com o hidróxido de cálcio, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, resultante da hidratação do cimento Portland, produzindo o sulfato de cálcio (C-SH) adicional. Sua adição aos concretos, argamassas e pastas, em relação a uma referência, sem uso desses materiais e em condições iguais, contribuem para

o ganho da resistência à compressão e à flexão, a idades avançadas de uma diminuição nas primeiras idades; redução da porosidade e permeabilidade; aumento da resistência a sulfatos.

Além disso, as adições podem promover a substituição parcial do cimento Portland. O uso de algumas adições em substituição parcial à massa do cimento possibilita uma redução em sua utilização, sem afetar suas características de resistência final. As mesmas podem ser obtidas de fontes naturais ou de alguns subprodutos de atividades industriais (LISBOA et al., 2017).

O desenvolvimento de materiais alternativos de desempenho similar aos tradicionais e/ou de desempenho compatível ao seu uso com custo inferior e vem com a vantagem de dar uma destinação aos resíduos se mostra bastante atrativa (VASKE, 2012).

3.3.1 TIPOS DE ADIÇÕES MINERAIS

As adições minerais, de acordo com sua ação físico-química, podem ser classificadas em dois distintos grupos (figura 3.4): Adição pozolânicas e fíler.

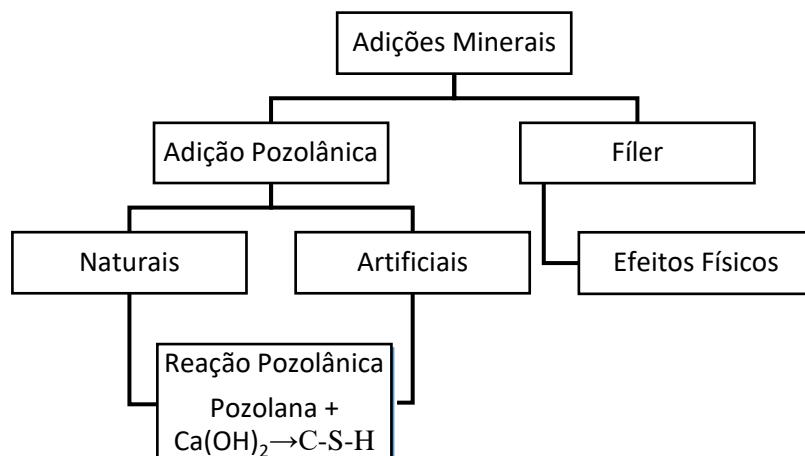


Figura 3.4: Tipos de adições minerais

Fonte: Farias, M. M. (Tese Doutorado, 2025).

3.3.1.1 Adição Pozolânica

O material pozolânico, de acordo com a norma NBR 12653 (ABNT, 2015), possui pouca ou nenhuma propriedade cimentante, mas que, quando finamente dividida e na presença de água, reage quimicamente com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente, formando compostos com propriedades ligantes. Ele é definido como um material silicoso ou sílico-aluminoso. Sendo subdividido em:

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

A NBR 12653 (ABNT, 2015) também apresenta uma classificação geral para os materiais pozolânicos condicionada à conformidade de exigências químicas e físicas, dividida em três classes:

- Classe **N** são as pozolanas naturais e artificiais, como certos materiais vulcânicos de caráter petrográfico ácido, “*cherts*” silicosos, terras diatomáceas e argilas calcinadas.
- Classe **C** são as cinzas volantes produzidas pela queima de carvão mineral em usinas termoelétricas.
- Classe **E** são qualquer pozolana cujos atributos diferem das classes anteriores.

Na Tabela 3.10, são apresentadas as exigências químicas e físicas para as diferentes classes de material pozolânico.

Tabela 3.10 - Exigências químicas e físicas dos materiais pozolânicos.

Propriedades	Classes de material pozolânico		
	N	C	E
Exigências Químicas			
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	≥70	≥70	≥50
SO ₃ % máx.	≤4	≤5	≤5
Teor de umidade, % máx.	≤3	≤3	≤3
Perda ao fogo, % máx.	≤10	≤6	≤6

Álcalis disponíveis em Na ₂ O, % máx.	≤1,5	≤1,5	≤1,5
Exigências Físicas			
Material retido na peneira 45 µm, % máx.	<20	<20	<20
Índice de atividade pozolânica:			
• Com cimento aos 28 dias, em relação ao controle, % mín.	≥90	≥90	≥90
• Com cal aos 7 dias, em Mpa	6	6	6

Fonte: NBR 12653 (ABNT, 2015)

3.3.1.2 Fíler

É um material finamente moído, com aproximadamente mesma finura do cimento Portland que, em razão de suas propriedades físicas, expõe um efeito benéfico em algumas propriedades do concreto, como trabalhabilidade, massa específica, permeabilidade, exsudação e tendência à fissuração (NEVILLE, 2016).

De acordo com FONSECA (2010, p.44), utiliza-se o fíler principalmente nos seguintes casos: espaçador de asfaltos fluidos; fabricação de mastiques betuminosos; preparação de argamassas betuminosas; preparação de concretos hidrocarbonatos; adição a cimentos; fabricação de borracha artificial; adição a concretos com consumos baixos de cimento para colmatar os vazios.

A maioria das adições minerais inclui alguma forma de sílica vítreia que pode compatibilizar com a cal na presença de água, à temperatura ambiente, para formar silicato de cálcio hidratado idêntico aquele formado pela hidratação do cimento. No entanto, conforme AITCIN (2009), alguns fíler empregados como adição ao cimento não possuem essa propriedade, sendo utilizado com finalidade exclusivamente pela sua presença física, gerando assim um efeito micro fíler, que é responsável por aumentar a densidade da mistura resultante do preenchimento dos vazios pelas minúsculas partículas das adições, cujo diâmetro médio de partícula, deve ser semelhante ou menor que o do cimento (PILAR, 2012).

Segundo NEVILLE (2016), o fíler é mais brando do que o clínquer, com isso é preciso moer bem o material composto por mais tempo, a fim de garantir a presença de uma parte de partículas com maior finura, que são necessárias para as resistências iniciais.

Para CALLISTER (2016) o cimento Portland é dito ser um cimento hidráulico, em razão de sua dureza que se desenvolve por meio de reações químicas com a água. É

empregado principalmente em argamassas e em concreto, para aglutinar, em uma massa contínua, agregados de partículas inertes (areia e/ou brita).

Segundo MEHTA; MONTEIRO (2014), o cimento Portland é um aglomerante hidráulico que, ao reagir com água, forma compostos hidratados principalmente C-S-H e $\text{Ca}(\text{OH})_2$, responsáveis pela resistência do material.

A NBR 16697 (ABNT, 2018) define cimento Portland como um cimento hidráulico produzido pela moagem de clínquer, ao qual se adiciona, durante a fabricação, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio e adições minerais nos teores estabelecidos em norma.

3.4 ARGAMASSAS

Segundo a NBR 13281-1 (ABNT, 2023), argamassa é uma mistura homogênea de agregado(s) miúdo(s), aglomerante(s) inorgânico(s) e água, contendo ou não aditivos, com propriedades de aderência e endurecimento, podendo ser dosada em obra ou em instalação própria (argamassa industrializada).

CARDOSO (2009), apresenta um modelo microestrutural reológico de argamassas descrevendo-as de modo simplificado como suspensões bifásicas concentradas, compostas por fração “grossa” inerte (areia) com partículas entre $100\mu\text{m}$ e 2mm aproximadamente, e uma pasta reativa de água e finos, geralmente cimento e cal, figura 3.5. Neste modelo microestrutural reológico consideram-se as argamassas como produtos de características multifásicas, posto que possam ter em suas composições pozolanas, fíler (finos inertes), fibras (naturais e sintéticas) e teores consideráveis de ar incorporado. Deste modo, configura-se um comportamento reológico complexo além das diversas solicitações a que são submetidas nas etapas de preparo e aplicação.

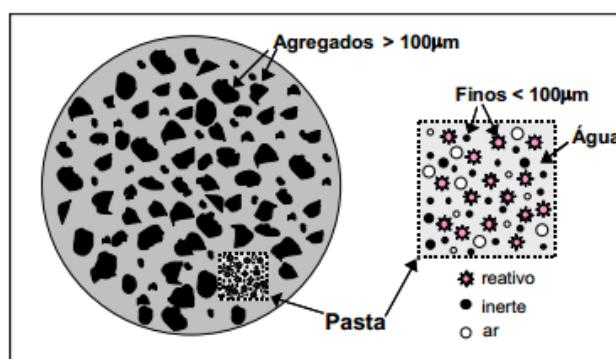


Figura 3.5: Modelo microestrutural das argamassas

Fonte: CARDOSO, 2009

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

As aplicações das argamassas estão diretamente ligadas à quantidade de aglomerantes empregados, a granulometria da areia e a quantidade de água adicionada. Recebendo diversos tipos de especificações conforme sua função ou constituição. As argamassas utilizadas para assentamento e revestimento de alvenarias e tetos apresentam características diferentes das exigidas nas argamassas dos concretos embora os materiais que dão origem às argamassas e aos concretos sejam equivalentes.

No concreto a função primária da argamassa é unir os componentes agindo como adesivo e selante enquanto as argamassas de assentamento e revestimento tem como objetivo desenvolver uma aderência resistente e durável entre os elementos da alvenaria (CINCOTTO et al., 1995).

3.4.1 Propriedades das Argamassas

3.4.1.1 Propriedades no Estado Fresco

São propriedades as quais se repercutirão principalmente no momento de sua aplicação no substrato (paredes ou outros): adesão; densidade; coesão e tixotropia; reologia (plasticidade, consistência, trabalhabilidade); retração; retenção de água (sucção, exsudação) (CARDOSO, 2009)

Adesão é a propriedade, segundo CINCOTTO et al. (1995), que “caracterizará o comportamento futuro do conjunto base/revestimento quanto ao decorrente desempenho da aderência”. A baixa tensão superficial é o que propicia a adesão física da argamassa ao substrato. Segundo CARASEK (2007) a adesão inicial, também denominada de “pegajosidade” é a capacidade de união inicial da argamassa no estado fresco a uma base. Ela está diretamente relacionada com as características reológicas da pasta aglomerante, especificamente a sua tensão superficial. A redução da tensão superficial da pasta favorece a “molhagem” do substrato, reduzindo o ângulo de contato entre as superfícies e implementação da adesão. Este fenômeno vem proporcionar um maior contato físico da pasta com a base, sendo a interação químico-física de ambos, essencial para uma boa adesão.

Sobre as propriedades reológicas, a consistência segundo CINCOTTO et al. (1995) é a propriedade pela qual a argamassa no estado fresco tende a resistir à deformação. Para estes autores a relação água/aglomerante, relação aglomerante/areia, natureza e qualidade do aglomerante, são fatores intervenientes.

A trabalhabilidade está relacionada à consistência, definida pelo *American Concrete Institute* (ACI 116R-00), como a propriedade de um concreto ou argamassa no estado fresco que determina a facilidade com que podem ser misturados, aplicados, consolidados e acabados a uma condição homogênea (“*workability*”) (ROCHA, 2011).

Coesão refere-se às forças físicas de atração existentes entre as partículas sólidas da argamassa no estado fresco e ligações químicas da pasta aglomerante. A influência da cal sobre consistência e trabalhabilidade provém das condições de coesão interna que ela proporciona, posto que diminua a tensão superficial da parte aglomerante e da adesão do agregado (CINCOTTO et al. 1995).

Tixotropia, segundo ROCHA (2011) apud Selmo, 1989 é a propriedade a partir da qual um material sofre transformações isotérmicas e reversíveis do estado sólido para o gel.

Segundo Maciel, Barros e Sabbatini (1998), retenção de água é a capacidade que a argamassa apresenta de reter a água de amassamento contra a sucção da base ou contra a evaporação. A retenção permite que as reações de endurecimento da argamassa se tornem mais gradativa, promovendo a adequada hidratação do cimento e consequente ganho de resistência. CINCOTTO et al. (1995) enumeram a superfície específica; maturação das argamassas de cal; natureza e qualidade da cal; relação cimento/cal (teor de cal) e a relação agregado/aglomerante como fatores intervenientes na retenção de água.

3.4.1.2 Propriedades no estado endurecido

Aderência; retração; permeabilidade/capilaridade; abrasão; elasticidade/ deformabilidade; resistência – biodeteriorização são propriedades que se repercutirão principalmente em seu desempenho pós-aplicação.

CARASEK (2007) informa que a aderência da argamassa endurecida ao substrato é um fenômeno essencialmente mecânico devido, basicamente, a penetração da pasta aglomerante ou da própria argamassa nos poros ou entre as rugosidades da base de aplicação. Outra parcela menos significativa que contribui para a aderência das argamassas aos substratos são as ligações secundárias do tipo Van der Waals. Quando a argamassa no estado plástico entra em contato com a superfície absorvente do substrato, parte da água de

amassamento, que contém em dissolução ou estado coloidal os componentes do aglomerante, penetra pelos poros e pelas cavidades do substrato. No interior dos poros ocorrem fenômenos de precipitação dos produtos de hidratação do cimento e da cal, e transcorrido algum tempo, esses precipitados intracapilares exercem ação de ancoragem da argamassa à base.

A resistência mecânica de um revestimento é a capacidade de resistir a esforços mecânicos de tração, compressão e cisalhamento, como esforços gerados por tensões nas superfícies verticais em função do tipo de uso da edificação e das solicitações produzidas por fenômenos térmicos e climáticos (BIANCHI, 1999).

As deformações podem ser de grande ou de pequena amplitude. O revestimento só tem a responsabilidade de absorver as deformações de pequena amplitude que ocorrem em função da ação da umidade ou da temperatura e não as de grande amplitude, provenientes de outros fatores CARASEK (2007). Elasticidade é a capacidade que alguns materiais apresentam de se deformarem quando submetidos a esforços, mas retornar as dimensões iniciais depois de cessado o carregamento ao qual foi submetido (CALLISTER, 2014). Caso contrário, podem ocorrer fissuras e consequentemente é afetada a aderência à base, a estanqueidade e a durabilidade da edificação.

Segundo FIORITO (2003), o endurecimento da argamassa é acompanhado por uma diminuição do volume em função da perda de água evaporável ocasionada pelas reações de hidratação. Mesmos após a secagem notamos variações dimensionais em função do grau higrométrico do ambiente, tal fenômeno é conhecido como “retração”.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 MATERIAIS UTILIZADOS

4.1.1 Resíduo do Agregado Sintético do Resíduo de Bauxita

Cedido pela empresa Hydro Alunorte S.A, com refinaria localizada no município de Barcarena-PA, interior do estado. Parte da alumina produzida é exportada e a outra parte é fornecida para a Albras, também localizada em Barcarena, e que produz lingotes de alumínio.

O processo de produção de alumina gera um resíduo, que é lavado, filtrado e armazenado nos depósitos de resíduos sólidos da refinaria. A Alunorte possui dois depósitos

de resíduos sólidos (DRS): DRS 1 e DRS 2. O Depósito de Resíduos Sólidos 1 iniciou suas operações em 1995, quando a refinaria foi inaugurada. O Depósito de Resíduos Sólidos 2 teve sua fase de teste e comissionamento iniciada em agosto de 2016, Figura 4.1. Os dispositivos não são classificados como barragens, de acordo com a legislação brasileira. Hydro Alunorte (2024).



Figura 4.1: (a) Vista de satélite da Hydro Alunorte S.A. (b) Vista de satélite com identificação de cada área (1) área da refinaria, (2) depósito de DR 1, (3) depósito de DR 2, (4) descarte de água licenciado para Rio Pará e (5) estação de tratamento de efluentes industriais.

Fonte: Google Maps (2025)

O Resíduo de Agregado Sintético com Resíduo de Bauxita – RASRB utilizado para este trabalho será o mesmo utilizado no projeto de estudo e desenvolvimento dos agregados sintéticos proveniente de resíduo de bauxita do convenio entre a Hydro Alunorte e a UFPA – Universidade Federal do Pará, com as características químicas conforme a tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Composição química do RB utilizado na produção dos agregados sintéticos

Composto	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	Na ₂ O	CaO	LOI ¹
%	21,27	17,72	34,31	6,89	9,25	1,22	8,11

¹Perda ao Fogo

Fonte: Farias, M. M. (Tese Doutorado, 2025).

Os Resíduos de Bauxita – RB utilizado nesta pesquisa foram produzidos no laboratório de Engenharia química (LEQ), com matérias primas, resíduo de bauxita, argila e sílica em diferentes proporções conforme a Tabela 4.2 e na Figura 4.2 apresenta amostra o Agregado Sintético nas proporções analisadas.

Tabela 4.2 - Composição, massa específica, temperatura e tempo de sinterização das amostras de agregado

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

AGS-70	75 – 70	20 – 25	5	< 1,5	1050 - 1250	3
--------	---------	---------	---	-------	-------------	---

Fonte: Farias, M. M. (Tese Doutorado, 2025).

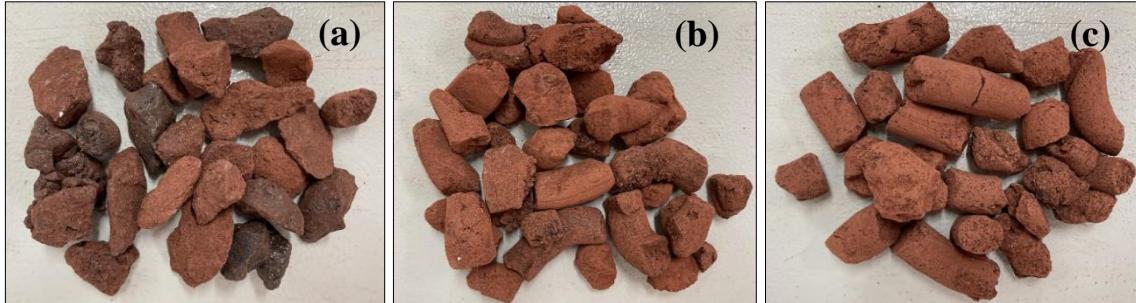


Figura 4.2: (a) AGS-70, (b) AGS-80 e (c) AGS-90.

Fonte: Ribeiro, 2022

4.1.2 CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO DO AGREGADO SINTÉTICO

A composição química do resíduo de bauxita foi fornecida pela HYDRO Alunorte e está apresentada na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Composição química do resíduo de bauxita

Composição	(%)
Al ₂ O ₃	21,27
SiO ₂	17,72
Fe ₂ O ₃	34,31
TiO ₂	6,89
Na ₂ O	9,25
CaO	1,22
LOI	8,11

Fonte: Farias, M. M. (Tese Doutorado, 2025).

Verifica-se na Tabela 4.3 que o resíduo de bauxita apresenta como principais componentes os óxidos de ferro, 34,31%, alumínio, 21,27%, e silício, 17,72%. A quantidade desses óxidos pode influenciar nas transformações de fases durante a etapa de sinterização do agregado, uma vez que o processo de formação da mulita pode ocorrer em temperaturas menores que 1250°C devido à presença de impurezas, como é o caso do óxido de ferro presente no resíduo (MÖRTEL e BOUBACAR, 1977; SCHÜLLER, 1979).

Os níveis de óxidos nos agregados variam de acordo com o resíduo de bauxita utilizada, devido à composição química do resíduo variar de região para região (SANTOS, 2019). A predominância de SiO₂ e Al₂O₃ na composição do agregado sintético influência

diretamente na resistência mecânica, contribuindo para que ocorra a reação de estado sólido formando a fase vítreia e mulita (REIS, 2014).

Na Tabela 4.4 são apresentadas as composições químicas em termos de óxidos presentes nos agregados AGS70, AGS80 e AGS90, cujos resultados estão compatíveis com os apresentados por REIS (2014). As pequenas diferenças em alguns compostos podem estar relacionadas à quantidade de resíduo de bauxita utilizada na composição do agregado ou mesmo com a composição química da bauxita que pode variar dependendo do local de extração.

Tabela 4.4 - Resultados de FRX apresentados termos de óxidos

Composto	AGS70	AGS80	AGS90
	Composição (%)		
Na ₂ O	7,110	7,680	9,150
MgO	0,578	0,559	0,669
Al ₂ O ₃	14,500	16,900	20,700
SiO ₂	39,200	29,300	21,300
SO ₃	0,224	0,201	0,228
K ₂ O	0,299	0,323	0,333
CaO	1,120	1,020	1,110
TiO ₂	4,530	5,220	5,400
MnO	0,148	0,104	0,109
Fe ₂ O ₃	30,600	0,153	0,152
ZrO ₂	0,975	37,000	39,100
Pr ₆ O ₁₁	0,118	1,050	0,992
Nd ₂ O ₃	0,240	0,106	0,147

Fonte: Farias, M. M. (Tese Doutorado, 2025).

Após esta fase os agregados sintéticos foram caracterizados conforme apresentado na Tabela 4.5 e respectivamente nas Figuras 4.3, 4.4 e 4.5.

Tabela 4.5 – Caracterização dos agregados graúdo sintéticos.

Material	Ensaio	Normatização
Agregado graúdo sintético	Massa específica	ABNT 16917 (2021)
	Absorção de água	ABNT 16917 (2021)
	Granulometria	ABNT NBR 17054 (2022)
	Índice de forma	ABNT NBR 7809 (2019)

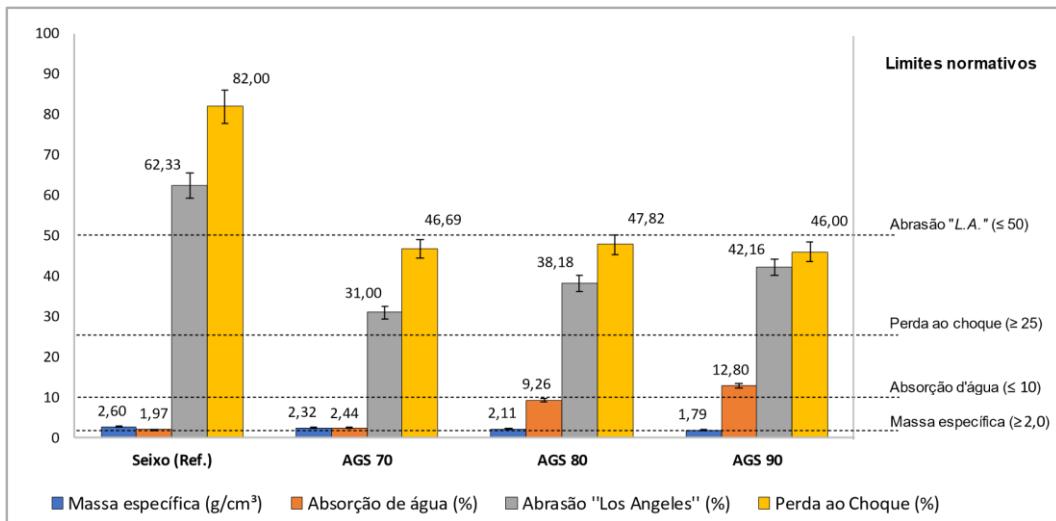


Figura 4.3: Resumo da caracterização física do agregado graúdo natural e sintético.

Fonte: Machado, 2022

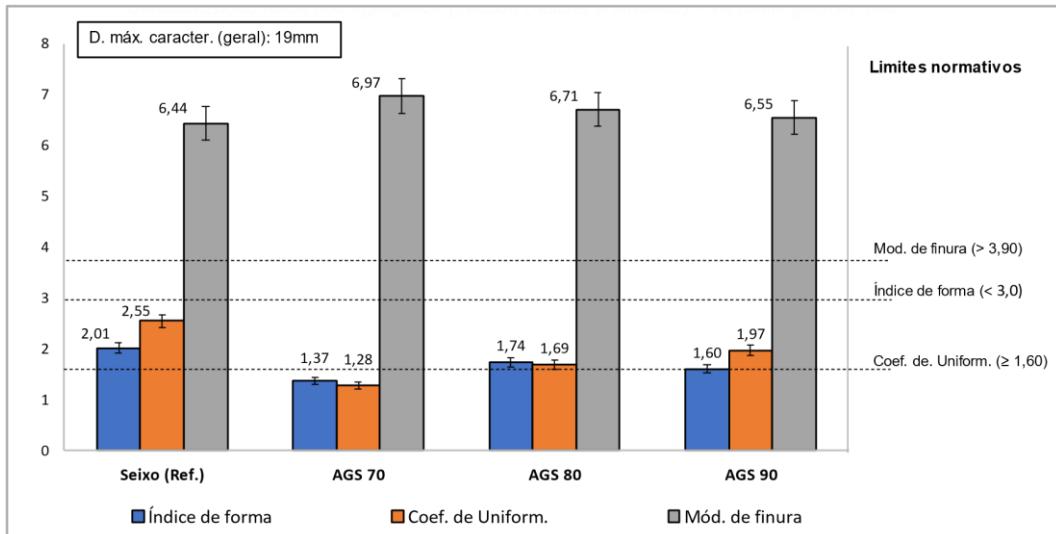


Figura 4.4: Fatores geométricos dos agregados graúdos naturais e sintéticos.

Fonte: Machado, 2022

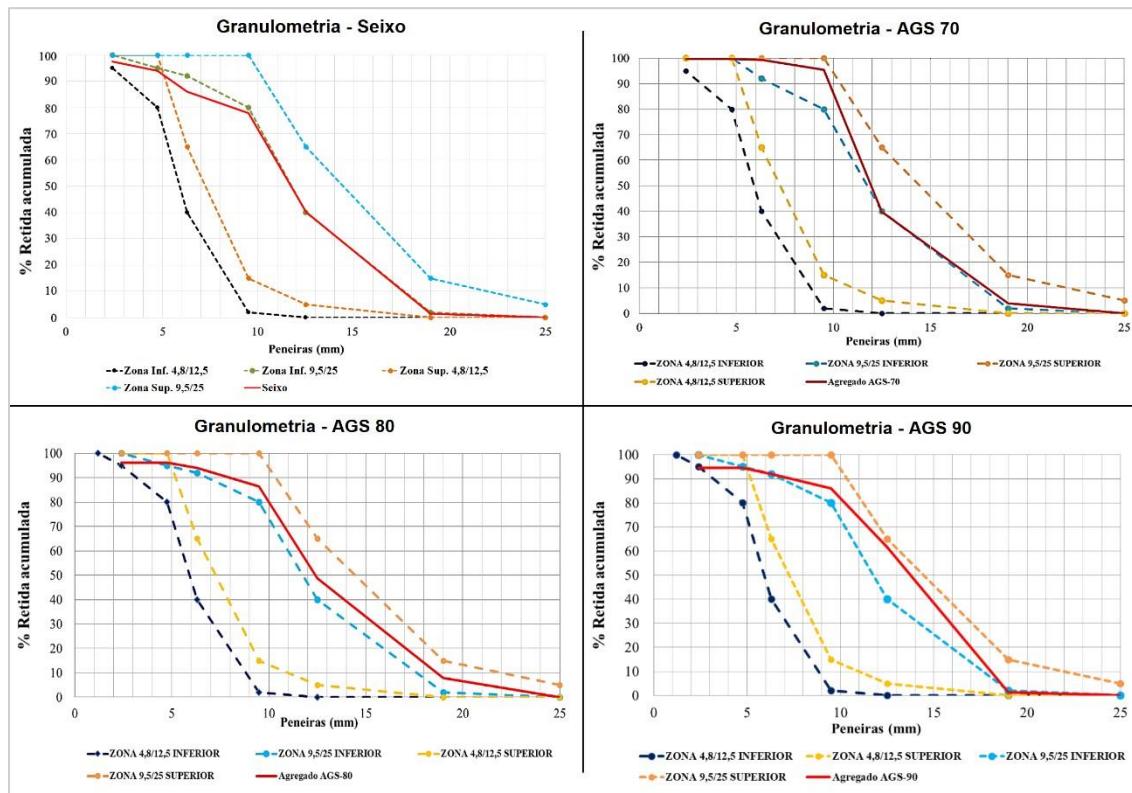


Figura 4.5: Curvas granulométricas dos agregados graúdos (natural e sintéticos)

Fonte: Machado, 2022

4.1.3 Areia Normatizada para produção da Argamassa

Será empregada nesta pesquisa à composição das argamassas areia normal brasileira obedecendo à norma NBR 7214 (ABNT 2015), adquirida no Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), figura 4.6.

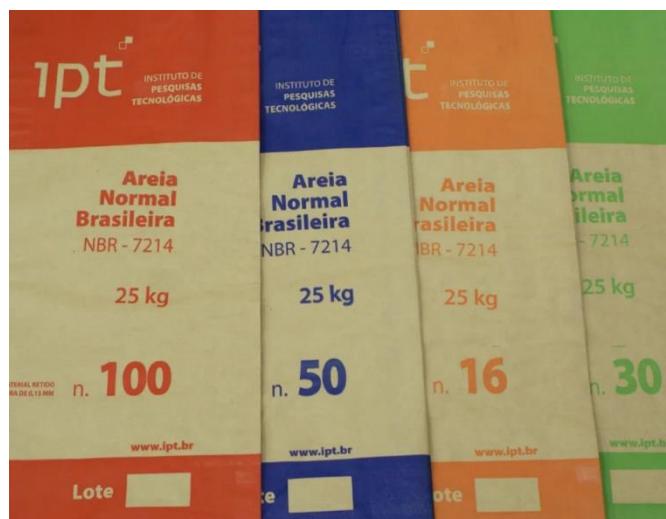


Figura 4.6: Areia Normal utilizada nos ensaios

Fonte: Acessado: <https://ipt.br/2010/07/19/novo-preco-da-areia/>, em janeiro 2025

4.1.4 Gesso

Empregado usualmente como sinônimo de “gipsita” ou “gipso”, o gesso indica o produto industrial calcinado a 125-180°C, quando a gipsita é esmagada e calcinada ela perde água formando o gesso. A gipsita, é o mineral em seu estado natural, em sua composição química é um sulfato de cálcio di-hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), a densidade relativa é 2,32, não sendo um mineral de elevado peso específico.

Dada as principais características, o gesso foi abastado pela mesma empresa que forneceu o clínquer, para sua utilização foi levado à gipsita ao laboratório OPA – Oficina de Preparação de Amostra, no Instituto de Geologia da Universidade Federal do Pará. Após a britagem (diminuição do tamanho) do material, o gesso foi levado ao Instituto Federal do Pará, campus Belém, onde no moinho de bolas metálicas da marca MATOLI, modelo 070M016, foi empregada a mesma proporção de bolas para moagem do clínquer, divididas, também na mesma razão. Sendo assim, avaliou-se sua distribuição granulométrica por granulometria a laser, em tempos de moagem diferentes, pois não foi conseguido realizar o peneiramento do material, como apresentado na figura 4.7.

Como mostrado na figura 4.8, utilizamos o tempo de moagem de 30 minutos, tempo necessário para obtenção da granulometria para utilização na mistura do clínquer.

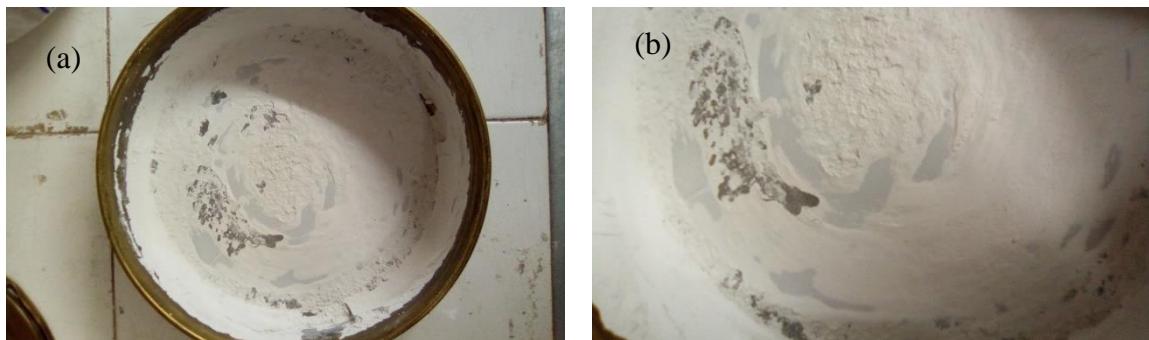


Figura 4.7: (a) Gesso passante na 0,075mm, (b) Detalhe do material fino, aglomerado, sem condições de peneiramento.

Fonte: Autora

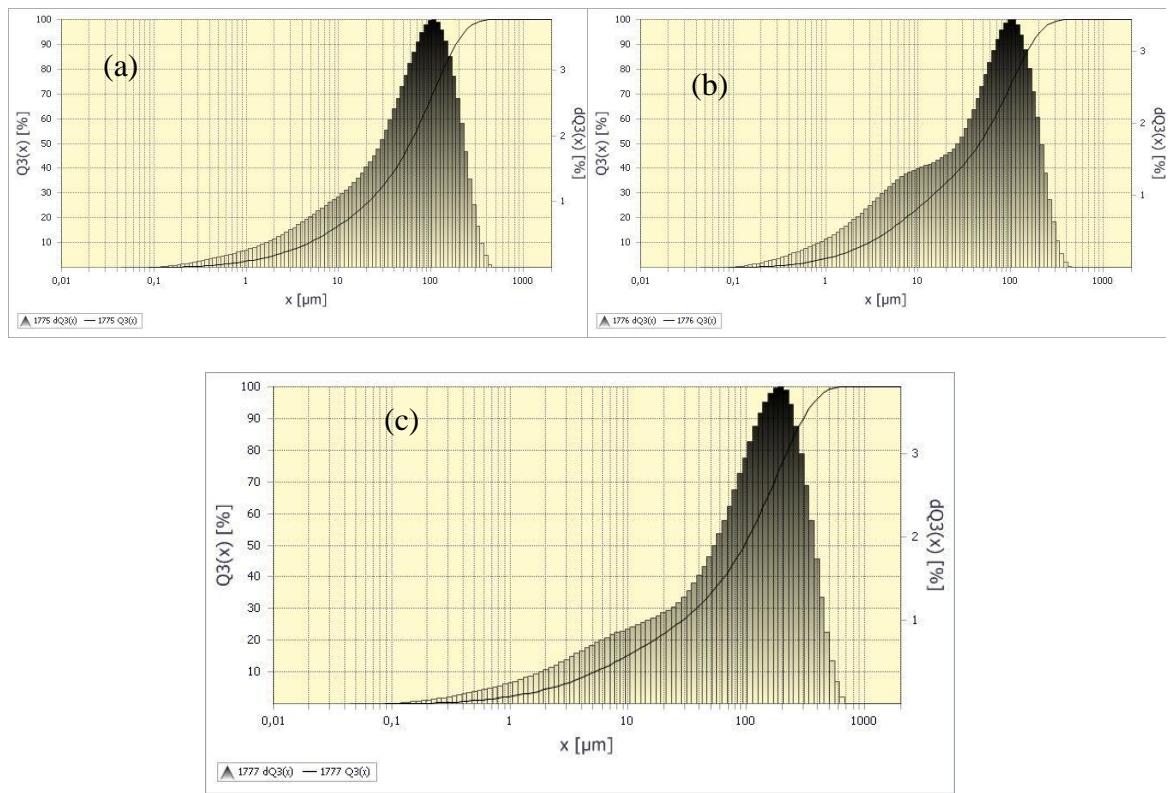


Figura 4.8: Granulometria a laser com seus respectivos tempos de moagem (a) 30 minutos, (b) 60 minutos, (c) 90 minutos

Fonte: Autora

4.1.5 Água

A água utilizada para moldagem dos corpos-de-prova e cura deles no presente estudo, é proveniente do sistema de abastecimento da cidade de Belém-Pará. O abastecimento hídrico da universidade oferece água potável com temperatura de 28°C e pH 6,0, portanto válida para produção de argamassas.

4.1.6 Clínquer

Os clínqueres são uma mistura de calcário, argila, minério de ferro e alumina que é levada a um forno rotativo que alcança a temperatura de 1450 a 1550°C transformando-se em nódulos de 5 a 25 mm de diâmetro de material sinterizado, a principal matéria prima para a fabricação do cimento. Em forma de pó, depois de moído, tem a característica de reagir quimicamente com a ação da água, endurecendo e adquirindo elevada resistência mecânica. Dessa forma, o clínquer é o principal componente do cimento Portland (METHA; MONTEIRO 2008).

O clínquer foi doado pela empresa CIBRASA – Cimentos do Brasil S/A, oriunda da cidade de Capanema no estado do Pará, no Nordeste Paraense, conforme ilustrado na figura

4.9, com características químicas conforme dados fornecidos pela própria empresa, apresentados na tabela 4.6.

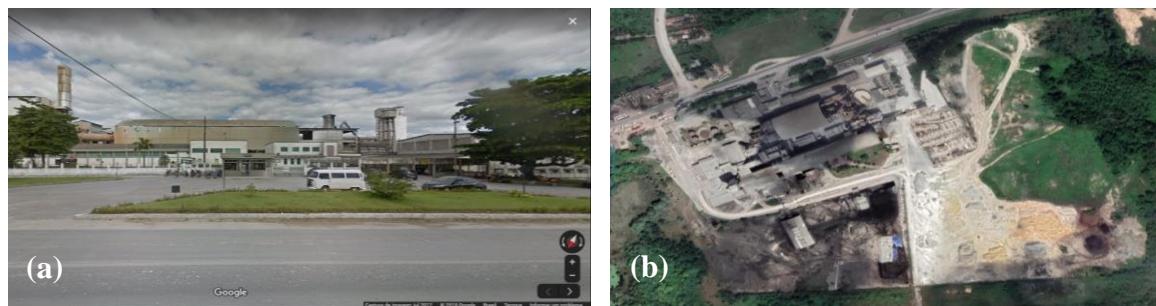


Figura 4.9: (a) Entrada da empresa CIBRASA (b) Planta Industrial da CIBRASA

Fonte: Google Earth, imagens 2025.

Tabela 4.6: Composição química do Clínquer

Densidade Aparente	PERDA AO FOGO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	RESÍDUO INSOLÚVEL	CaO LIVRE	F.S.C.
g/L	%	%	%	%	%	%	%	%	%	-
1.445	0,47	20,1	4,75	3,9	66,58	3,77	0,58	0,2	1,67	101,02

M.S.	M.A.	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	CaSO ₄	FASE LÍQUIDA
-	-	%	%	%	%	%	%
2,3	1,22	73,84	1,35	5,99	11,87	0,99	27,47

Fonte: CIBRASA – Cimentos do Brasil S/A

A composição química do clínquer apresentou C₃S: 73,84%, C₂S: 1,35%, C₃A: 5,99%, C₄AF: 11,87%, característica de um cimento com endurecimento rápido, de alta resistência inicial e alto calor de hidratação.

No laboratório de Mineração do IFPA, campus Belém, o clínquer foi passado por um processo de moagem a seco no moinho de bolas metálicas da marca MATOLI, modelo 070M016, esse tipo de moagem é largamente utilizado para a redução do tamanho das partículas de um material, pois a granulometria do clínquer é o fator mais importante quando adicionada a mistura com gesso.

A realização do processo de moagem foi executada com base na aplicação feita por Pouey (2006), onde foi empregada a proporção de 5 kg de bolas para 1 kg do material a ser moído. A quantidade de bolas foi dividida em 2/3 de bolas pequenas e 1/3 de bolas grandes, visto que as bolas menores possuem maior potencial de moagem.

O tempo de moagem foram estabelecidos em 3 horas (180 minutos), com esse tempo conseguiu-se uma eficiência de moagem de 85% suficiente para obter a granulometria desejada, isto é, diâmetro igual ou menor que ao do cimento (POUEY, 2006), passante na peneira 0,075mm. Em 4 horas de moagem, a eficiência passou dos 90%, mas não fora utilizado neste trabalho, pois se utilizou o tempo para o moinho esfriar e assim não comprometer o equipamento.

As características físicas analisadas depois do processo de moagem foram à distribuição granulométrica, ensaiadas no Instituto de Geologia da UFPA no equipamento ANALYSETTE 22 MicroTec plus, da amostra passante na peneira 0,075mm, conforme apresentado na figura 4.10 e massa específica com valor de 3,17kg/dm³, ensaios realizados conforme a NBR 16605 (ABNT, 2017), no laboratório de engenharia civil da UFPA.

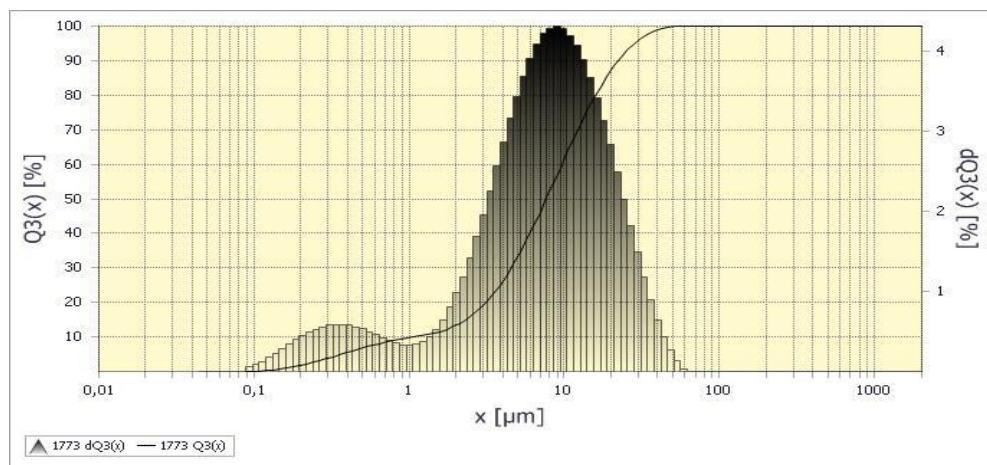


Figura 4.10: Distribuição granulométrica do clínquer

Fonte: Autora

4.2 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

O estudo para análise da viabilidade técnica do agregado sintético, com resíduo de bauxita, para uso em substituição do cimento Portland foi planejado para execução em três etapas, conforme Figura 4.11 e descrição abaixo.

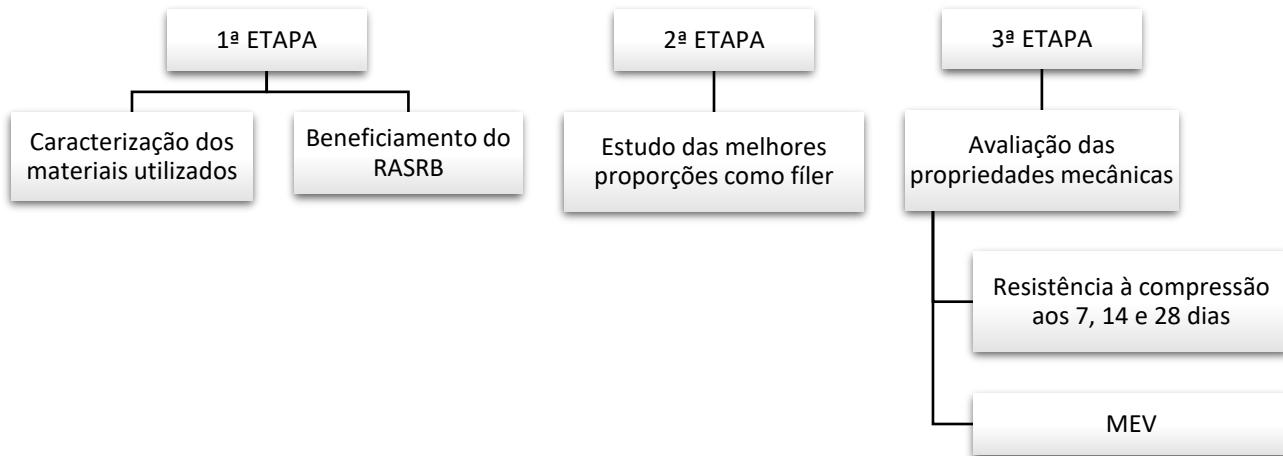


Figura 4.11: Estrutura do planejamento experimental

Fonte: Autora

- 1ª ETAPA: Caracterização dos materiais utilizados e do resíduo e beneficiamento do Resíduo do Agregado Sintético com Resíduo de Bauxita – RASRB;
- 2ª ETAPA: Estudo das melhores proporções como filer;
- 3ª ETAPA: Avaliar as propriedades mecânicas: resistência à compressão aos 7, 14 e 28 dias, e MEV das argamassas de cimento Portland com adição de Resíduo de Bauxita calcinada.

4.3 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO EM ARGAMASSAS

4.3.1 Desenvolvimento das argamassas

As argamassas desenvolvidas utilizando areia normal do IPT de acordo NBR 7214 (ABNT, 2015) e executadas no Laboratório de Engenharia Civil (LEC) da UFPA – Universidade Federal do Pará. Onde:

- Para os corpos de prova foram elaborados com traço constante 1:3 (cimento: areia) e com relação água/cimento 0,48
- Substituição do resíduo como filer nos percentuais de 11, 18 e 25%

Para as argamassas foram utilizadas as seguintes quantidades de corpos de prova apresentadas na tabela 4.7.

Tabela 4.7: Procedimento experimental

Amostra	% de Substituição	Resistência à compressão		
		3 dias	7 dias	28 dias
CP - REF	0	5	5	5
A.11%	11%	5	5	5
A.18%	18%	5	5	5
A.25%	25%	5	5	5
Total		20	20	20

A = Argamassa

A NBR 16697 (ABNT, 2018), apresenta Composição do Cimento Portland Composto (% em massa) com o intervalo 11 – 25% para material carbonático para Cimento Portland CPII – F, o que indicou as 03 (três) proporções adotadas para este trabalho, adotando assim, segundo a NBR, a proporção de 11% como valor mínimo, a proporção de 25% como valor máximo e a proporção de 18% como valor médio entre as duas proporções de norma.

4.3.2 Ensaio de resistência à compressão

Os ensaios de resistência à compressão de corpos de prova foram baseados nas recomendações das normas NBR 7215 (ABNT, 2025), com ruptura dos corpos de prova à compressão aos 7 e 28 dias, realizados no Laboratório de Engenharia Civil (LEC) da UFPA – Universidade Federal do Pará.

4.3.3 Microscópio eletrônico de varredura (MEV)

A aplicação de técnicas de microscopia eletrônica de varredura torna possível analisar a estrutura superficial de uma dada amostra, assim como a estrutura dos materiais constituintes de argamassas, até uma escala micrométrica auxiliando na explicação do comportamento mecânico e interpretação dos resultados.

As análises através do MEV - Microscópio Eletrônico de Varredura foram realizadas através de amostras retiradas de fragmentos dos corpos de prova oriundos do ensaio de resistência à compressão nos Laboratório de Análises do Instituto de Geociências da UFPA

– Universidade Federal do Pará e, no Laboratório de Mineração do IFPA – Instituto Federal do Pará.

As análises do MEV (microscópio eletrônico de varredura) permitiram observar a morfologia dos materiais utilizados nos ensaios experimentais da produção da argamassa, além de uma identificação dos componentes químicos presentes nas amostras.

Primeiramente realizou-se uma varredura num nível de observação para visualizar a imagem como um todo. Seguidamente, a varredura deu-se através do aumento do grau de observação.

As imagens apresentadas, figura 4.12 e 4.13, foram realizadas no equipamento Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), modelo VEGA 3 LMU da TESCAN, no Laboratório de Mineração do IFPA – Instituto Federal do Pará, campus Belém.

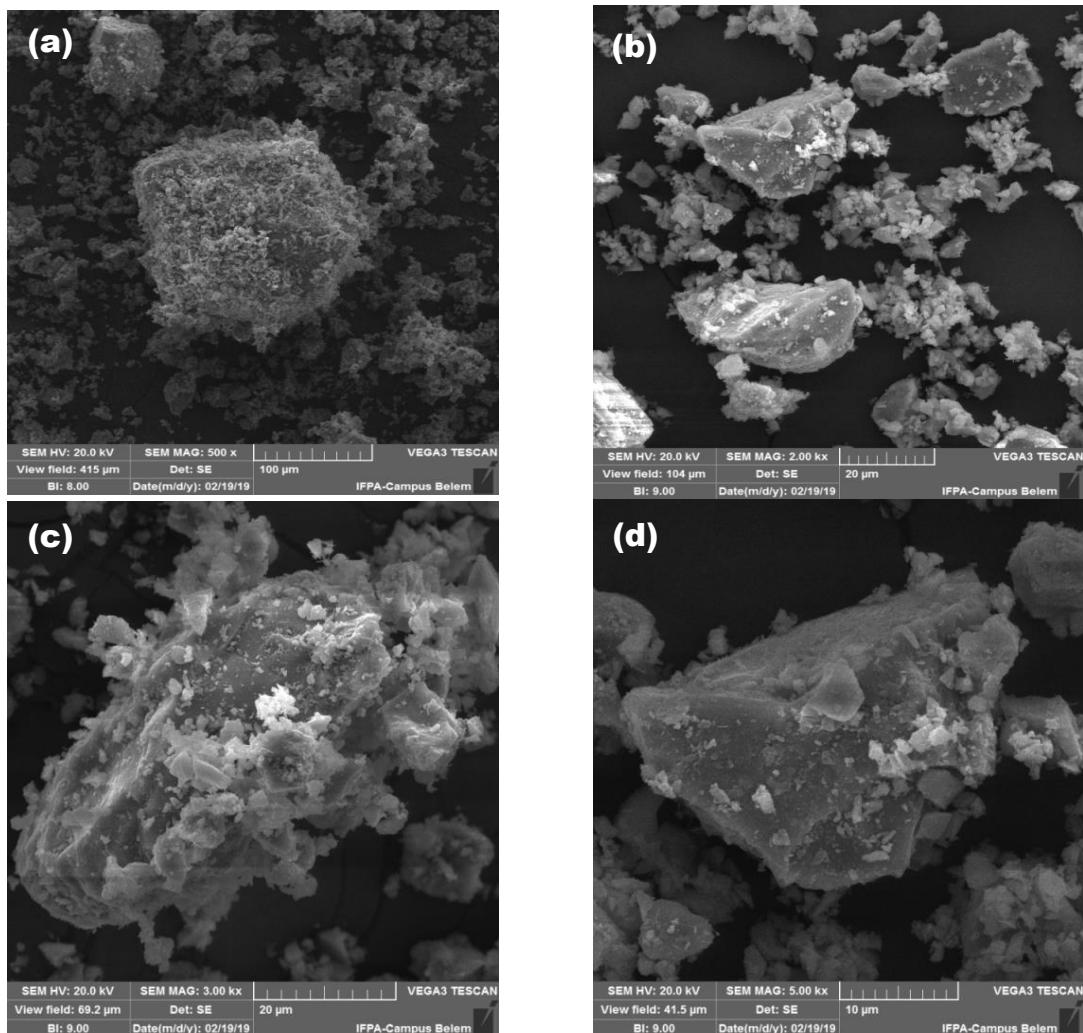


Figura 4.12: (a) Cristais de alita e belita no interior 20kV/ 500x (b) seleção de cristais de alita e belita 20kV/2kx, (c) Detalhes do cristal de alita com uma cavidade, provocado pela bola do moinho (d) Detalhes da belita

Fonte: Autora

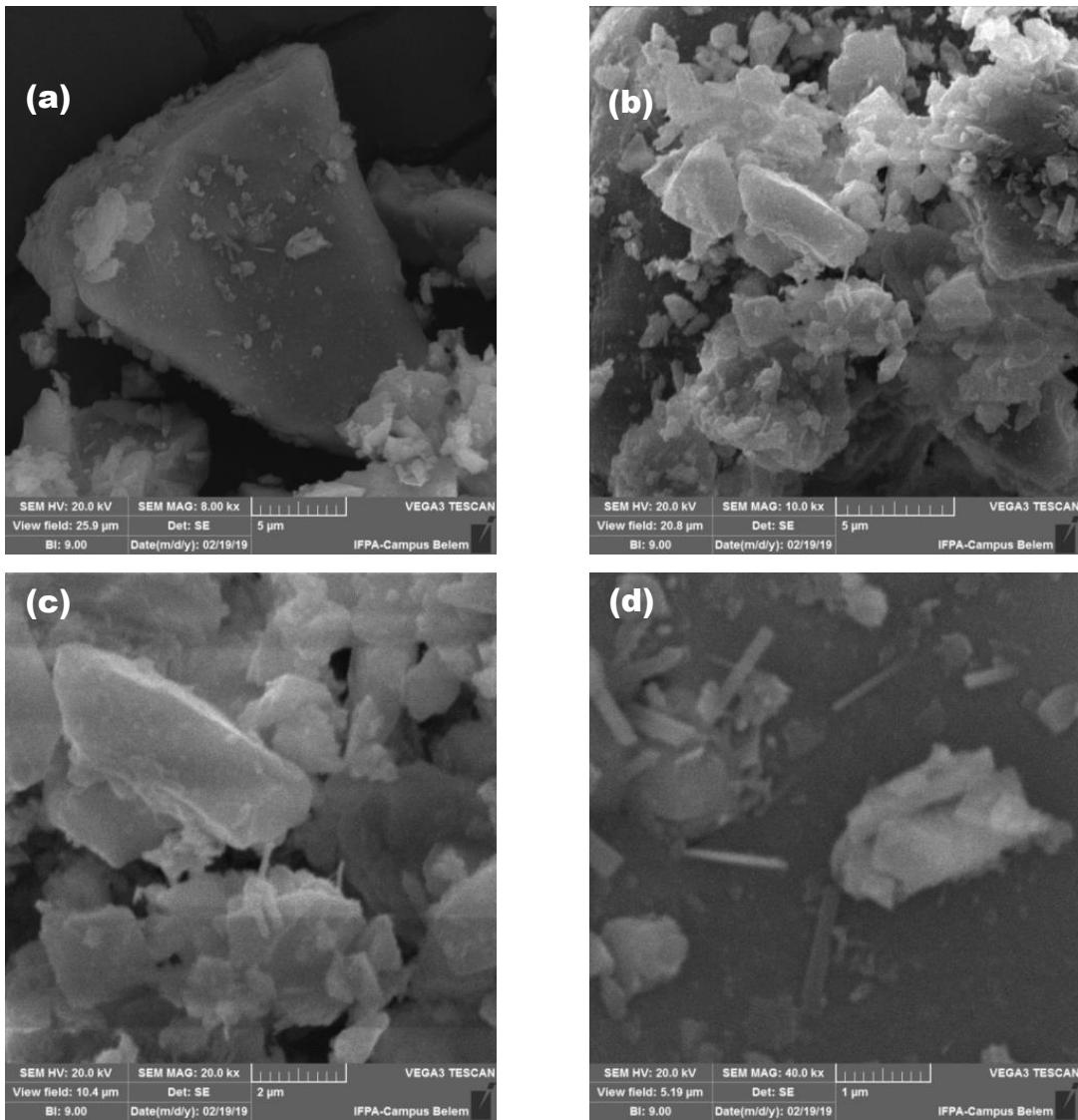


Figura 4.13: (a) Cristal de alita 20kV/ 8kx (b) seleção de cristais de belita 20kV/20kx, (c) Detalhes do cristal de belita, (d) fase intersticial 40kx

Fonte: Autora

Para especificar os elementos químicos constituintes utilizou-se do recurso de spectrometria de energia dispersiva de raio x (EDS), pelo SISTEMA DE MICRO-ANÁLISE - EDS, modelo AZTec Energy X-Act, resolução 129eV, marca Oxford, também, no laboratório do Instituto Federal do Pará, campus Belém.

Análise feita de EDS, com resolução de 2kx apresentada na figura 4.14, com sua composição química na figura 4.15.

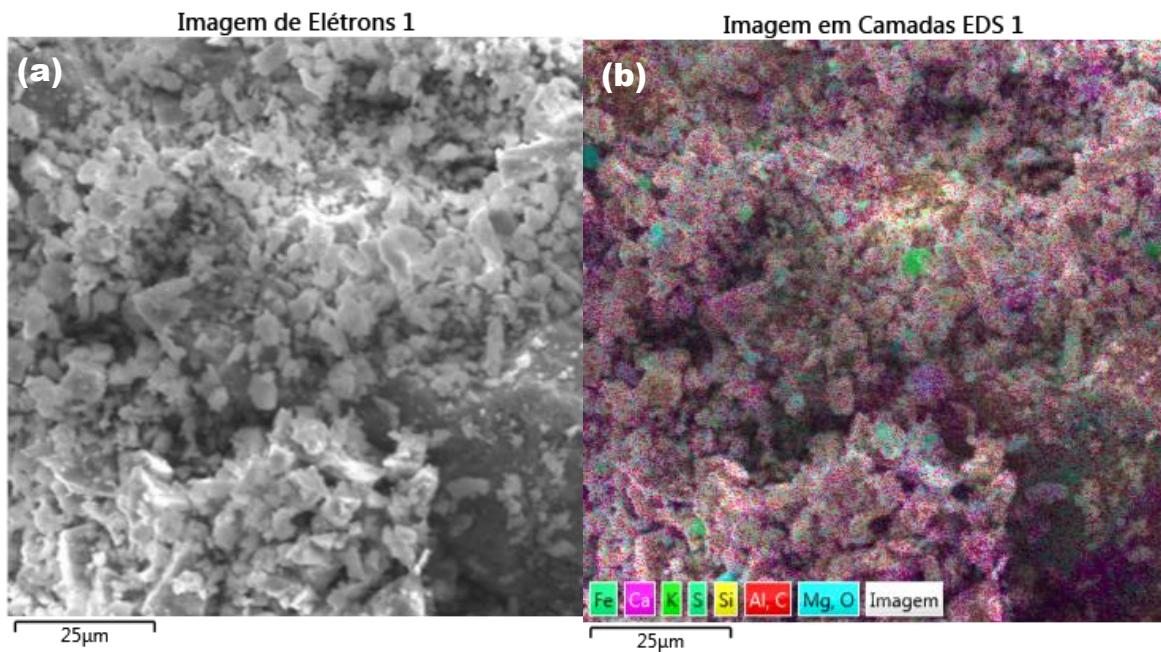


Figura 4.14: (a) imagens de Elétrons do clínquer, (b) Imagens EDS em camadas do clínquer

Fonte: Autora

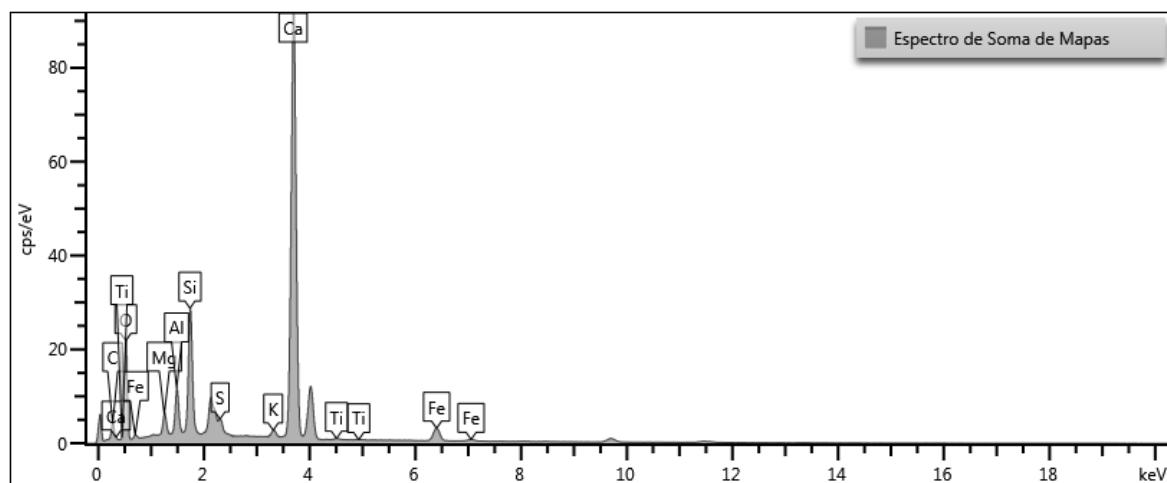


Figura 4.15: Espectro do clínquer, da imagem EDS apresentado na figura 4.3

Fonte: Autora

O espectro identificou uma concentração de Cálcio, Silício em maior quantidade e Ferro, Alumínio e Magnésio em menor quantidade, além de outros elementos químicos que se apresentam para o fechamento dos 100% da amostra.

5. RESULTADOS E DISCURSSÕES

Para avaliar as proporções e o desempenho do agregado, foram produzidos corpos de prova de argamassa com diferentes porcentagens de substituição. Os ensaios de resistência à compressão demonstraram que as misturas contendo o resíduo de bauxita mantiveram semelhantes com o nível de desempenho da mistura de referência, especialmente na dosagem de substituição com RASRB 70.

Na figura 5.1, o resíduo de agregado sintético do resíduo de bauxita sendo moído e peneirado. Nas figuras 5.2, 5.3 e 5.4 são corpos-de-prova desmoldados nas proporções de 11%, 18% e 25%, respectivamente, conforme a tabela 5.1, que apresenta o quantitativo de material utilizados para confecção dos corpos-de-prova nas proporções de 11%, 18% e 25% do RASRB 70.

Tabela 5.1: Quantitativo de material utilizado com RASRB 70

QUANTITATIVO DE MATERIAL PARA ARGAMASSA COM RASRB 70												
FÍLTER	ARGAMASSA	CLÍNQUER (g)	AGS (g)	GESSO (g)	AGLOMERANTE (g)	AREIA 16 (g)	AREIA 30 (g)	AREIA 50 (g)	AREIA 100 (g)	ÁGUA (g)	a/c	
0%	100%	592,80	0,00	31,20	624,00	468,00	468,00	468,00	468,00	300,00	0,48	
11%	89%	527,59	89,10	31,20	647,89	468,00	468,00	468,00	468,00	300,00	0,48	
18%	82%	486,10	145,80	31,20	663,09	468,00	468,00	468,00	468,00	300,00	0,48	
25%	75%	444,60	202,50	31,20	678,30	468,00	468,00	468,00	468,00	300,00	0,48	

Fonte: Autora

Para montagem da tabela 5.1, foram obtidas às massas específicas do cimento e do RASRB 70. Na quantidade da RASRB 70 foi acrescida valores para obtenção do mesmo volume de clínquer subtraído, mantendo a relação volumétrica, sendo multiplicado pelo fator de compensação de 1,3664 para RASRB 70.

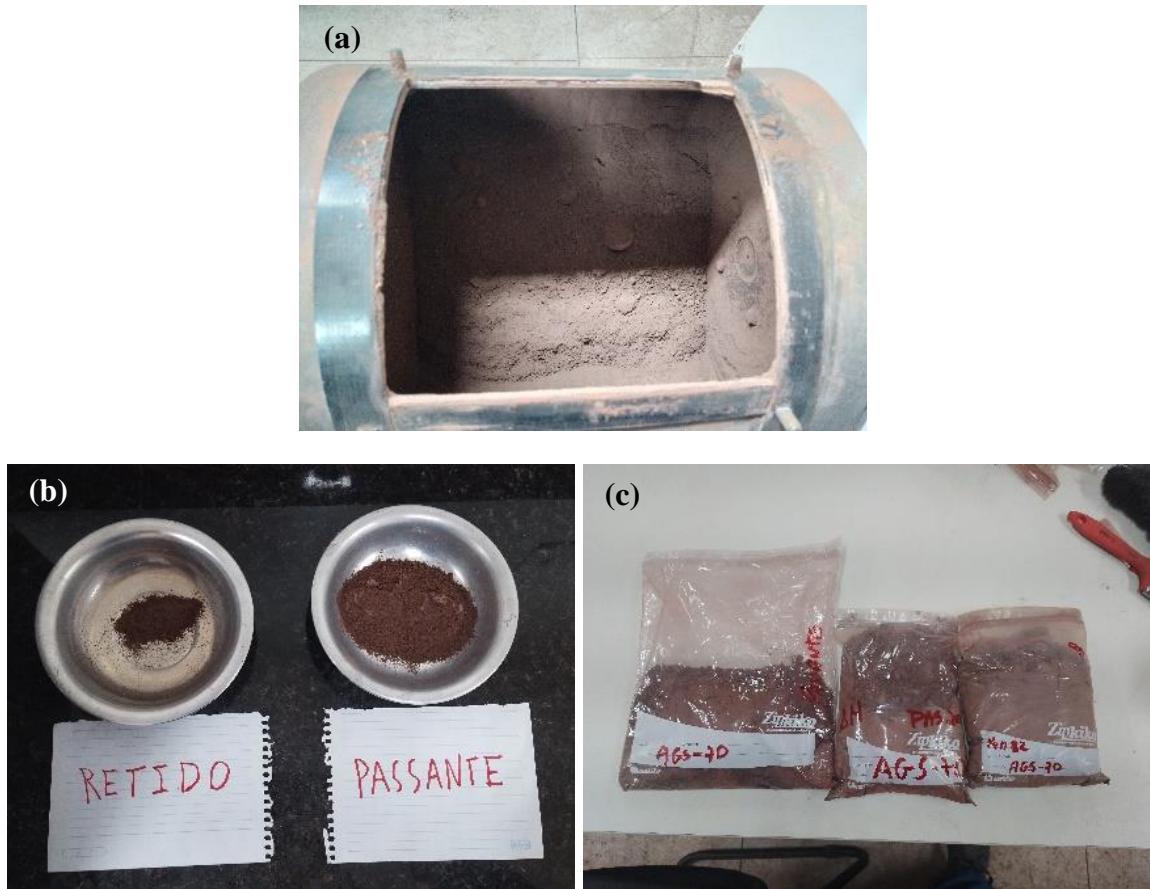
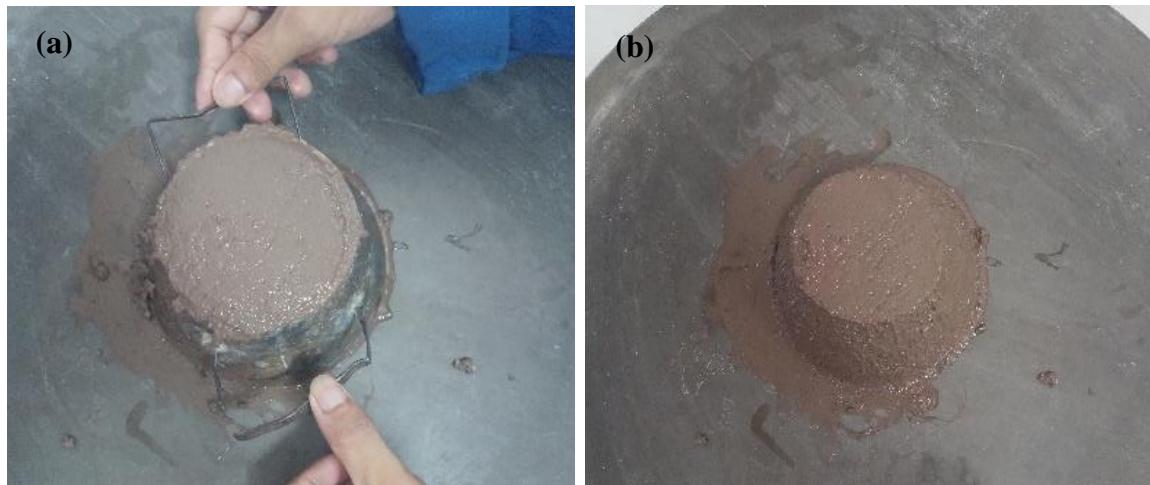


Figura 5.1: (a) RASRB 70 moído no moinho de bolas (b) Amostra de resíduo passante e retido na peneira #200 (c) amostra de todas as proporções de resíduo passante na peneira #200.

Fonte: Autora



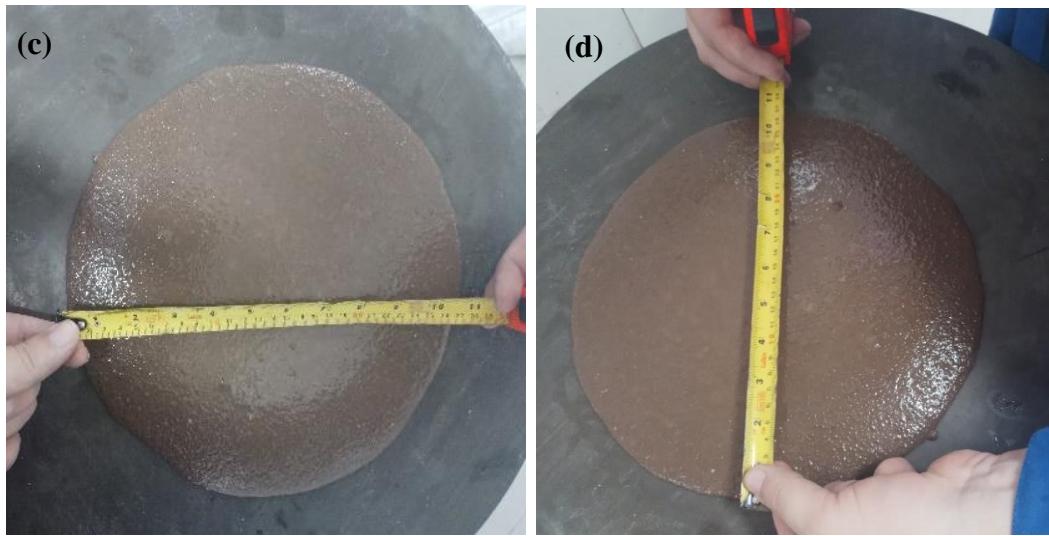


Figura 5.2: (a) e (b) moldagem do ensaio de determinação do índice de consistência RASRB 70 – 11% (c) e (d) espalhamento da pasta com RASRB 70 – 11% com medida de diâmetros.

Fonte: Autora

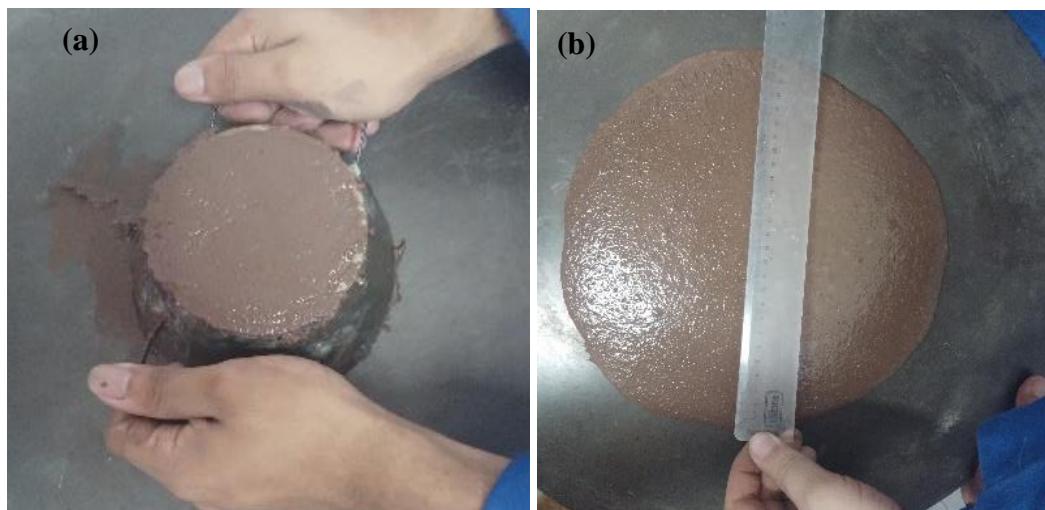
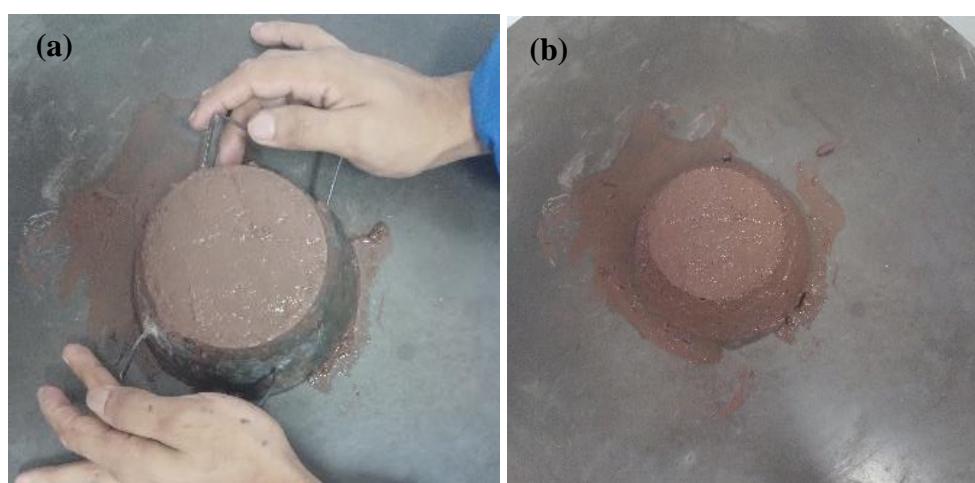


Figura 5.3: (a) moldagem do ensaio de determinação do índice de consistência RASRB 70 – 18% (b) espalhamento da pasta com RASRB 70 – 18% com medida de diâmetro.

Fonte: Autora



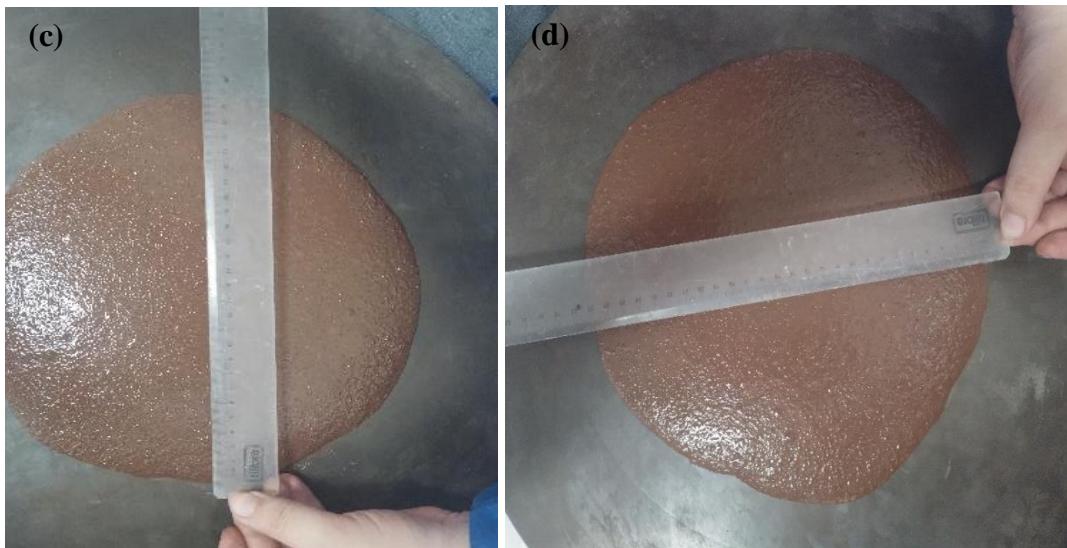


Figura 5.4: (a) e (b) moldagem do ensaio de determinação do índice de consistência RASRB 70 – 25% (c) e (d) espalhamento da pasta com RASRB 70 – 25% com medida de diâmetros.

Fonte: Autora

Na figura 5.5, o resíduo de agregado sintético do resíduo de bauxita sendo moído e peneirado. Nas figuras 5.6, 5.7 e 5.8 são corpos-de-prova desmoldados nas proporções de 11%, 18% e 25%, respectivamente, conforme a tabela 5.2, que apresenta o quantitativo de material utilizados para confecção dos corpos-de-prova nas proporções de 11%, 18% e 25% do RASRB 80.

Tabela 5.2: Quantitativo de material utilizado com RASRB 80.

QUANTITATIVO DE MATERIAL PARA ARGAMASSA COM RASRB 80											
FÍLTER	ARGAMASSA	CLÍNQUER (g)	AGS (g)	GESSO (g)	AGLOMERANTE (g)	AREIA 16 (g)	AREIA 30 (g)	AREIA 50 (g)	AREIA 100 (g)	ÁGUA (g)	a/c
0%	100%	592,80	0,00	31,20	624,00	468,00	468,00	468,00	468,00	300,00	0,48
11%	89%	527,59	97,97	31,20	656,76	468,00	468,00	468,00	468,00	300,00	0,48
18%	82%	486,10	160,31	31,20	677,60	468,00	468,00	468,00	468,00	300,00	0,48
25%	75%	444,60	222,65	31,20	698,45	468,00	468,00	468,00	468,00	300,00	0,48

Fonte: Autora

Para montagem da tabela 5.2, foram obtidas às massas específicas do cimento e do RASRB 80. Na quantidade da RASRB 80 foi acrescida valores para obtenção do mesmo

volume de clínquer subtraído, mantendo a relação volumétrica, sendo multiplicado pelo fator de compensação de 1,5023 para RASRB 80.

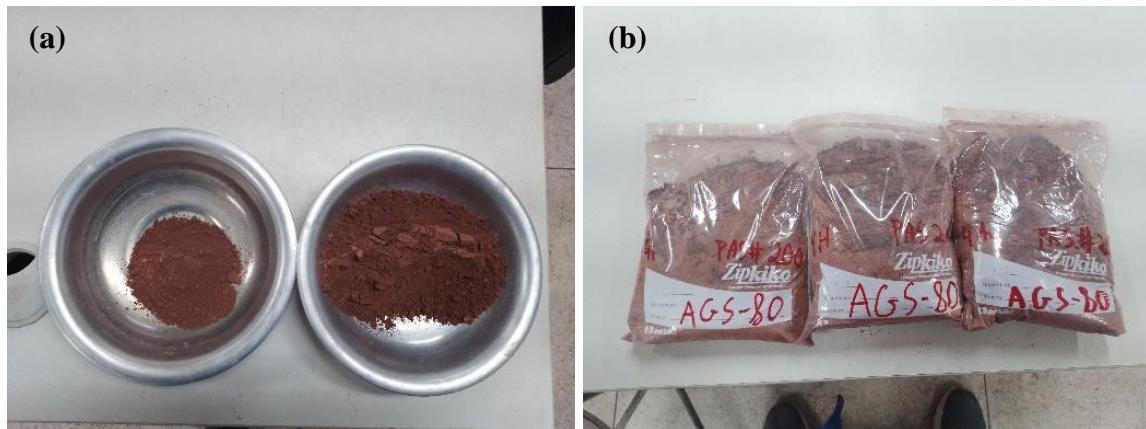


Figura 5.5: (a) Amostra de resíduo RASRB 80, passante e retido, na peneira #200 (b) amostra de todas as proporções de resíduo passante na peneira #200.

Fonte: Autora

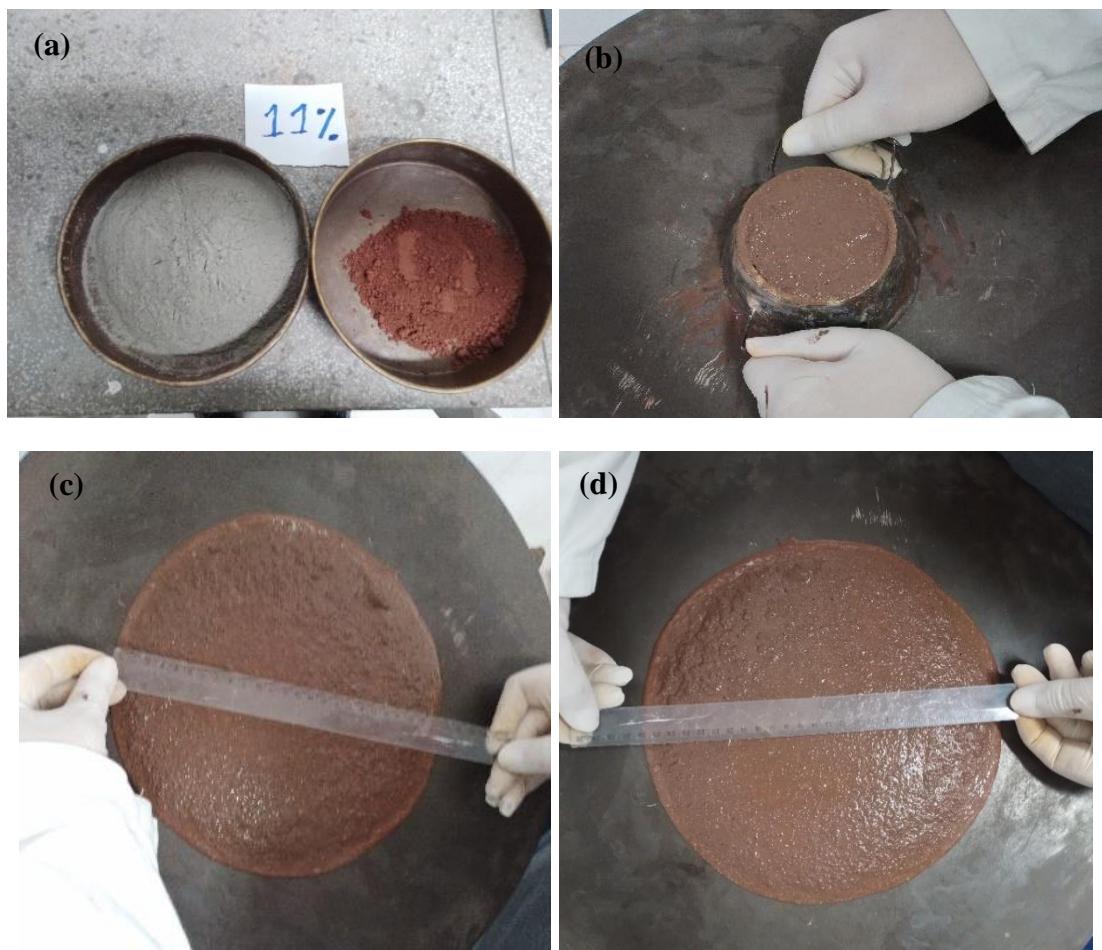


Figura 5.6: (a) Amostra de resíduo RASRB 80, passante e retido, na peneira #200 (b) desmoldagem do corpo-de-prova (c) e (d) espalhamento da pasta com RASRB 80 – 11%.

Fonte: Autora

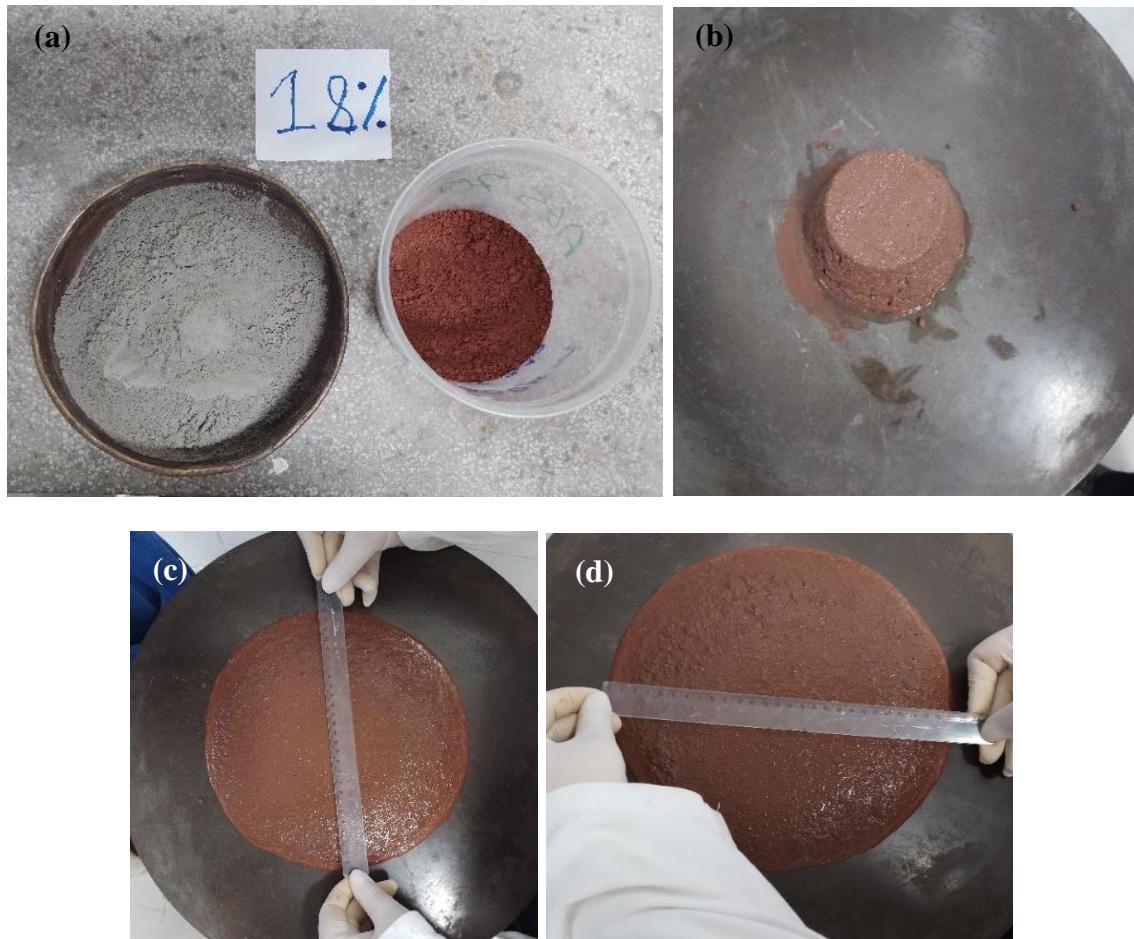


Figura 5.7: (a) Amostra de resíduo RASRB 80, passante e retido, na peneira #200 (b) desmoldagem do corpo-de-prova (c) e (d) espalhamento da pasta com RASRB 80 – 18%

Fonte: Autora





Figura 5.8: (a) Amostra de resíduo RASRB 80, passante e retido, na peneira #200 (b) desmoldagem do corpo-de-prova (c) e (d) espalhamento da pasta com RASRB 80 – 25%

Fonte: Autora

Na figura 5.9, o resíduo de agregado sintético do resíduo de bauxita sendo moído e peneirado. Nas figuras 5.10, 5.11 e 5.12 são corpos-de-prova desmoldados nas proporções de 11%, 18% e 25%, respectivamente, conforme a tabela 5.3, que apresenta o quantitativo de material utilizados para confecção dos corpos-de-prova nas proporções de 11%, 18% e 25% do RASRB 90.

Tabela 5.3: Quantitativo de material utilizado para RASRB 90.

QUANTITATIVO DE MATERIAL PARA ARGAMASSA COM RASRB 90											
FÍLTER	ARGAMASSA	CLÍNQUER (g)	AGS (g)	GESSO (g)	AGLOMERANTE (g)	AREIA 16 (g)	AREIA 30 (g)	AREIA 50 (g)	AREIA 100 (g)	ÁGUA (g)	a/c
0%	100%	592,80	0,00	31,20	624,00	468,00	468,00	468,00	468,00	300,00	0,48
11%	89%	527,59	115,48	31,20	674,27	468,00	468,00	468,00	468,00	300,00	0,48
18%	82%	486,10	188,97	31,20	706,26	468,00	468,00	468,00	468,00	300,00	0,48
25%	75%	444,60	262,45	31,20	738,25	468,00	468,00	468,00	468,00	300,00	0,48

Fonte: Autora

Para montagem da tabela 5.3, foram obtidas às massas específicas do cimento e do RASRB 90. Na quantidade da RASRB 90 foi acrescida valores para obtenção do mesmo volume de clínquer subtraído, mantendo a relação volumétrica, sendo multiplicado pelo fator de compensação de 1,7709 para RASRB 90.

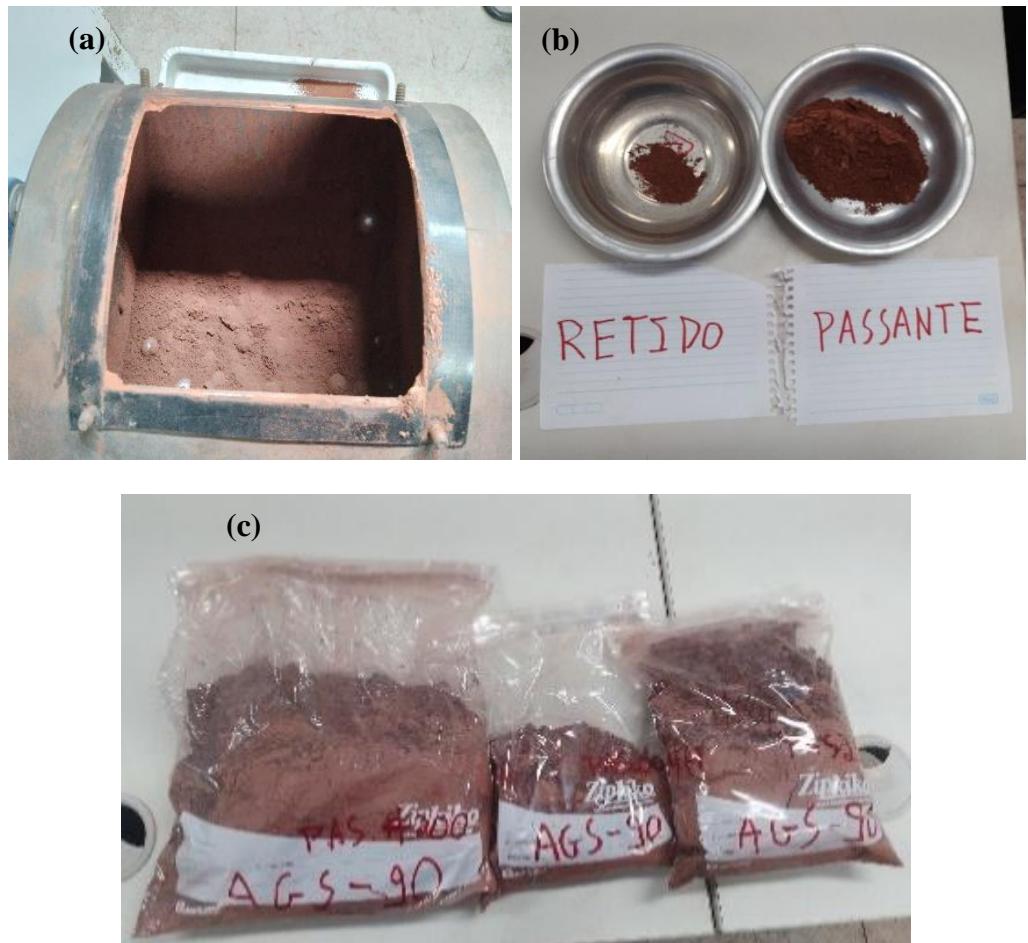
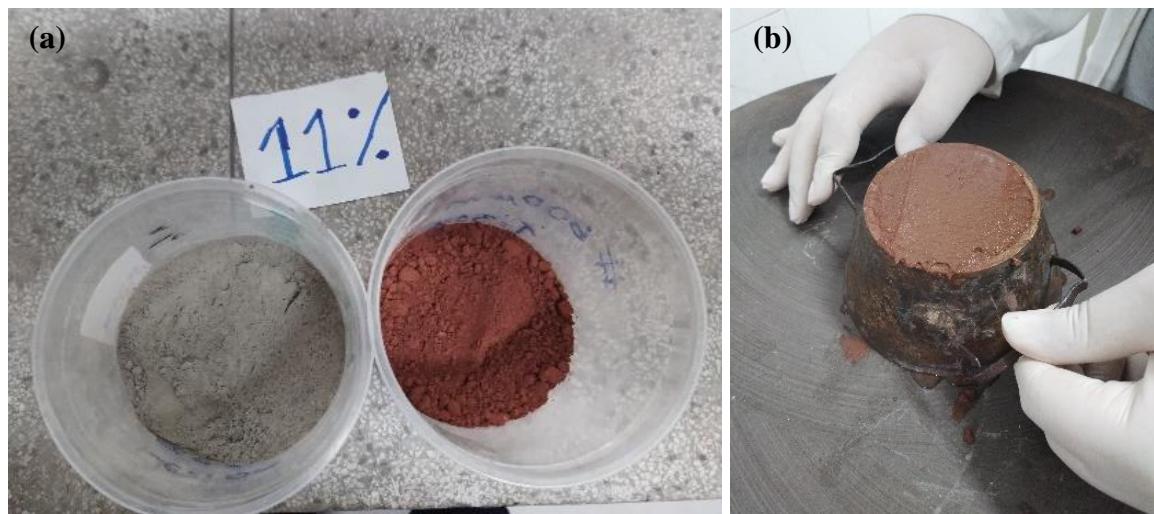


Figura 5.9: (a) RASRB 90 moído no moinho de bolas (b) Amostra de resíduo passante e retido na peneira #200 (c) amostra de todas as proporções de resíduo passante na peneira #200

Fonte: Autora



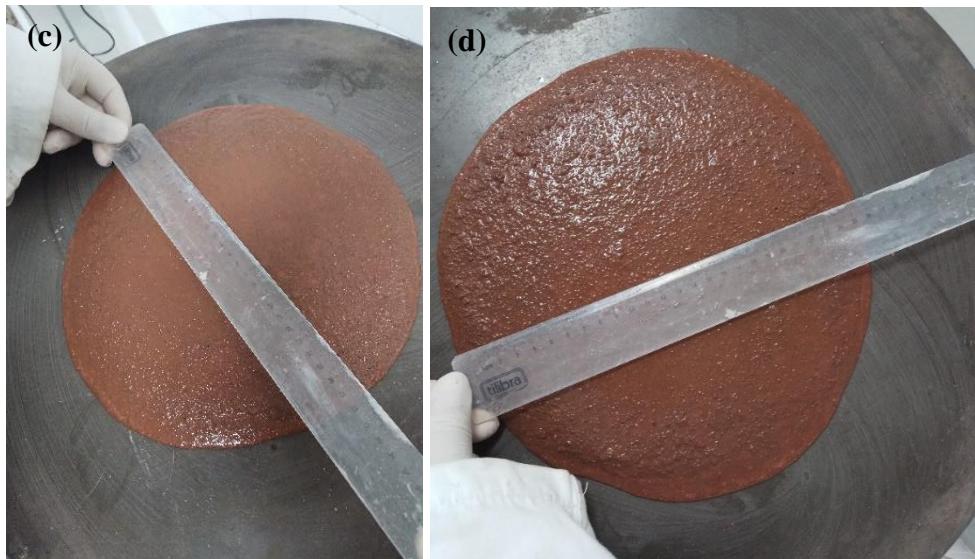


Figura 5.10: (a) Amostra de resíduo RASRB 90, passante e retido, na peneira #200 (b) desmoldagem do corpo-de-prova (c) e (d) espalhamento da pasta com RASRB 90– 11%

Fonte: Autora



Figura 5.11: (a) Amostra de resíduo RASRB 90, passante e retido, na peneira #200 (b) espalhamento da pasta com RASRB 90– 18%

Fonte: Autora



Figura 5.12: (a) Amostra de resíduo RASRB 90, passante e retido, na peneira #200 (b) espalhamento da pasta com RASRB 90– 25%

Fonte: Autora

A determinação do índice de consistência é um ensaio fundamental para avaliar a trabalhabilidade da argamassa utilizada no assentamento e revestimento de paredes e tetos. O ensaio é normatizado pela NBR 13276 (ABNT 2016) e garante que a mistura apresente plasticidade adequada, boa aderência ao substrato e desempenho mecânico duradouro. A figura 5.13, apresenta o resultado da média das consistências com os respectivos limites inferior e superior (< 220 e > 260) para uma consistência ideal (adequada) de 220 a 260mm.

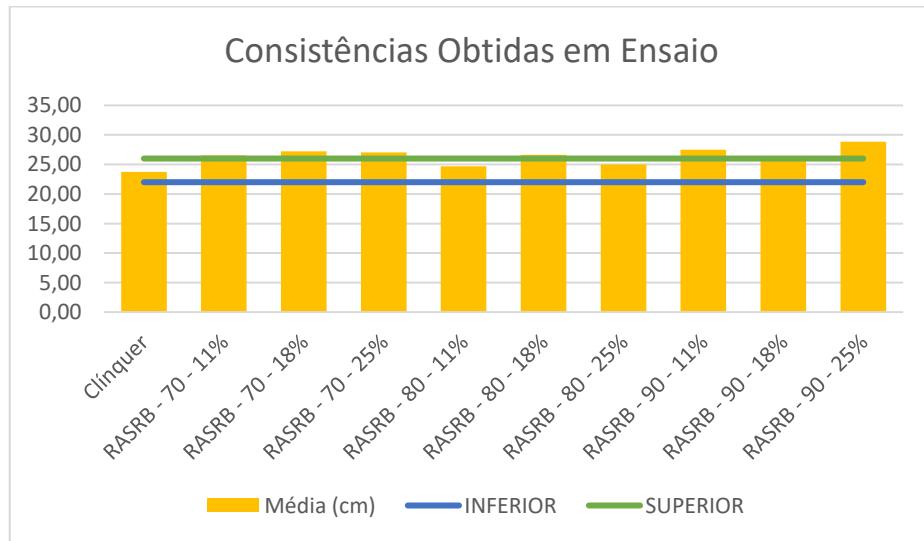


Figura 5.13: Consistência média

Fonte: Autora

Os resultados do ensaio de compressão axial do concreto são apresentados na Tabela 5.4 e a Figura 5.14, 5.15 e 5.16 mostram os gráficos esses resultados em 7, 14 e 28 dias respectivamente.

Tabela 5.4: Resistência à Compressão das Argamassas.

Resistência à Compressão das Argamassas			
Traço	7 Dias	14 Dias	28 Dias
Clínquer	14,14	15,29	24,38
RASRB - 70 - 11%	13,79	15,30	26,90
RASRB - 70 - 18%	14,84	16,80	25,37
RASRB - 70 - 25%	13,36	14,78	26,02
RASRB - 80 - 11%	15,30	15,68	22,64
RASRB - 80 - 18%	16,61	17,19	22,86
RASRB - 80 - 25%	10,35	15,77	19,16
RASRB - 90 - 11%	13,73	24,75	22,77
RASRB - 90 - 18%	18,82	19,85	21,46
RASRB - 90 - 25%	14,33	23,16	21,48

Fonte: Autora

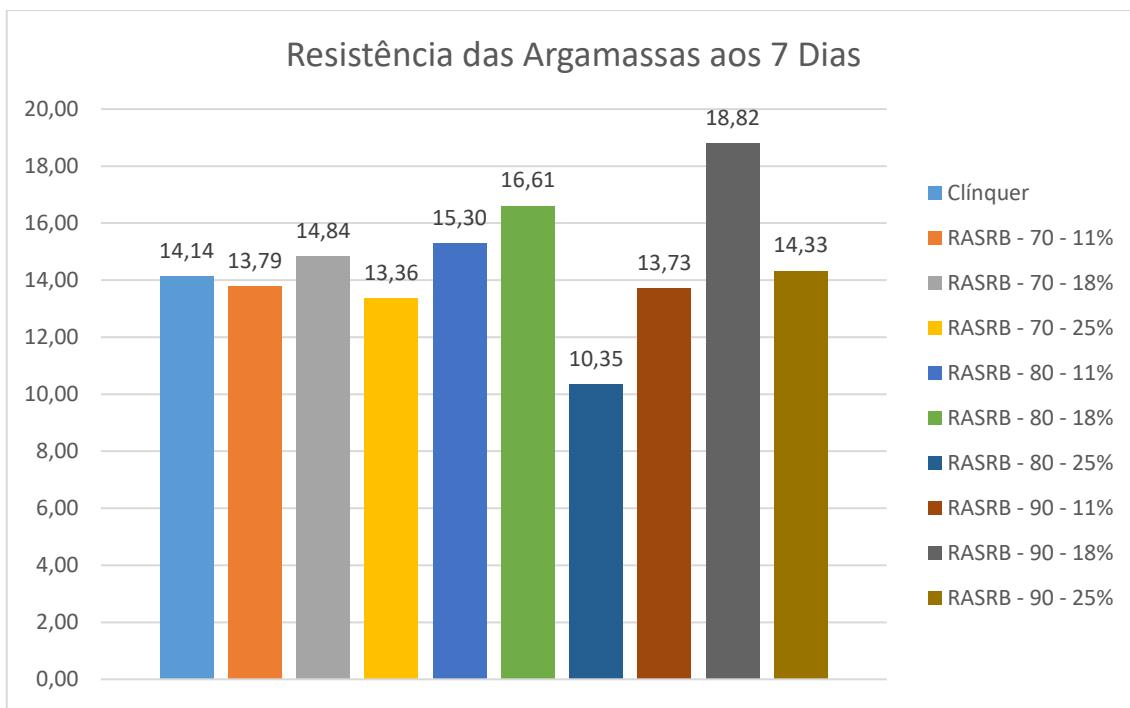


Figura 5.14: Resistência das Argamassas aos 7 Dias

Fonte: Autora

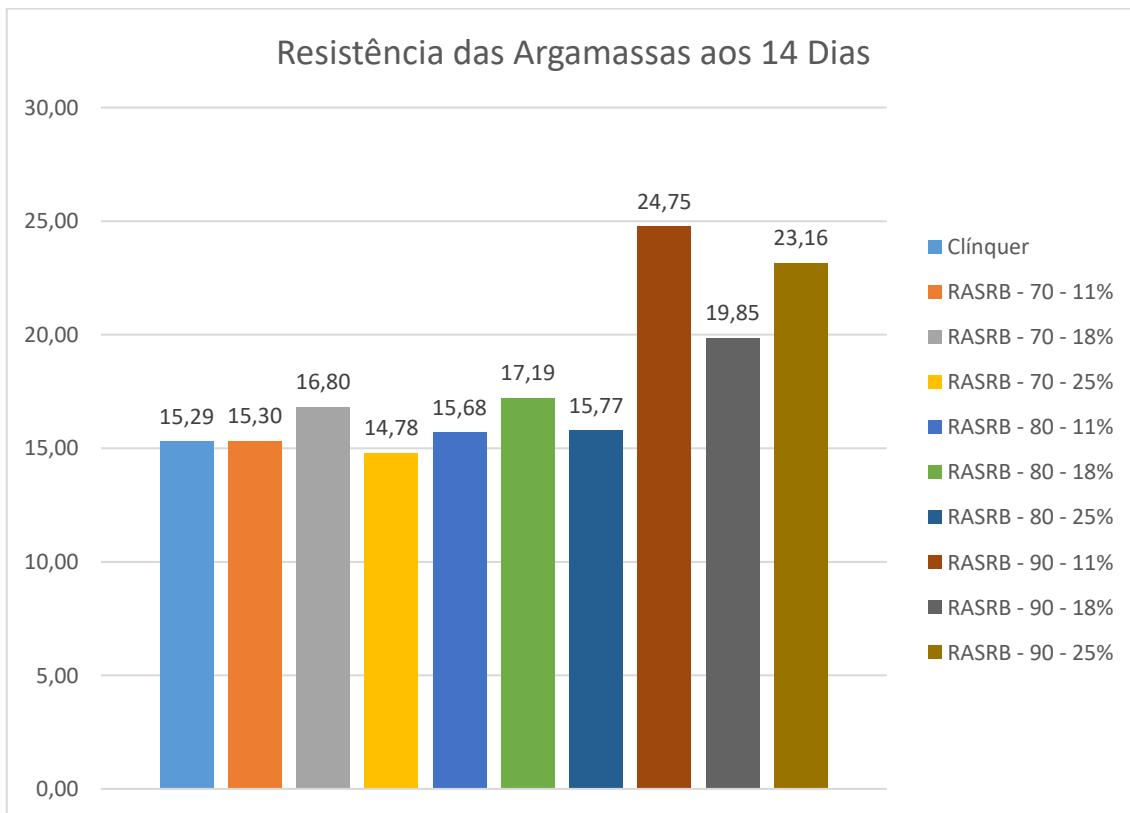


Figura 5.15: Resistência das Argamassas aos 14 Dias

Fonte: Autora

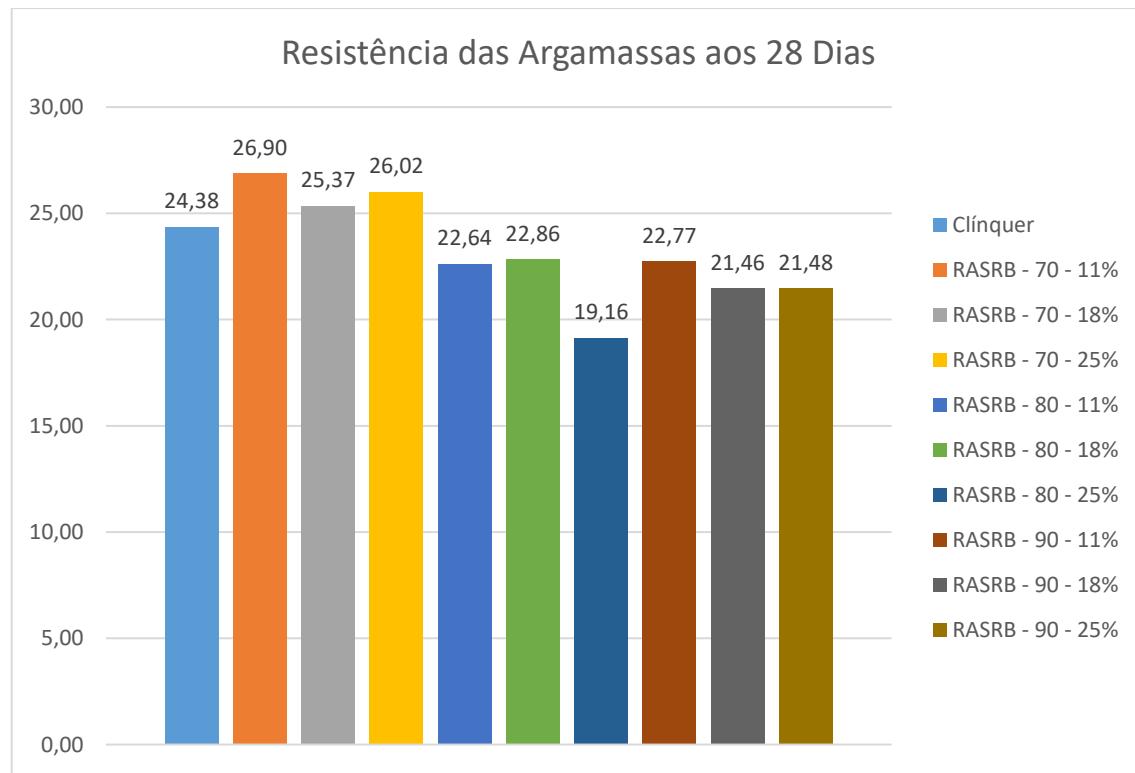


Figura 5.16: Resistência das Argamassas aos 28 Dias

Fonte: Autora

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1 CONCLUSÕES

Conforme os dados dos resultados acima, o Resíduos do Agregado Sintético do Resíduo de Bauxita (RASRB 70) apresentou características contundente para utilização no processo de fabricação do cimento, sendo possível sua substituição em até 25%. Ademais, destaca-se que o limite utilizado de substituição, neste trabalho, foi segundo a norma, mas podemos até como sugestão de trabalhos futuros ultrapassar essa quantidade para novos estudos.

O resíduo de agregado sintético do resíduo de bauxita se caracterizou como um subproduto na fabricação do cimento e ainda conforme outros trabalhos desse projeto como matéria prima principal para produção de agregados sintéticos. Outras conclusões específicas puderam ser evidenciadas, tais como:

- A moagem reduziu visivelmente o volume do RASRB e dos materiais utilizados no ensaio, tornando-os de fácil manejo e com adequabilidade para utilização como substituição na composição do cimento.
- As características inerentes dos agregados sintéticos RASRB 70, RASRB 80 e RASRB 90 mostraram resultados satisfatórios ao atenderem as especificações para substituição ao cimento Portland.
- Para o clínquer, foi adotado um tempo mínimo de 3 horas (180 minutos), não sendo suficiente para completa moagem do material passante na peneira 0,075mm, por segurança do uso do equipamento.
- A composição química do clínquer apresentou C₃S: 73,84%, C₂S: 1,35%, C₃A: 5,99%, C₄AF: 11,87%, característica de um cimento com endurecimento rápido, de alta resistência inicial e alto calor de hidratação.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- a) Este trabalho sugere nova investigação variando a quantidade de gesso aplicado na mistura, pois neste trabalho adotou-se 5% de 624g do clínquer, sendo 31,20g fixo, mesmo realizando as substituições. Mantendo a quantidade de água de 300g.
- b) Manter a relação a/c de 0,48, mas em relação à massa do clínquer apenas, portanto, diminuindo a quantidade de água na mistura.
- c) Variar a quantidade de areia, já que segundo a NBR 7215 (ABNT, 2025) a relação da mistura deve ser feita em uma proporção de 1:3, como está sendo feito a substituição do clínquer.
- d) Realizar ensaio de Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias, para materiais pozolânico, segundo a NBR 5752 (ABNT, 2014).
- e) Realizar ensaios de Durabilidade na argamassa com substituição do clinquer.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT, 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, 2013.

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

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

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13281-1: Argamassa Inorgânicas – Requisitos e métodos de ensaios. Parte 1: Argamassas para revestimento de paredes e tetos. Rio de Janeiro, 2023.

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

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

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16607: Cimento Portland – Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro, 2018.

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

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16889: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 2020.

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

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16974: Agregados – Ensaios de resistência ao impacto e à abrasão Los Angeles. Rio de Janeiro, 2022.

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

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7214: Areia normal para ensaio de cimento – Especificação. Rio de Janeiro, 2015.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2025.

AÏTCIN, P.C. Concreto de Alto Desempenho. São Paulo: Pini, 2009.

CALLISTER JR, W. D. Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Abordagem Integrada / William D. Callister, Jr.; Tradução: Sérgio Murilo Stamile Soares. 9. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

CARASEK, Helena. Materiais de construção civil e princípios de ciências e engenharia dos materiais. In: ISAIA, Geraldo Cechella. Argamassas. São Paulo. IBRACON, 2007, v. 2, cap. 26, p. 863-904.

CARDOSO, F. A. Método de formulação de argamassa de revestimento baseado em distribuição granulométrica e comportamento reológico. Tese de Doutorado – EPUSP, São Paulo, 2009.

CINCOTTO, M.A.; SIVA, M.A.C.; CARASEK, H. Argamassa de revestimento: características, propriedades e métodos de ensaio. São Paulo: IPT, 1995. Boletim técnico nº 68.

CIVILBLOG.ORG. Primary cement compounds & their roles. Disponível em: <https://civilblog.org/2017/07/14/4-primary-cement-compounds-roles/>. Acesso em 20 de agosto de 2025.

DEGEN, Maxwell K., CARDOSO, Thiago C., COSTA, Rayara P., Masuero, Ângela B., Dal Molin, Denise C. C. Estudo da lama vermelha como fíler em matrizes cimentícias. 6º Encontro Nacional sobre Aproveitamento de Resíduos Sólidos na Construção Civil. Belém. Anais, 340 p, 2019.

FARIAS, Marcelo Martins. Resíduo de Bauxita como substituição parcial ao Cimento Portland. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Pará, Belém, 2025.

FERRARIS, C. F.; MASTERS, H. E. Measurement of the rheological properties of high performance concrete: State of the art report. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, v. 103, n. 2, p. 129–134, 1998.

FERREIRA, Keylla Castro. Estudo de parâmetros físico-químicos para a produção de argamassas utilizando resíduos industriais e da construção civil. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Universidade Federal do Pará. Belém, 2014.

FIORITO, Antônio J. S. I. *Manual de Argamassas e Revestimentos*. 1^a Ed. São Paulo, PINI, 2003.

FONSECA, Gustavo Celso da. Adições minerais e as disposições normativas relativas à produção de concreto no Brasil: Uma abordagem epistêmica. Dissertação. Escola de Engenharia. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2010.

FONTES, Wanna Carvalho. Estudo do rejeito de barragem de minério de ferro como agregado reciclado para argamassas de revestimento e assentamento. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2013.

HELENE, P.; TERZIAN, P. *Manual de dosagem e controle do concreto*. São Paulo: PINI, 1993.

ISTO É. Revista Isto é. O concreto: terceiro maior emissor mundial de gases de efeito estufa. Disponível em: <https://istoedinheiro.com.br/o-concreto-terceiro-maior-emissor-mundial-de-gases-de-efeito-estufa/>. Acesso em 20 de agosto de 2024.

JUNIOR, Agostinho Alves de Oliveira. Resíduo de bauxita da Amazônia como material suplementar ao cimento Portland para a produção de concreto com agregado reciclado. Tese. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Pará, Belém, 2021.

MACHADO, Vinícius Costa. Resíduo da bauxita na produção de agregados graúdos sintéticos para concreto estrutural: análise de durabilidade. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Belém, 2022.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concrete: Microstructure, Properties and Materials*. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 2014.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. *Concreto: Estrutura, Propriedade e Materiais*. São Paulo: IBRACON, 2014.

MORAES, M. Adições Minerais ao Concreto. Notas de aula, Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia, GO, Brasil, 2012.

NEVILLE, A. M. Properties of Concrete. 5. ed. Harlow: Pearson, 2016.

NEVILLE, A. M. Propriedades do concreto / A. M. Neville, J. J. Broooks: tradução: Ruy Alberto Cremonini. 5. Ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

NEVILLE, A. M. Tecnologia do concreto / A. M. Neville, J. J. Broooks: tradução: Ruy Alberto Cremonini. 2. Ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

NITA, C.; JOHN, V. M. Materiais pozolânicos: o metacaulim e a sílica ativa. Boletim técnico da Escola Politécnica da USP, São Paulo, SP, Brasil. 2007.

NUNES, Alessandro Gouveia, SILVA MARTINS, Jean Carlos, NASCIMENTO, Jefferson Lucas Santos, ARAÚJO, Luana Leal Fernandes. Influência das Adições Minerais no Desempenho do Concreto. Revista Mangaio Acadêmico, v.6, n 1, pp. 29-47, 2021.

PICANÇO, M. A; ANGÉLICA, R.S.; BARATA, M.S. Cimentos Portland aditivados com arenito zeolítico com propriedades pozolânicas. Revista Matéria, v.19, n02, pp. 68-80, 2014.

RESENDE, Domingos Sávio de. Estudo do efeito da incorporação de cinzas de cavaco de eucalipto como material cimentício suplementar. Tese. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da REDEMAT. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, 2013.

ROCHA, N. E. P. Estudo da utilização de resíduos industriais de lã cerâmica e lã de vidro em argamassas e concretos. 2011. 165f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2011.

SANTOS, Heraldo Barbosa dos. Ensaio de Aderência das Argamassas de Revestimento. Monografia. Curso de Especialização em Construção Civil Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. 2008.

SANTOS, White José dos. Desenvolvimento de metodologia de dosagem de argamassas de revestimento e assentamento. Tese. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2014.

SCRIVENER, K. L.; SNELLINGS, R.; LOTHENBACH, B. A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials. Boca Raton: CRC Press, 2018.

SELMO, S.M.S. Dosagem de argamassas de cimento Portland e cal para revestimento externo de fachadas dos edifícios. Tese (Doutorado) – EPUSP, São Paulo 1989.

SILVA FILHO, E. B.; ALVES, M. C. M.; DA MOTTA, M. “Lama vermelha da indústria de beneficiamento de alumina: produção, características, disposição e aplicações alternativas”. Revista Matéria, vol. 12, pp. 322-338, 2007.

SIQUEIRA, Jacilene Siqueira de. Reciclagem de Resíduo a partir de Cinzas de carvão Mineral: Produção de Argamassas. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Universidade Federal do Pará. Belém, 2011.

TATTERSALL, G. H.; BANFILL, P. F. G. The Rheology of Fresh Concrete. London: Pitman, 1983.

VASKE, Nei Ricardo. Estudo preliminar da viabilidade do aproveitamento proveniente de filtro multiciclone pela combustão de lenha de eucalipto em caldeira fumo tubular como adição ao concreto. Tese. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2012.

VIVEIROS, Danielle de Cássia Santos de. Caracterização Química, Física e Mineralógica do Rejeito proveniente da Mineração de Manganês da Serra de Buritirama-PA, como proposta de adição mineral ao cimento Portland. Qualificação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Pará. Belém, 2017.