

UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
Fundação Instituída nos termos da Lei nº 5.152, de 21/10/1966 – São Luís - Maranhão.



CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

LUCAS RODRIGUES FERREIRA

UTILIZAÇÃO DO RESÍDUO DE BAUXITA COMO AGREGADO MIÚDO PARA A
PRODUÇÃO DE CONCRETO

SÃO LUÍS - MA

2019



CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

LUCAS RODRIGUES FERREIRA

UTILIZAÇÃO DE RESÍDUO DE BAUXITA COMO AGREGADO MIÚDO PARA A
PRODUÇÃO DE CONCRETO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a Coordenação do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Maranhão, para obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Dr. Paulo César de Oliveira Queiroz

Co-orientador: Prof. Dr. Wener Miranda Teixeira dos Santos

SÃO LUÍS - MA

2019



Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Núcleo Integrado de Bibliotecas/UFMA

RODRIGUES FERREIRA, LUCAS.

UTILIZAÇÃO DO RESÍDUO DE BAUXITA COMO AGREGADO MIÚDO
PARA A PRODUÇÃO DE CONCRETO / LUCAS RODRIGUES FERREIRA. -
2019.

43 f.

Coorientador(a): Wener Miranda Teixeira dos Santos.

Orientador(a): Paulo César de Oliveira Queiroz.

Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Civil,
Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2019.

1. Concreto. 2. Resíduo de Bauxita. 3. Resistência a
compressão. I. de Oliveira Queiroz, Paulo César. II.
Miranda Teixeira dos Santos, Wener. III. Título.



AGRADECIMENTOS

A Deus, pela sua graça e misericórdia que me sustentam e me capacitam a cada dia para desempenhar o melhor de mim.

Aos meus pais, por todo apoio e incentivo na minha carreira e por terem me ensinado a sempre persistir diante dos desafios.

A minha noiva Débora, pelo seu companheirismo constante durante todos esses anos de curso.

Ao meu orientador Prof. Dr. Paulo César de Queiroz por ter me ajudado a amadurecer toda a ideia do meu trabalho.

Ao Prof. Dr. Wener Santos, pela oportunidade e por ter apostado no meu desempenho dentro deste projeto.

A mestrandia Eng^a. Elaine Faconi, por todos os conselhos e pelo companheirismo desenvolvido através deste trabalho.

Ao meu amigo Rodrigo Martínéz, que fiz durante essa caminhada, onde partilhamos de muito esforço e cooperação mútua.

Aos meus amigos de curso que já completaram essa caminhada, por servirem de inspiração como profissionais bem qualificados.

A Fundação Sousândrade, por ter apoiado todo o desenvolvimento do trabalho.

Aos meus colegas de curso, por compartilharem dos sofrimentos e conquistas desta caminhada.

Aos meus companheiros de projeto, por terem suado a camisa e dedicado tempo para desenvolvermos algo que impacte no nosso futuro.



RESUMO

FERREIRA, Lucas Rodrigues. **Utilização de resíduo de bauxita como agregado miúdo para a produção de concreto.** 2019, 43 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Engenharia Civil, Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2019.

O presente trabalho analisou a resistência a compressão do concreto, utilizando como agregado alternativo o resíduo do beneficiamento da bauxita, o resíduo de bauxita (RB) ou lama vermelha (LV). Através de revisão bibliográfica verificou-se inicialmente o grande impacto ambiental gerado pelas atividades mineradoras e sua conseguinte deposição de resíduos sem utilização aparente, gerando grandes custos as empresas do ramo. Desta forma, através de um processo de reciclagem, objetivou-se inserir a lama na indústria de maior consumo de matérias-primas não renováveis, a construção civil. Realizou-se composições utilizando diferentes percentuais de substituição do agregado miúdo pelo resíduo de bauxita, sendo estes de 30%, 50% e 60%, a fim de encontrar o que obtivesse maior resistência a compressão. Apresentou-se a caracterização química do resíduo de bauxita, bem como sua distribuição granulométrica. Por fim, após a obtenção dos resultados, encontrou-se que o percentual de 30% de substituição do agregado miúdo pelo resíduo de bauxita proporcionou maior resistência mecânica a compressão e apresentou-se resultados de análise de Fluorescência de Raio-X que pontuaram a diminuição de sulfato com o aumento do teor de RB no concreto.

Palavras-chave: *Concreto, Resíduo de bauxita, Resistência a compressão.*



ABSTRACT

FERREIRA, Lucas Rodrigues. Use of bauxite residue as fine aggregate for concrete production. 2019, 43 f. Monograph (Course Completion Paper) - Civil Engineering, Federal University of Maranhão, São Luís, 2019.

The present work analyzed the compressive strength of concrete using an alternative aggregate the bauxite beneficiation residue, the bauxite residue (BR) or red mud (LV). Through a bibliographic review, it was initially verified the great environmental impact generated by the mining activities and its consequent deposition of waste without apparent use, generating great costs to the companies of the branch. Thus, through a recycling process, the objective was to insert the mud in the industry that consumes the non-renewable raw materials, construction. Compositions were made using different percentages of replacement of the fine aggregate by the bauxite residue, these being 30%, 50%, and 60% to find the one that obtained the highest compressive strength. The chemical characterization of bauxite residue was presented, as well as its particle size distribution. Finally, after obtaining the results, it was found that the 30% percentage of replacement of the fine aggregate by the bauxite residue provided greater mechanical compressive strength and X-ray Fluorescence analysis results that showed the decrease of sulfate with increasing BR content in concrete.

Keywords: Concrete, Bauxite residue, Compressive strength.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ciclo de vida de uma jazida de bauxita	16
Figura 2 - Fluxograma e Esquema do Processo Bayer (Adaptado de WAO, 2003)..	17
Figura 3 - Lagoa de disposição de resíduo de bauxita da Alumar (Ilha de São Luís - Maranhão)	19
Figura 4 - Vista de satélite das lagoas (Ilha de São Luís - Maranhão).....	19
Figura 5 - Etapas da metodologia	26
Figura 6a – Confecção manual do concreto com RB	29
Figura 6b – Confecção manual do concreto com RB	29
Figura 7 – Moldes dos corpos de prova	30
Figura 8 – Realização de cura por imersão.....	30
Figura 9 - Prensa Elétrica para Concreto de 100 toneladas	31
Figura 10 - Corpos de Prova com composições de 30% e 50% de RB	32
Figura 11 - Corpos de prova com composição de 60% de RB	32
Figura 12 - Corpo de prova com composição de 60% de RB	32
Figura 13 - Corpos de Prova 10 x 20 cm com composição de 0%, 30% e 60% de RB com CP II-E-40	36
Figura 14 - Corpos de prova em ensaio de compressão uniaxial e após o rompimento	36



LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Tipos de cimento Portland.....	23
Quadro 2 – Comparação entre as composições química do Resíduo de bauxita.....	24
Quadro 3 - Comparação de Distribuição de tamanhos de partícula do RB.....	25
Quadro 4 - Composição das dosagens de concreto em volume	31
Quadro 5 – Resultado de resistência a compressão do concreto com CP IV-RS-32 (em MPa).....	33
Quadro 6 - Análise química por Fluorescência de Raios-X (FRX) do concreto com CP IV-RS-32	34
Quadro 7 - Composição das dosagens do concreto com CP II-E-40.....	35
Quadro 8 - Resultado de resistência a compressão do concreto com CP II-E-40 (em MPa)	36



LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Distribuição granulométrica do resíduo de bauxita	25
Gráfico 2 - Resistência a compressão do concreto com CP IV-RS-32 dentro das idades de controle	33
Gráfico 3 - Resistência a compressão do concreto com CP II-E-40 dentro das idades de controle	37



LISTA DE SIGLAS

ABAL – Associação Brasileira de Alumínio

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland

ALUMAR – Consórcio de Alumínio do Maranhão

f_{cj} – Resistência média do concreto à compressão, prevista para a idade de j dias, em MPa

f_{ck} – Resistência característica à compressão do concreto

FRX – Fluorescência de Raios-X

RB – Resíduo de bauxita

MPa – Megapascal

RAS – Reação álcalis-sílica



LISTA DE SÍMBOLOS

μm – Nanômetro

C – Consumo de cimento

$V_{concreto}$ – Volume de concreto

a/c – Relação água/cimento

$\rho_{cimento}$ - Massa específica do cimento

ρ_{areia} – Massa específica da areia média

$\rho_{brita 1}$ – Massa específica da brita 1

S_d – Desvio padrão da dosagem, em MPa



SUMÁRIO

RESUMO	4
ABSTRACT	5
LISTA DE FIGURAS.....	6
LISTA DE QUADROS	7
LISTA DE GRÁFICOS	8
LISTA DE SIGLAS	9
LISTA DE SÍMBOLOS.....	10
1. INTRODUÇÃO	13
1.1 Considerações iniciais.....	13
1.2 Justificativa.....	14
1.3 Objetivos	14
1.3.1 Geral.....	14
1.3.2 Específicos	14
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	15
2.1 Impacto ambiental da mineração	15
2.2 Bauxita	15
2.2.1 Processo de beneficiamento	16
2.2.2 Resíduo de bauxita	18
2.2.3 Aplicações para o resíduo de bauxita	20
2.3 Agregados para concretos	21
2.3.1 Origem.....	21



2.3.2 Tamanho de grão.....	22
2.4 Cimento Portland.....	22
2.4.1 Classificação.....	23
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	24
3.1 Caracterização do resíduo de bauxita	24
3.2 Metodologia	26
3.2.1 Materiais	27
3.2.2 Atividades	27
3.2.3 Procedimento.....	28
3.3 Resultados	31
4. CONCLUSÃO.....	39
5. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	40
REFERÊNCIAS	41

1. INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

A construção civil é uma atividade baseada em processos de transformação de matérias-primas em obras de uso social, utilizando-se de fontes não renováveis como reservas naturais de minerais (areia, brita) e materiais manufaturados (cimento, aço, alumínio). Com o tempo, percebeu-se que a escassez de materiais de fontes naturais tornava-se notável, levando à utilização de materiais artificiais como fonte alternativa.

Com o passar dos anos, a tecnologia de reutilização de resíduos tornou-se bastante eficaz, simulando materiais como areia e brita, por exemplo, e adições ao próprio cimento, como a escória de alto forno. Diante disso, abriu-se uma janela para a destinação de diversos tipos de resíduos para a indústria da construção civil, inclusive os gerados por ela, como forma de preservar as reservas naturais e diminuir a poluição do meio ambiente.

A mineração por sua vez constitui-se em uma atividade de beneficiamento do solo para a produção de determinado material, como o aço, o ferro e o alumínio. Dessa forma, torna-se uma das atividades com maior geração de resíduo. Geralmente no formato de lama, sua única destinação era ser acumulada em lagoas artificiais e barragens a fim de não direcioná-la aos mananciais. A criação destes lagos e barragens depende de um alto custo às empresas e necessita de grandes áreas, sem falar no risco a população em casos de erro de dimensionamento ou falta de manutenção.

Quanto à produção de alumínio, em média, a cada 5 toneladas de bauxita, são produzidas 2 toneladas de alumina, gerando assim, uma alta quantidade de resíduo de bauxita (ABAL, 2017).

Baseada nessa prerrogativa, muitos pesquisadores começaram a estudar uma destinação para os resíduos provenientes das atividades de mineração, inserindo-os na indústria da construção civil, pois a mesma possui crescimento exponencial e necessita de materiais alternativos, tornando-se assim uma candidata em potencial para absorver tais resíduos. No entanto, é

necessária observação quanto a procedência de tais materiais devido a sua alcalinidade advinda da própria extração de minério.

1.2 Justificativa

A motivação do presente trabalho deu-se em vista do grande contingente de resíduo de bauxita depositado em bacias e barragens sem uma destinação útil. Tendo em vista que a construção civil é uma das maiores consumidoras de recursos naturais não renováveis, viu-se a possibilidade de utilização do resíduo de bauxita como fonte de matéria-prima, contribuindo para a preservação das reservas naturais de insumos, consumindo o resíduo de minério estocado.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

- Estudar a influência do resíduo de bauxita no desempenho mecânico a compressão do concreto.

1.3.2 Específicos

- Caracterização química do resíduo de bauxita;
- Dosagem do concreto com substituição do resíduo de bauxita pelo agregado miúdo;
- Caracterização do concreto no estado endurecido
- Preservar as jazidas de matérias-primas não renováveis

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Impacto ambiental da mineração

Segundo Franco et al (2014), o impacto ambiental produzido pela exploração de recursos minerais é um assunto de extrema importância na atualidade, pois afeta intensamente o meio ambiente, ocasionando degradação direta, e, de forma difusa contribui para o acúmulo de resíduos em barragens. Cappeli (2017) relata que resíduos são materiais remanescentes do processo de beneficiamento e concentração de minérios em instalações industriais, cujas características granulométricas dependem do processo industrial de beneficiamento e do tipo de minério bruto a ser extraído, podendo variar de granulometrias grosseiras até muito finas.

Lage (2018) afirma que houve um aumento de empresas no ramo de mineração, gerando assim um aumento da produção de resíduos e, por sua vez aumentando o número de obras de contenção. No entanto, essas obras, como a de barragens por exemplo, são complexas e caras, motivando às empresas a procurarem formas de reuso e de uma adequada destinação do resíduo por elas produzido.

2.2 Bauxita

A bauxita, rocha que deu nome ao minério de alumínio, foi identificada pela primeira vez em 1821, na localidade de *Les Baux*, no sul da França, por Berthier. É a principal rocha-minério de alumínio na natureza. A definição do nome "*bauxite*" foi dada por A. Dufrênoy. Seu principal constituinte é a alumina (Al_2O_3), correspondendo a mais de 40% da sua composição. A bauxita apresenta coloração avermelhada e é encontrada sobretudo em regiões tropicais e subtropicais do planeta, por ação do intemperismo sobre aluminossilicatos (ABAL, 2017; LAGE, 2018; MÁRTIRES, 2001; RAMOS, 1982).

De acordo com a Associação Brasileira do Alumínio - ABAL (2017) é avaliado que as reservas mundiais conhecidas de bauxita somem em torno de 70 bilhões de toneladas, em que as reservas brasileiras encontram-se entre as maiores do mundo, ficando, atualmente, em terceiro lugar com 2.600 milhões de toneladas. A associação apresenta ainda que são necessários de 5 a 7 toneladas

de bauxita para produzir 2 toneladas de alumina, que se convertem em 1 tonelada de alumínio.

De acordo com o Relatório de Sustentabilidade da ALCOA (2015), a bauxita ocupa a terceira posição de recursos naturais em volume produzido no Brasil, com cerca de 37 milhões de toneladas anuais, atrás dos agregados para construção civil (areia, brita, cascalho e cimento), com cerca de 772 milhões.

2.2.1 Processo de beneficiamento

O processo de beneficiamento da bauxita até chegar à alumina consiste basicamente das etapas descritas na Figura 1:

Figura 1 - Ciclo de vida de uma jazida de bauxita

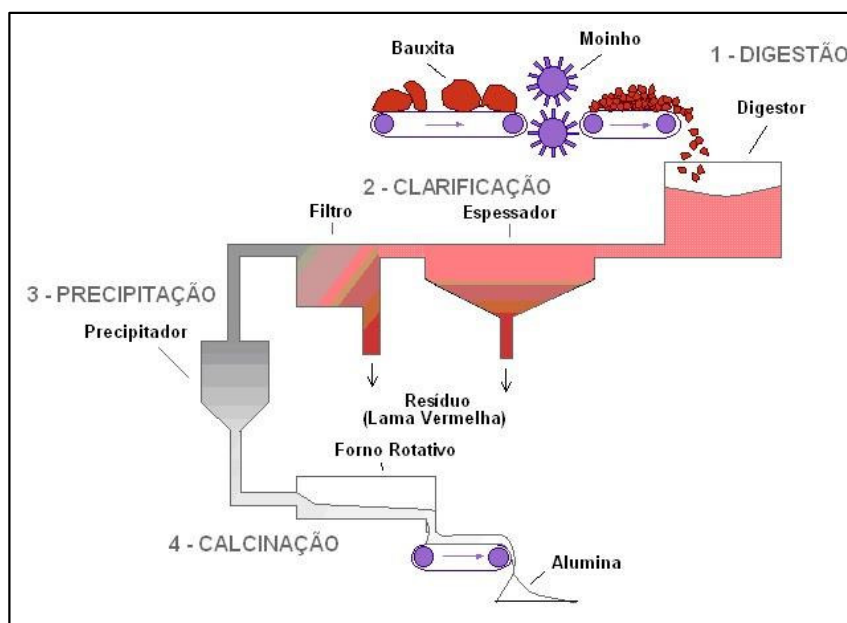


Fonte: ABAL (2017)

Os métodos de lavra dos minérios variam de acordo com a natureza dos corpos mineralizados das jazidas, sendo feita, na maior parte, em céu aberto, segundo o método por tiras (*strip mining*). O nível de mecanização da lavra é variado, indo da lavra manual até os métodos modernos com diversos tipos de equipamentos de mineração (ABAL, 2017; CETEM/MCT, 2005).

Mártires (2001) observa que a alumina é o resultado do beneficiamento químico da bauxita, conhecido como processo *Bayer* (a Figura 2 esquematiza o processo).

Figura 2 - Fluxograma e Esquema do Processo Bayer (Adaptado de WAO, 2003)



Fonte: Silva Filho et al (2007).

Silva Filho et al (2007) descreve a Figura 2 indicando cada etapa.

- (A) *Digestão:* Compreende a moagem da bauxita, seguida pela digestão propriamente dita com uma solução caustica de hidróxido de sódio (NaOH) sob temperatura e pressão. Nestas condições a maioria das espécies contendo alumínio é dissolvida, formando um licor verde.
- (B) *Clarificação:* ocorre a separação entre as fases sólida (resíduo insolúvel) e líquida (licor). Normalmente as técnicas usadas envolvem espessamento seguido de filtração. O espessamento é um processo de decantação, em que o resíduo gerado pela digestão é encaminhado para unidades chamadas de espessadores/lavadores. Nesta fase é comum a adição de polímeros para induzir a floculação das partículas nos espessadores ou até mesmo a utilização de processos de separação com membranas poliméricas.

- (C) *Precipitação*: Ocorre quando acontece o esfriamento do licor verde. Após o esfriamento é feita uma adição de pequena quantidade de cristais de alumina (semeadura) para estimular a precipitação. A alumina cristalizada é encaminhada para a calcinação e o licor residual contendo hidróxido de sódio e alguma alumina é retornada para a etapa de digestão.
- (D) *Calcinação*: A alumina é lavada para remover qualquer resíduo do licor e posteriormente seca. Logo após, a alumina é calcinada a aproximadamente 1000°C para desidratar os cristais, formando cristais de alumina puros, de aspecto arenoso e branco.

2.2.2 Resíduo de bauxita

Cappeli (2017) cita que todo processo de mineração descarta resíduos de baixíssimo ou quase nenhum valor comercial. Complementa ainda que os resíduos finos ou “lamas” são geralmente frutos dos espessadores e do processo de beneficiamento que envolve a flotação em colunas. Estes resíduos são caracterizados por conterem frações granulométricas correspondentes a argilas e siltes (com mais de 90% abaixo de 0,074 mm de diâmetro equivalente).

Conforme De Sá e Santos (2015) o resíduo formado durante a clarificação é composto por óxidos insolúveis de ferro, quartzo, aluminossilicatos de sódio, carbonatos e aluminatos de cálcio e dióxido de titânio, é conhecido como lama vermelha (*red mud*) pela indústria de refino da alumina. Silva Filho et al (2007) relata que a resíduo de bauxita é normalmente disposta em lagoas projetadas especialmente para este fim, conforme a Figura 3 e Figura 4.

Figura 3 - Lagoa de disposição de resíduo de bauxita da Alumar (Ilha de São Luís - Maranhão)



Fonte: Silva Filho et al (2007)

Figura 4 - Vista de satélite das lagoas (Ilha de São Luís - Maranhão)



Fonte: Google Maps (2019)

Sua composição varia de acordo com a natureza da bauxita e da técnica empregado no processo Bayer em cada planta industrial, como afirma

Silva Filho et al (2007). De Sá e Santos (2015) afirmam que a resíduo de bauxita representa um grande passivo ambiental para a indústria de produção de alumínio, com riscos de contaminação ao meio ambiente, elevado custo associado ao seu manejo e disposição nos lagos de armazenamento, os quais representam uma grande parte dos custos de produção da alumina.

Mercury et al (2010) conceitua a resíduo de bauxita como um resíduo semi-sólido alcalino com concentração média variando entre 400 e 600 g/l e pH na faixa de 11,9-13,6. (A utilizada no trabalho dos autores consistia de pH = 12,9 “*in natura*”). Os autores apresentam também que de acordo com a NBR 10004:2004, a LV pode ser classificada como resíduo Classe I – perigoso (alta corrosividade e reatividade), de modo que sua manipulação inadequada pode acarretar vários problemas ambientais.

Segundo Pradhan et al (1996) e Hind et al. (1999) citado por Silva Filho et al (2007) são geradas em torno de 30 milhões de toneladas de lama por ano e que somente a *Aluminium Company of America* (ALCOA) é responsável por mais de 20 milhões ton/ano deste resíduo.

2.2.3 Aplicações para o resíduo de bauxita

Segundo Chaves (1962), durante muito tempo o resíduo de bauxita foi considerada um resíduo inaproveitável para a indústria do alumínio. No entanto, os riscos e custos associados à disposição do resíduo motivou pesquisadores a procurarem alternativas de aproveitamento da lama de forma econômica e ambientalmente adequado.

As aplicações para a construção civil são variadas. A *Kaiser Aluminium & Chemical Company* utilizou o resíduo de bauxita como material para recobrimento de aterros e pavimentação. Foi pesquisado também a utilização do resíduo como insumo para produção de cimentos especiais, no entanto este se mostrou problemático devido à alcalinidade da lama (SHIMANO & KOGA, 1979; SINGH et al, 1997; TSAKIRIDIS et al, 2004; PAN et al, 2003; KIRKPATRIK, 1996, citado por SILVA FILHO et al, 2007).

Mercury et al (2010) recomendou o uso do resíduo em conjunto com outras matérias-primas em mistura para a fabricação de materiais cerâmicos, podendo contribuir para a economia de energia e diminuindo assim o seu passivo ambiental.

Huang et al (2013) estudou a viabilidade do uso de resíduo de minério de ferro em matrizes cimentícias e afirmou que com a adição do resíduo proporcionava uma redução no consumo de energia entre 10 a 32% e das emissões de CO₂ entre 29 a 63% na produção de matrizes em comparação à amostras naturais, e além disso, a incorporação deste material apresentava resistência à compressão entre 46 a 57 MPa.

Franco et al (2014) realizou ensaios com a adição de resíduo de minério de ferro (se assemelha muito com a LV, havendo diferença no percentual de *Fe* presente). Em seu trabalho, a adição de resíduo melhorou a resistência mecânica de forma geral. Destaca que com o teor de 5% obteve melhor resultado para a classe C20, presente na NBR 6118:2014. Para as classes C30 e C40, o teor de adição que teve melhor resultado foi o de 10%.

2.3 Agregados para concretos

Agregados são materiais granulares, sem forma ou volume definidos de dimensões e propriedades úteis para obras de engenharia, sendo utilizadas na produção de argamassas de cimento Portland e concreto (ROSÁRIO, 2013).

A autora ainda destaca que devido a popularização do uso de concreto com material construtivo, a utilização de insumos naturais, como os agregados, ganhou real importância técnica, econômica e social. Diante da necessidade de se evitar o esgotamento das jazidas naturais, buscou-se diversas alternativas que visassem atender à crescente demanda de insumos para a indústria da construção civil de forma ambientalmente correta.

2.3.1 Origem

Rosário (2013) cita que quanto à origem os agregados classificam-se como:

- (A) *Agregados naturais*: encontram-se de forma particulada na natureza, em condições de uso imediato, sem a necessidade de beneficiamento;
- (B) *Agregados britados*: submetidos a processo de diminuição do diâmetro das partículas, de modo geral, feito por processo de britagem;
- (C) *Agregados artificiais*: obtidos por meio de processos industriais, ou seja, são aqueles em que ocorrem alterações da maneira como se encontram depositados;
- (D) *Agregados reciclados*: podem ser resíduos industriais granulares, que possuem propriedades que os tornem adequados ao uso como agregado.

2.3.2 Tamanho de grão

A NBR 7211:2009 definem agregados em:

- (A) *Agregado miúdo*: agregados cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 150 μm ;
- (B) *Agregado graúdo*: agregado cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha 4,75 mm.

2.4 Cimento Portland

O cimento Portland é um material pulverulento, formado por silicatos e aluminatos de cálcio, praticamente sem cal livre, que ao serem misturados com água, hidratam-se e produzem endurecimento da massa, oferecendo elevada resistência. O cimento Portland é resultado da moagem do clínquer (PETRUCI, 1998).

2.4.1 Classificação

O Quadro 1 apresenta os tipos mais comuns de cimento Portland conhecidos internacionalmente e no Brasil.

Quadro 1 - Tipos de cimento Portland

CP I	Cimento Portland comum
CP I – S	Cimento Portland comum com adição
CP II – E*	Cimento Portland composto com escória de alto forno
CP II – Z	Cimento Portland composto com pozolana
CP II – F	Cimento Portland com filer (calcário)
CP III	Cimento Portland de alto forno
CP IV*	Cimento Portland pozolânico
CP V – ARI Plus	Cimento Portland alta resistência inicial
CP V – ARI – RS	Cimento Portland alta resistência inicial e resistente a sulfatos

*Cimentos utilizados neste trabalho.

Fonte: ABNT

Para este trabalho, foram selecionados os cimentos CP II-E-40 e CP IV-RS-32. De acordo com a NBR 11578:1991, o cimento Portland CP II-E é recomendado em estruturas que podem ser atacadas por sulfatos. Conforme a NBR 5736 :1991, o cimento Portland CP IV, semelhantemente ao CP II, proporciona estabilidade no uso de agregados reativos e ataques de sulfatos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Caracterização do resíduo de bauxita

Esta seção visa realizar a comparação da lama utilizada neste trabalho e a caracterização feita pelos professores Mercury et al (2010) do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão – IFMA. No Quadro 2 apresenta-se a comparação da composição da lama estudada no presente trabalho e a estudada pelo autor. Realizou-se a caracterização do RB obtendo-se sua densidade, composição por Análise de Fluorescência de Raios-X (FRX).

- **Densidade do RB = 3,62 g/cm³**

Quadro 2 – Comparação entre as composições química do Resíduo de bauxita

Material (%)	RB*	RB
Al ₂ O ₃	19,44	20,77
SiO ₂	15,08	14,37
Fe ₂ O ₃	40,31	31,32
TiO ₂	3,85	4,55
Ga ₂ O ₃	0,01	-
Mn ₄	0,03	-
ZrO ₂	0,26	-
Na ₂ O	7,50	9,87
CaO	0,69	2,49
SO ₃	0,23	-
P ₂ O ₅	0,09	-
V ₂ O ₅	0,11	-
Cr ₂ O ₃	0,07	-

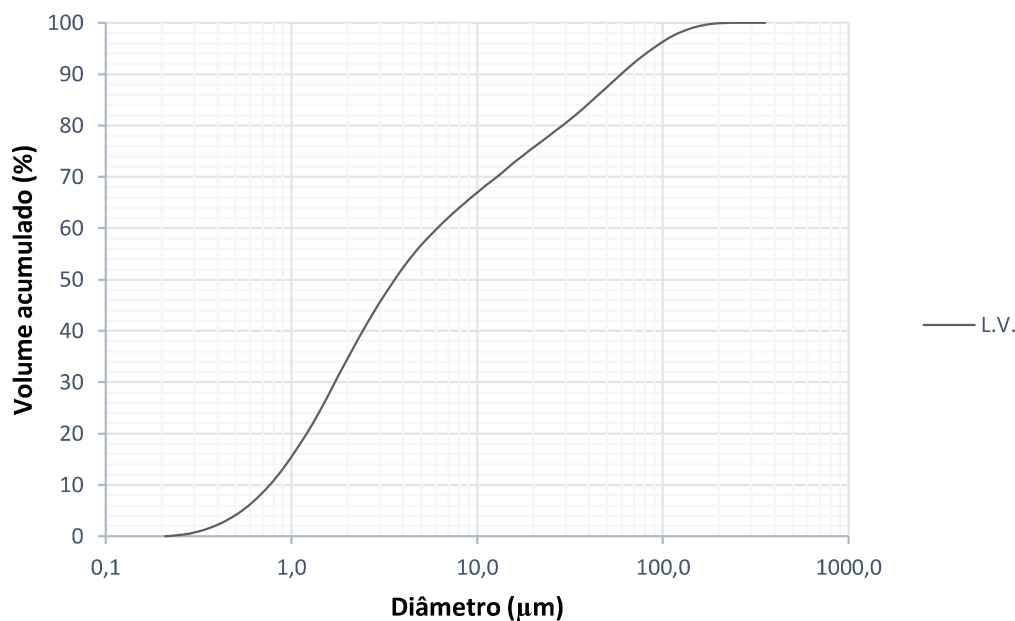
*Resíduo de bauxita analisado neste trabalho

Fonte: Alumar (2018); Mercury et al (2010)

Mercury et al (2010) relata que no estudo da determinação da granulometria por peneiramento (úmido), nenhuma das peneiras de 100 a 325 mesh (serie Tyler) apresentou massa retida. Diante disso, foi realizada uma

análise granulométrica por laser da LV, a fim de, conhecer as partículas a baixo de 325 mesh, Gráfico 1.

Gráfico 1 - Distribuição granulométrica do resíduo de bauxita



Fonte: O autor.

No Quadro 3 comparou-se o resultado obtido por Mercury et al (2010) e o material caracterizado neste trabalho.

Quadro 3 - Comparação de Distribuição de tamanhos de partícula do RB

Diâmetro (µm)	O autor	Mercury et al (2010)
D10	0,76	0,40
D50	3,62	3,80
D90	59,80	8,42

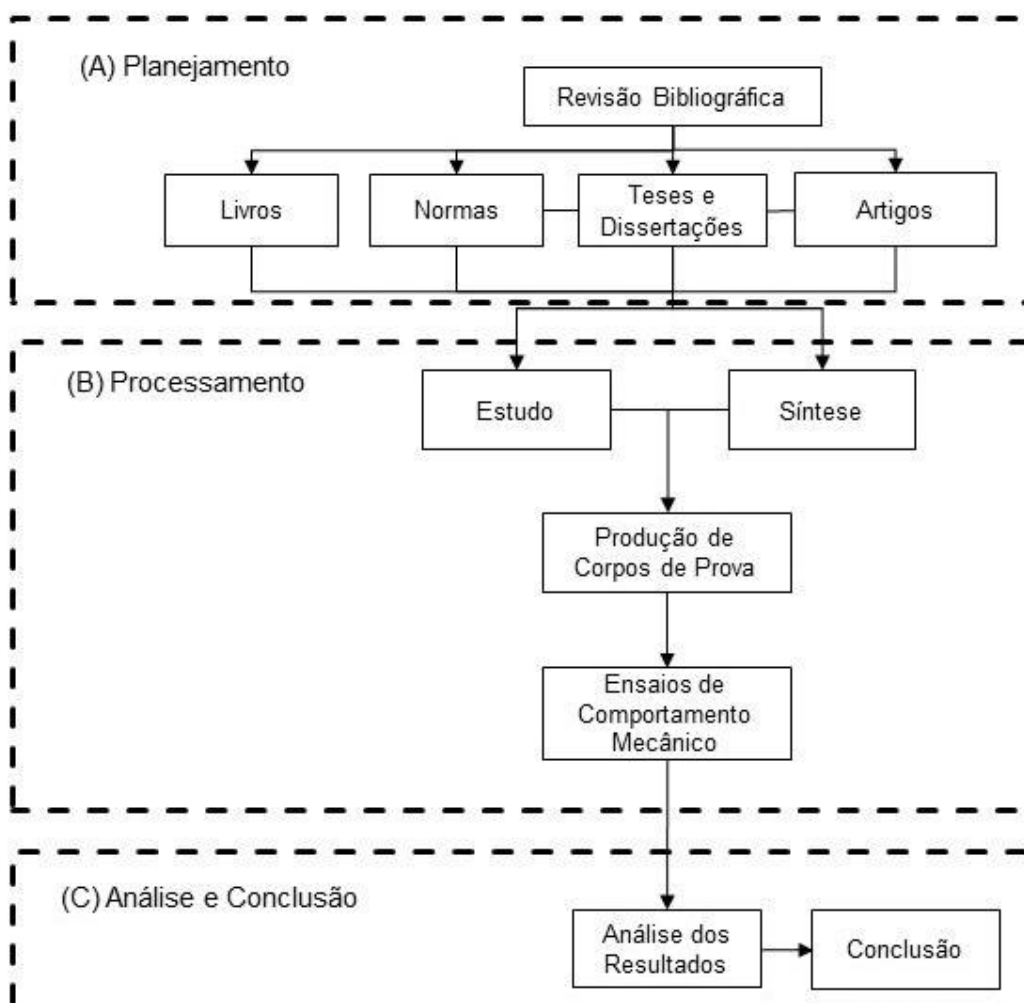
Fonte: O autor; Mercury et al (2010)

Como apresentado, “D10” refere-se ao menor tamanho de partícula, “D50” refere-se ao tamanho médio da partícula de resíduo de bauxita utilizada neste trabalho que se iguala a 3,62 µm, e “D90” que representa 90% das partículas, sendo estas inferiores a 59,8 µm.

3.2 Metodologia

A metodologia proposta para o trabalho foi baseada na dissertação de Moraes (2012), sendo dividida em 3 etapas que compreendem o (A) Planejamento, (B) Processamento e (C) Análise e Conclusão. As atividades em cada uma delas são apresentadas na Figura 5 e detalhadas a seguir.

Figura 5 - Etapas da metodologia



Fonte: O autor.

(A) Planejamento

A etapa de planejamento compreendeu o levantamento bibliográfico em livros, normas, teses e artigos a fim de se obter um embasamento sobre o assunto e também sanar lacunas de conhecimento.

(B) Processamento

A etapa de processamento consiste em toda a execução prática de adequações de traço e ensaios de desempenho mecânico.

(C) Análise e conclusão

A etapa de análise e conclusão consiste na análise dos resultados obtidos na etapa de processamento. Deste ponto, serão elaboradas conclusões acerca do tema proposto neste trabalho.

3.2.1 Materiais

Foram utilizados:

- Cimento CP IV-RS-32;
- Cimento CP II-E-40;
- Areia média;
- Brita 0 (12,5 mm);
- Colher de pedreiro;
- Masseur;
- Fôrmas plásticas para corpos de prova 10 cm x 20 cm com fundo de neoprene;
- Bastão de aço para adensamento;
- Vaselina em gel;
- Pincel;
- Proveta de 1000 ml;
- Balança eletrônica de 20 kg

3.2.2 Atividades

Para a implementação do trabalho, as seguintes atividades foram desenvolvidas:

Dosou-se uma composição padrão (com 0% de Resíduo de Bauxita), com base em métodos estipulados pela ABCP, utilizando relação $a/c = 0,56$ para um cimento Portland tipo CP IV-RS-32 e CP II-E-40 para a obtenção de uma resistência característica a compressão (f_{ck}) na faixa de 20 MPa (Grupo 1 de resistência segundo a NBR 6118:2014). Selecionou-se estes cimentos pela sua resistência a agregados reativos e pela sua ampla utilização no mercado ludovicense.

Calculou-se as composições de RB para substituição do agregado miúdo nas porcentagens de 30%, 50% e 60%, pois Santos (2012), em seu teste, afirmou que os melhores resultados foram com tais substituições.

Pesou-se os insumos para a confecção do concreto em massa, mantendo o desvio padrão dos resultados igual a 4,0. Logo em seguida, misturou-se os insumos.

Confeccionou-se 10 corpos de prova 10 cm x 20 cm para cada composição, compreendendo as idades de controle de 3, 7 e 28 dias (total de 40 corpos de prova). Realizou-se cura por imersão.

Realizou-se ensaio de compressão uniaxial executado em uma Prensa Eletrohidráulica, fabricada pela ENGETOTUS com capacidade máxima de 100 toneladas, código 300420.

Após o rompimento dos corpos de prova, recolheu-se amostras para análise de FRX a fim de conhecer a composição do mesmo após os 28 dias de cura. Em seguida foram coletados os resultados para as conclusões do trabalho.

3.2.3 Procedimento

Inicialmente, calculou-se através da Eq. 1 e Eq. 2 a composição necessária para a confecção dos corpos de prova produzidos por uma betoneira seguindo o modelo de cálculo da ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland.

$$C = \frac{1000 \cdot V_{concreto}}{\left(\frac{1}{\rho_{cimento}} + \frac{1}{\rho_{areia}} + \frac{1}{\rho_{brita\ 1}} + \frac{a}{c} \right)} \quad (\text{Eq.1})$$

$$f_{cj} = f_{ck} + 1,65 \cdot S_d \quad (\text{Eq.2})$$

No entanto, houve a segregação da RB maior que 2% do volume de concreto, limite observado na NBR 12655:2006 e fixação do mesmo nas paredes da betoneira, impossibilitando a mistura homogênea do material. Tal comportamento deu-se devido à semelhança do material com um silte ou argila. Dessa forma, adotou-se o processamento manual, utilizando colher de pedreiro e masseira, representadas na Figura 6a (material anidro) e Figura 6b (material com água parte da água já

adicionada). Cada material foi pesado e utilizado segundo as proporções apresentadas no item 4.

Figura 6a – Confeção manual do concreto com RB



Fonte: O autor

Figura 6b - Confeção manual do concreto com RB



Fonte: O autor.

Para a confecção dos corpos de prova, utilizou-se as orientações da NBR 5738: 2015 – Concreto: procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Foram utilizados moldes de plástico com disco de fundo de neoprene, representado na Figura 7.

Figura 7 – Moldes dos corpos de prova



Fonte: O autor.

Após a moldagem, esperou-se 24 horas e iniciou-se a cura por imersão (Figura 8) até que se atingisse as idades de controle de 3, 7 e 28 dias de idade.

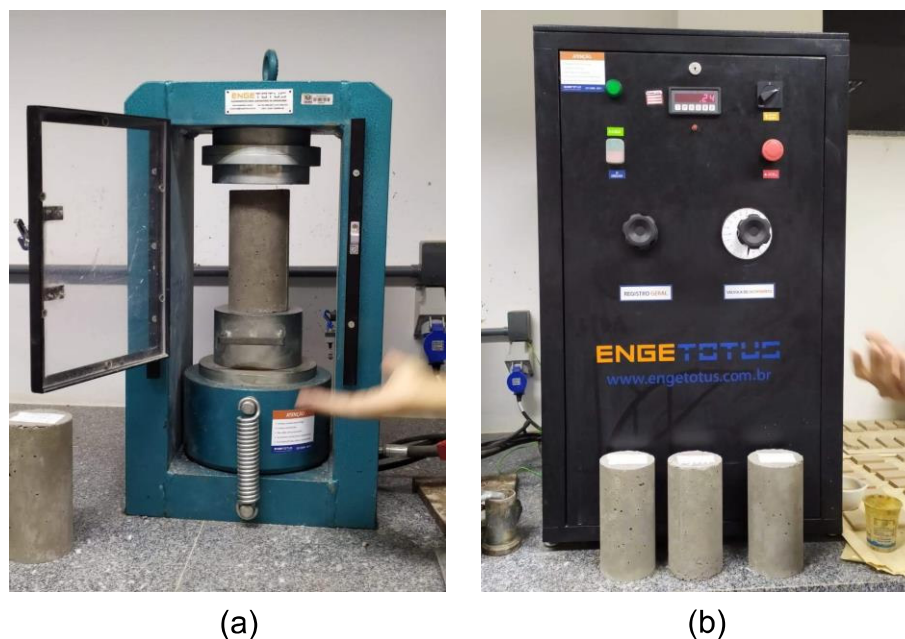
Figura 8 – Realização de cura por imersão



Fonte: O autor.

Após a retirada dos corpos de prova nas idades determinadas, levou-se os corpos de prova para o procedimento de ensaio de compressão uniaxial em uma Prensa Eletrohidráulica, fabricada pela ENGETOTUS com capacidade máxima de 100 toneladas, código 300420, Figura 9a e Figura 9b.

Figura 9 - Prensa Elétrica para Concreto de 100 toneladas



Fonte: O autor.

Após os rompimentos, realizou-se a conversão do valor máximo de carga suportada (“*tf*” –Tonelada Força) para unidade de tensão (“*MPa*” – Mega Pascal). Por fim, coletou-se amostras dos corpos de 28 dias para análise química por FRX.

3.3 Resultados

Para a primeira etapa de ensaios com as dosagem de concreto, utilizou-se Cimento Portland tipo CP IV-RS-32, para as composições de 0%, 30%, 50% e 60% de RB, como apresentado no Quadro 4, na Figura 10, Figura 11 e Figura 12.

Quadro 4 - Composição das dosagens de concreto em volume

Nome	RB%	Cimento	Areia	Brita	RB
A1	0%	1	4	1,5	0
A2	30%	1	2,8	1,5	1,2
A3	50%	1	2	1,5	2
A4	60%	1	1,6	1,5	2,4

Fonte: O autor.

Figura 10 - Corpos de Prova com composições de 30% e 50% de RB



Fonte: O autor.

Figura 11 - Corpos de prova com composição de 60% de RB



Fonte: O autor.

Figura 12 - Corpo de prova com composição de 60% de RB



Fonte: O autor.

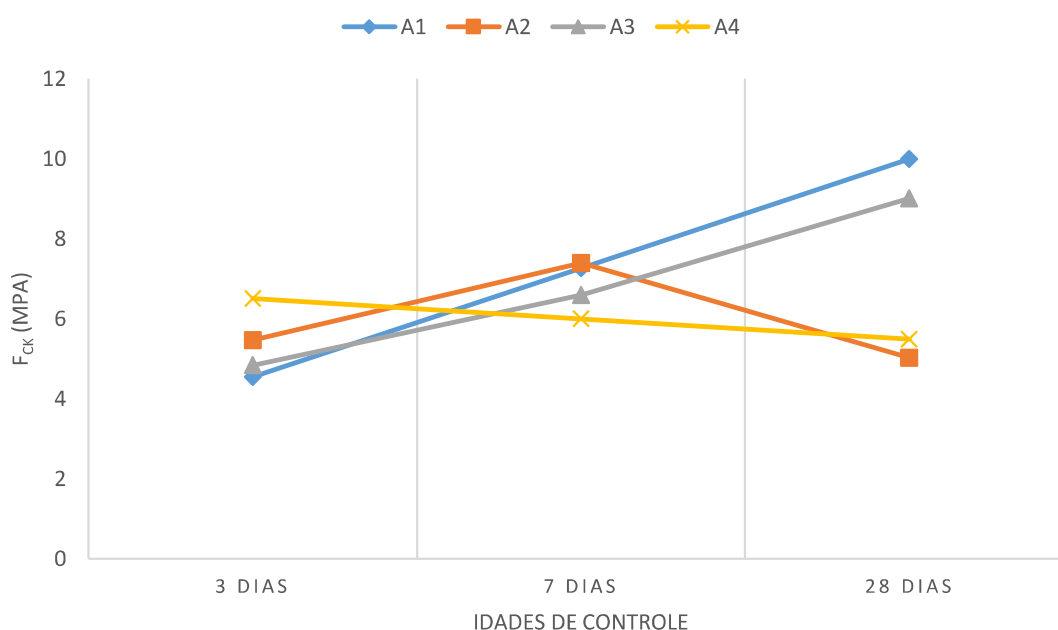
Após feito os ensaios de resistência a compressão uniaxial, teve-se como resultado os dados do Quadro 5 e no Gráfico 2 levando-se em conta as idades de 3, 7 e 28 dias de idade.

Quadro 5 – Resultado de resistência a compressão do concreto com CP IV-RS-32 (em MPa)

Nome	RB	3 dias	7 dias	28 dias
A1	0%	4,54	7,26	9,99
A2	30%	5,46	7,39	5,02
A3	50%	4,83	6,60	9,01
A4	60%	6,50	5,99	5,49

Fonte: O autor.

Gráfico 2 - Resistência a compressão do concreto com CP IV-RS-32 dentro das idades de controle



Fonte: O autor.

Pode-se observar que as dosagens com composição de 30% e 50% de RB tiveram aumento de resistência com o tempo, ao contrário da composição de 60%. Observa-se, da mesma forma, que a composição de 30% de RB teve um aumento de resistência superior ao 0% de RB até a idade de 7 dias, havendo queda da mesma

logo em seguida, provavelmente por causa de falta de adensamento adequado dos demais corpos de prova. Já a de 50% manteve seu crescimento.

Analisou-se a composição do concreto com CP IV-RS-32 através de FRX, e obteve-se os resultados mostrados no Quadro 6.

Quadro 6 - Análise química por Fluorescência de Raios-X (FRX) do concreto com CP IV-RS-32

Amostras	A1 (0%)	A2 (30%)	A3 (50%)	A4 (60%)
Al₂O₃	5,3	8,59	9,2	9,63
SiO₂	69,29	61,28	57,07	58,41
Fe₂O₃	2,14	5,72	8,29	8,24
TiO₂	0,24	0,53	8,29	8,24
Ga₂O₃	0	0	0,0009	0,0015
MnO	0,026	0,067	0,034	0,028
ZrO₂	0,025	0,054	0,08	0,073
Na₂O	1,108	2,252	2,829	2,829
CaO	12,099	14,319	13,468	12,63
SO₃	0,562	0,746	0,622	0,594
P₂O₅	0,157	0,1	0,154	0,149
V₂O₅	0,025	0,032	0,036	0,037
Cr₂O₃	0,011	0,013	0,014	0,014

Fonte: Alumar (2019).

Nota-se um ápice de Sulfato (SO₃) na composição de 30% de RB e sua conseguinte queda com o aumento da adição de lama. Como de se esperar, o silicato (SiO₂) apresenta decaimento com a substituição de areia por RB, pois retira-se areia da mistura. Outro ponto importante a ser considerado foi a queda de níveis de Óxido

de Sódio (Na_2O), também conhecido como *Soda Cáustica*, se comparado com a RB puro.

No entanto, o concreto desenvolvido com CP IV-RS-32 não teve resistência suficiente para ser considerado como estrutural, como previsto na NBR 6118:2014. Assim, propôs-se uma alteração na dosagem do concreto, alterando também o tipo de cimento devido à escassez de recursos, utilizando um CP II-E-40, como apresentado no Quadro 7. Diminuiu-se a taxa de argamassa da dosagem padrão para o aumento do fator de empacotamento do concreto bem como sua resistência. Analisou-se as composições de 0%, 30% e 60% de RB.

Quadro 7 - Composição das dosagens do concreto com CP II-E-40 em volume

Nome	RB	Cimento	Areia	Brita	RB
B1	0%	1	3	2	0
B2	30%	1	2,1	2	0,9
B3	60%	1	1,2	2	1,8

Fonte: O autor.

Observa-se que em comparação as composições de 30% e 50% de RB com o CP IV-RS-32, a de 60% de RB apresentou grande deficiência em trabalhabilidade ocasionada pela retenção de água do próprio resíduo, sendo necessário adotar-se uma outra relação *a/c*. Essa alteração realizou-se através da adição de água em quantidade suficiente para que houvesse trabalhabilidade mínima na mistura de insumos, medindo a água em uma proveta e pesando a mesma para que se encontrasse a relação. Dessa forma, para a composição de 60%, o fator *a/c* resultou em 0,73. A alteração, embora tenha cumprido seu papel de proporcionar trabalhabilidade, resultou em diminuição da resistência do concreto.

Após serem confeccionados os corpos de prova, como apresentado na Figura 13, foram realizados os ensaios de compressão uniaxial, Figura 14.

Figura 13 - Corpos de Prova 10 x 20 cm com composição de 0%, 30% e 60% de RB com CP II-E-40



Fonte: O autor.

Figura 14 - Corpos de prova em ensaio de compressão uniaxial e após o rompimento



Fonte: O autor.

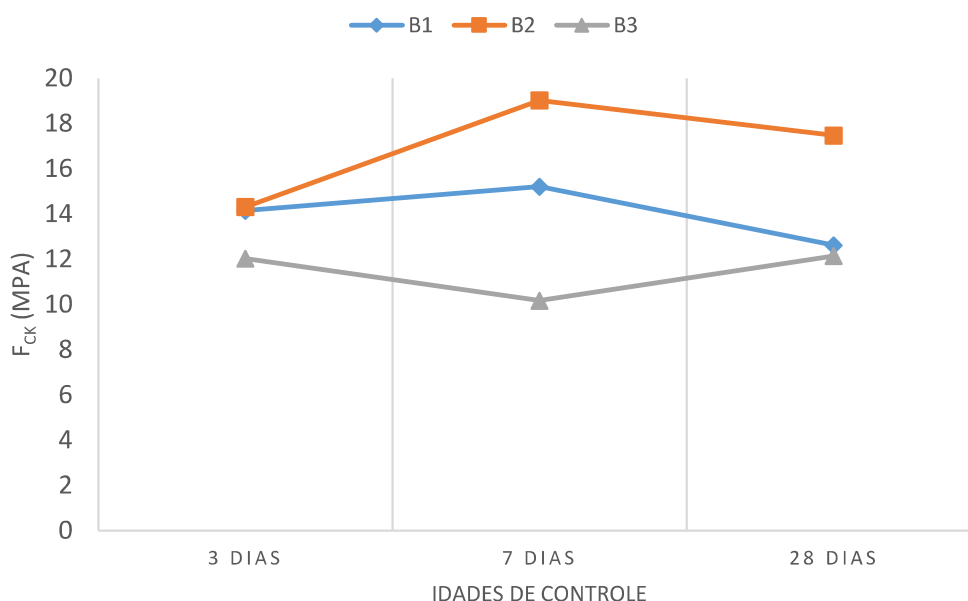
Os resultados obtidos estão representados no Quadro 8 e Gráfico 3:

Quadro 8 - Resultado de resistência a compressão do concreto com CP II-E-40 (em MPa)

Nome	RB%	3 dias	7 dias	28 dias
B1	0%	14,15	15,21	12,62
B2	30%	14,31	19,02	17,48
B3	60%	12,03	10,17	12,14

Fonte: O autor.

Gráfico 3 - Resistência a compressão do concreto com CP II-E-40 dentro das idades de controle.



Fonte: O autor.

Percebe-se uma nítida superioridade de resistência em comparação com a série A, embora haja um decaimento da mesma ao longo do tempo. Como resultado mais promissor, a composição de 30% chegou a resultados próximos dos previstos por norma para concreto estrutural. Cabe-se a análise de lixiviação e solubilidade para entender as possíveis razões que levaram as amostras a esse decaimento.

Liu et al (2016) afirma que a adição do resíduo de bauxita no concreto produz um incremento de resistência tração e a compressão, diminuindo a segregação e a exsudação do concreto, bem como a retração por secagem.

Outro ponto a ser observado são as possíveis reações álcalis-agregados e de carbonatação do concreto, reações que causam redução da capacidade resistiva do concreto a esforços de compressão.

No entanto, Ribeiro (2012) ressalta que a adição de resíduo de bauxita não aumenta a Reação Álcalis-Sílica (RAS), o que pode estar associado a uma diluição do teor de cimento, visto que o cálcio é fundamental no mecanismo da RAS e ainda destaca ainda que para uma adição de 30%, a expansão aos 28 dias ficou a baixo de 0,20%

O autor apresenta ainda que as reações expansivas dos álcalis presentes no resíduo de bauxita (Na^+ e Ca^+) não comprometem o uso deste resíduo em substituição parcial do cimento Portland para aplicações secundárias. Refere-se da mesma forma que a avaliação da carbonatação do concreto com adição de RB torna-se viável e reproduzível com a utilização de câmara de carbonatação, visto que este fenômeno despende de muito tempo.

No que se refere a resistência à compressão, Franco et al (2014) ressalta que a adição de resíduo de minério mostra-se viável em substituição ao agregado miúdo natural. O autor defende que, por ser um material muito fino, verificou-se que a sua utilização é favorável como fíler, na medida em que há uma redução dos poros do concreto, conferindo uma propriedade de isotropia ao compósito, tendo em vista que a composição se torna mais homogênea.

4. CONCLUSÃO

Diante dos dados apurados em todos os ensaios, destaca-se que a composição que apresentou maior resistência mecânica à compressão uniaxial foi a de 30% de substituição com CP II-E-40, aos 7 dias de cura submersa. Quanto à razão de tal resultado, cabe-se estudos mais aprofundados, pois há margem para diversas hipóteses, dentre elas a de um maior empacotamento devido a granulometria da lama, fornecendo maior resistência e proporcionando isotropia ao material, dado similar ao apresentado no trabalho de Franco et al (2014). No entanto, na composição de 30% de substituição com CP II-E-40 notou-se queda de resistência aos 28 dias de idade, bem como com o CP IV-RS-32.

Outro ponto significativo foi a redução dos níveis de Soda Cáustica na série A se comparado com o resíduo de bauxita em seu estado puro. Fato este que pode promover o uso do material como insumo na construção civil sem que o mesmo seja contaminante ao meio externo. Entretanto, os dados obtidos não são suficientes para tal conclusão efetiva, cabendo replicação do ensaio em larga escala juntamente com análises de lixiviação e solubilidade.

Baseando-se no trabalho de Ribeiro (2012), abre-se a hipótese de haver sim uma possível reatividade do resíduo, necessitando de ensaios de Difração de Raios-X, solubilidade e lixiviação, visto que o material apresenta taxas de álcalis consideráveis, dependendo de seu processamento.

5. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros, visa-se:

- Realizar ensaio de lixiviação e solubilidade no concreto analisado nesse trabalho a fim de averiguar sua viabilidade para fins cotidianos.
- Verificar o impacto no preço entre a substituição de RB na areia ou no cimento (como Fíler);
- Investigar a possibilidade da adequação do RB como Fíler em diferentes cimentos, pois há uma aproximação de densidades.
- Investigar a possibilidade de adequação do RB no concreto armado.

REFERÊNCIAS

ALCOA. **Relatório de sustentabilidade**. 2015. Disponível em: <https://www.alcoa.com/brasil/pt/pdf/relatorios-sustentabilidade/Alcoa_RS2015.PDF> Acesso em 22/11/18 às 11:00h

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5736**: Cimento Portland Pozolânico. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR NM 66**: Agregados – Constituintes mineralógicos dos agregados naturais – Terminologia. Rio de Janeiro, 1996.

_____. **NBR 5738**: Concreto – procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 9935**: Agregados – Terminologia. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR 10004**: Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento – Procedimento. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR 11578**: Cimento Portland composto. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. **Bauxita no Brasil**. Associação Brasileira do Alumínio. São Paulo. 2017. Disponível em: <http://www.abal.org.br/downloads/ABAL_Relatorio_Bauxita_2017_1.pdf>. Acesso em 22/11/18 às 10:29h

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO. **A indústria do alumínio: estrutura e tendências**. Biblioteca Digital, 2017. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/2499/3/A%20BS%2033%20A%20ind%C3%BAstria%20do%20alum%C3%ADnio_estrutura%20e%20tend%C3%A2ncias_P.pdf> Acesso em 22/11/18 às 10:29h

CAPELLI, Renata Brazzarella. **Comparação de métodos na análise granulométrica de resíduos de mineração**. 2017. 31 f. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

CETEM/MCT. Rochas & Minerais Industriais. In: DA LUZ, A. B.; LINS, A. F. **Rochas & Minerais Industriais**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2005. Cap. 11, p. 279-304.

CHAVES, A. G. F., **A lama vermelha e sua eliminação da fábrica de alumina**, In: 2º Semana de Estudos. Alumínio e Zinco. Sociedade de Intercâmbio Cultural e Estudos Geológicos dos Alunos da Escola de Minas de Ouro Preto, n. 2, Ouro Preto, Minas Gerais, 1962.

DE SÁ, E. S. S.; SANTOS, W. M. T. **Avaliação das fases cristalina usando lama vermelha na composição de concreto**. 2015, 6f, Bacharelado Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia, Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2015.

FRANCO, L. C., SANTOS, D. H., ROSA, P. P. G., SILVA, G. J. B., PEIXOTO, R. F. **Aplicação de resíduo de mineração como agregado para a produção de concreto**. In: Anais do 56 Congresso Brasileiro do Concreto, ISSN 2175-8182. p. 2175-8182. 2014.

GOOGLE. Google Earth. Version 10.29.1. 2019. **Nota (lagoas de estocagem de lama vermelha - ALUMAR)**. Disponível em: < <https://www.google.com.br/maps/@-2.7218498,-44.3055088,2534m/data=!3m1!1e3>>. Acesso em: 15/09/2019.

HIND, R. A., BHARGAVA, S. K., GROCCOTT, S. C., “*The surface chemistry of Bayer process solids: a review*”, **Colloids and surfaces A: Physicochemical and engineering aspects**, n. 146, pp.359-374, 1999.

HUANG, X.; RANADE, R.; VICTOR, C. LI, F. *Feasibility Study of Developing Green ECC Using Iron Ore Tailings Powder as Cement Replacement*. **Journal Of Materials In Civil Engineering**. 2013.

KIRKPATRICK, D.B., “*Red mud product development*”, **The Minerals, Metals & Materials Society**, 1996.

LAGE, N. M. **Aproveitamento do resíduo da bauxita da mina de juruti por flotação**. 2018. 35f Monografia (Graduação em Engenharia de Minas) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.

LIU, Ri-Xin; POON, Chi-Sun. Utilization of red mud derived from bauxite in self-compacting concrete. **Journal of cleaner production**, v. 112, p. 384-391, 2016.

MÁRTIRES, R. A. C. **Cap.1. ALUMÍNIO**. Balanço Mineral Brasileiro, 2001. Disponível em: <http://www.dnpm.gov.br/dnpm/paginas/balanco-mineral/arquivos/balanco-mineral-brasileiro-2001-aluminio/@@download/file/BALANCO_MINERAL_003_2001.pdf>. Acesso em: 22/11/18 às 09:42h

MERCURY, J. M. R; GALDINO, L. G.; VASCONSELOS, N. S. L. S.. Estudo do comportamento térmico e propriedades físico-mecânicas da lama vermelha. **Revista Matéria**. v. 15, n. 3, p. 445 – 460, 2010

MORAES. R. S., **Análise de sistemas mistos de concreto armado e alvenaria**. 2012 174 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, Universidade Federal de São Carlos, 2012.

PAN, Z., LI, D., YU, J., YANG, N., “*Properties and microstructure of the hardened alkali-activated red mud–slag cementitious material*”, **Cement and Concrete Research**, v. 33, pp. 1437–1441, 2003.

PETRUCCI, E. G. R. **Concreto de cimento Portland**. 13. Ed. Ver. Por Vladimir Antonio Paulon – São Paulo: Globo, 1998

PRADHAN, J., DAS, S. N., DAS, J., RAO, S. B., THAKUR, R.S., “*Characterization of Indian red muds and recovery of their metal values*”, **Light Metals**, pp. 87-92, 1996.

RAMOS, C. R. **Perfil analítico do alumínio**. Ministério das Minas e Energia, Departamento Nacional da Produção Mineral, 1982.

RIBEIRO, D. V. et al. Estudo das reações álcalis-sílica associadas ao uso da lama vermelha em argamassas colantes e de revestimento (*Study of alkali-silica reactions associated with the use of red mud in plastering mortars*). **Cerâmica**, v. 58, p. 90-98, 2012.

RODRIGUES, O. M. S. **Flotação de caulinita em minérios de ferro e bauxíticos**. 2012. 170f, Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e Minas) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2012.

ROSÁRIO, K. A. **Concreto com utilização de agregado graúdo sintético produzido a partir da lama vermelha: estudos de dosagem, propriedades e microestrutura**. 2013. 112f, Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Instituto de Tecnologia: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Belém. 2013.

SANTOS, W. M. T. **Avaliação e uso do subproduto da bauxita do processo Bayer para fabricação de concreto**. 2012. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2012.

SHIMANO, S., KOGA, T., “*Utilization of red mud as raw material for the cement industry*”. **Light Metals**, pp.53-68, 1979.

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**, v. 12, n. 2, pp. 322 – 338, 2007

SINGH, M, UPADHAYAY, S. N., PRASAD, P. M., “*Preparation of iron rich cements using red mud*”, **Cement and Concrete Research**, v. 27, n 7, pp.1037-1046, 1997.

TSAKIRIDIS, P. E., AGATZINI-LEONARDOU, S., OUSTAKADIS, P., “*Red mud addition in the raw meal for the production of cement portland clinker*”, **Journal of Hazardous Materials B116**, pp. 103-110, 2004.