



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas – Departamento de Engenharia Civil
Curso de Graduação em Engenharia Civil

Letícia Figueiredo dos Santos

**AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE TÉCNICA DO
REAPROVEITAMENTO DE REJEITOS DA MINERAÇÃO DE
ALUMINA PARA A CONSTRUÇÃO CIVIL**

Ouro Preto

2020

AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE TÉCNICA DO REAPROVEITAMENTO DE REJEITOS DA MINERAÇÃO DE ALUMINA PARA A CONSTRUÇÃO CIVIL

Letícia Figueiredo dos Santos

Monografia de conclusão de curso para obtenção do grau de Engenheiro Civil na Universidade Federal de Ouro Preto defendida e aprovada em 15 de outubro de 2020 como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro Civil.

Área de concentração: Materiais e Componentes da Construção Civil

Orientador: Prof. D.Sc. Guilherme Jorge Brigolini Silva - UFOP

Co-orientador: M. Sc. Fernanda Pereira da Fonseca Elói – UFOP

Ouro Preto

2020

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

S237a Santos, Leticia Figueiredo.
Avaliação da viabilidade técnica do reaproveitamento de rejeitos da
mineração de alumina para a construção civil. [manuscrito] / Leticia
Figueiredo Santos. - 2020.
67 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Jorge Brigolini Silva.
Coorientadora: Ma. Fernanda Pereira da Fonseca Elói.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Escola de Minas. Graduação em Engenharia Civil .

1. Rejeitos (Metalurgia) - Lama vermelha. 2. Ativação Alcalina. 3.
Cimento - Alcalino. 4. Polímeros - Geopolímeros. 5. Reaproveitamento
(Sobras, refugos, etc.) - Bauxita. 6. Processos de fabricação - Processo
Bayer. 7. Engenharia civil. I. Elói, Fernanda Pereira da Fonseca. II. Silva,
Guilherme Jorge Brigolini. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV.
Título.

CDU 624

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB: 1716

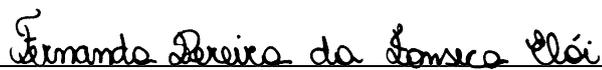
AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE TÉCNICA DO REAPROVEITAMENTO DE
REJEITOS DA MINERAÇÃO DE ALUMINA PARA A CONSTRUÇÃO CIVIL

Letícia Figueiredo dos Santos

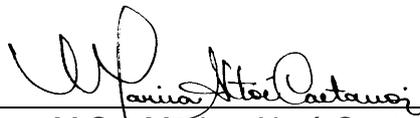
Monografia de conclusão de curso para
obtenção do grau de Engenheiro Civil na
Universidade Federal de Ouro Preto
defendida e aprovada em 15 de outubro de
2020 como parte dos requisitos para a
obtenção do Grau de Engenheiro Civil.
Banca examinadora:



Orientador: Prof. D.Sc. Guilherme Jorge Brigolini Silva - UFOP



Co-orientador: M. Sc. Fernanda Pereira da Fonseca Elói – UFOP



Membro: M.Sc. Marina Altoé Caetano – UFOP



Membro: M.Sc. Vanessa Pereira Santana – UFOP

RESUMO

A indústria da construção civil é uma das maiores responsáveis pela emissão de gases do efeito estufa. Somente a produção de cimento Portland é responsável por aproximadamente 8% do total de emissões globais de CO₂. Outro fator preocupante é a procura por uma destinação adequada aos resíduos gerados por diversas indústrias. Dentre esses resíduos, vale destacar os resíduos da indústria extrativa da bauxita, a lama vermelha e a areia ferrosa, que vêm se mostrando grandes desafios da indústria de alumínio. Considerando os grandes impactos gerados pela indústria do cimento e a grande disponibilidade destes resíduos, o presente trabalho visa a utilização de rejeitos da mineração de alumina extraídos de uma barragem na região de Ouro Preto – MG para produção de aglomerantes a partir da ativação alcalina. Inicialmente, os resíduos foram caracterizados fisicamente por granulometria a laser e quimicamente por FRX, além de caracterizados em termos de massa específica e área superficial específica segundo as recomendações técnicas e normativas. A partir do entendimento do comportamento físico destes materiais, que possuem como principais constituintes Fe₂O₃ e Al₂O₃, foram fabricados inicialmente protótipos para estabelecer os melhores traços adotados em termos de temperatura de cura e proporções de mistura. Obtidos os melhores traços para o aglomerante, o mesmo foi avaliado acerca de sua retração, massa específica e absorção de água e caracterizado mecanicamente em acordo com as recomendações normativas, pela sua resistência à compressão e resistência à tração na flexão. Foram produzidos traços com areia lavada de rio para fins comparativos. Foram obtidos materiais normativamente viáveis e com resistência máxima à compressão de 7,3 MPa. Baseado nos ensaios realizados, o aglomerante desenvolvido apresenta potencial para aplicação como tijolo para alvenaria estrutural, tijolo maciço nas categorias de resistência A, B e C e bloco de vedação. Finalmente, buscou-se contribuir para o aperfeiçoamento das técnicas construtivas, bem como para o desenvolvimento tecnológico, econômico e ambiental da indústria de construção civil.

Palavras-chave: Lama vermelha, Ativação Alcalina, Cimento Alcalino, Geopolímeros, Resíduo de Bauxita, Processo Bayer.

ABSTRACT

The construction industry is one of the biggest responsible for greenhouse gases. The production of Portland cement itself, responds to approximately 8% of the global emissions. Another preoccupying factor is the lack of an appropriate destination for residues generated by all types of industrial processes. Among these residues, it is important to highlight the Bayer process residues: the bauxite tailings, also known as red mud, and the ferrous sand. They represent an important and extensive challenge for the aluminium mining companies. Considering the huge environmental impacts caused by the cement industries and the huge availability of these mining tailings, the present work pretends to recycle aluminium tailings extracted from a mining tailings dam in the region of Ouro Preto – MG, Brazil, through the production of alkaline activated binders. Initially, the physical and chemical properties of the residues were analysed by laser granulometry and FRX. Their specific mass and specific surface areas were analysed by the normative techniques. From the knowledge of the behavior of the materials, which are majorly compounded by Fe_2O_3 and Al_2O_3 , were manufactured hardening prototypes to determine the best curing temperatures and mixing ratios. The best results were manufactured in normative size with the Bayer sand and river sand for comparison. The results were evaluated by the retraction, specific mass, water absorption and flexural and compressive strength. The materials presented suitable performances for all the tests performed in the present work and the highest compressive strength obtained was 7,3 MPa. Based on the laboratory tests performed, the binders show potential uses as structural elements, compact bricks in the strength categories A, B and C and sealing blocks. Finally, these results show the viability of the alkaline activation procedures and contributes to the technological development of new, sustainable and smart construction materials.

Keywords: Red mud, Alkaline activation, Alkaline cements, Geopolymers, Bauxite tailings, Bayer process.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Distribuição percentual das substâncias minerais nas exportações brasileiras em 2017. Fonte: (IBRAM, 2017).	4
Figura 2 – Distribuição da arrecadação de CFEM no primeiro semestre de 2017. Fonte: (DNPM, 2017).	5
Figura 3 – Levantamento de acidentes e incidentes. Informações da ANA, adaptado por (FONSECA, 2019).....	6
Figura 4 – Distribuição das barragens em relação ao uso principal. Fonte: (ANA, 2017).	7
Figura 5 – Esquema explicativo do processo Bayer. Fonte: (WAO, 2010).	9
Figura 6 – Mecanismo de reação. Adaptado de: (DUXSON, 2007).....	14
Figura 7 – LV em seu estado natural. Fonte própria.....	16
Figura 8 – LV seca para caracterização. Fonte própria.	16
Figura 9 – Hidróxido de sódio em pérolas. Fonte: (VITRILAB, 2019).	17
Figura 10 – Amostra de AR em seu estado natural. Fonte própria.	17
Figura 11 – Amostra de AF em seu estado natural. Fonte própria.	18
Figura 12 – Esquema de ensaios e análises realizadas.	20
Figura 13 – Argamassadeira de mesa. Fonte própria.....	22
Figura 14 – Curva de Distribuição Granulométrica da AR. Fonte própria.	29
Figura 15 – Curva de Distribuição Granulométrica da AF. Fonte própria.	29
Figura 16 – Massa específica dos materiais. Fonte própria.....	30
Figura 17 – Protótipos (a) 80°C; (b) 100°C. Fonte própria.....	31
Figura 18 – Relação entre as retrações para os protótipos. Fonte própria.	32
Figura 19 – Massa específica dos corpos de prova. Fonte própria.....	34
Figura 20 – Resistência à tração na flexão – AR. Fonte própria.....	35

Figura 21 – Resistência à tração na flexão – AF.	35
Figura 22 – Corpos de prova de LV pura. Fonte própria.....	36
Figura 23 – Resistência à compressão – AR. Fonte própria.....	37
Figura 24 – Resistência à compressão – AF. Fonte própria.	37
Figura 25 – Absorção de água – AR. Fonte própria.....	39
Figura 26 – Absorção de água – AF. Fonte própria.	40
Figura 27 – Absorção de água dos traços com retração adequada. Fonte própria.	41
Figura 28 – Resistência à compressão dos traços com retração adequada. Fonte própria.	42
Figura 29 – Corpos de prova (a) GRM-10-AF 1:3:0,2 e (b) GRM-12-AF 1:3:0,2. Fonte própria.....	43
Figura 30 – Corpos de prova (a) GRM-6-AR 1:3:0,4 e (b) GRM-6-AR 1:3:0,2. Fonte própria.	44
Figura 31 – Corpos de prova (a) GRM-10-AR 1:3:0,2 e (b) GRM-12-AR 1:3:0,2. Fonte própria.....	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química de cimentos antigos. Fonte: (PINTO, 2006). ..	13
Tabela 2 – Análise química dos materiais.	27
Tabela 3 – Granulometria da LV.	28
Tabela 4 – Resultado dos protótipos com diferentes temperaturas.	31
Tabela 5 – Retração dos corpos de prova.	33
Tabela 6 – Categorias de resistência à compressão. Fonte: NBR 7170 (ABNT, 1983)	38
Tabela 7 – Traços viáveis normativamente.	42

LISTA DE SIGLAS

AF – Areia Ferrosa

AR – Areia Lavada de Rio

ANA – Agência Nacional das Águas

ANM – Agência Nacional de Mineração

CFEM – Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais

DPNM – Departamento Nacional de Produção Mineral

FRX - Fluorescência de Raios X

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração

LV – Lama Vermelha

PIB – Produto Interno Bruto

PVC - Policloreto de Vinila

LISTA DE SÍMBOLOS

Al_2O_3 – Óxido de alumínio (alumina)

$Al_2O_3 \cdot 3H_2O$ – Gibbsita

$\gamma - Al_2O_3 \cdot H_2O$ – Boehmita

$\alpha - Al_2O_3 \cdot H_2O$ – Diásporo

$NaOH$ – Hidróxido de sódio

Fe_2O_3 – Óxido de ferro

SiO_2 – Dióxido de silício

Na_2O – Óxido de sódio

TiO_2 – Dióxido de titânio

CaO – Óxido de cálcio

P_2O_5 – Pentóxido de fósforo

SO_3 – Óxido sulfúrico

K_2O – Óxido de potássio

MnO – Óxido de manganês

SUMÁRIO

1	Introdução	1
1.1	Objetivo Geral	2
1.2	Objetivos Específicos	2
2	Revisão Bibliográfica.....	4
2.1	Aspectos econômicos e sociais da mineração no Brasil	4
2.2	Barragens de rejeito	6
2.3	Extração do alumínio	8
2.4	Processo Bayer e resíduos da indústria de alumina	8
2.5	Ativação alcalina	12
2.6	Propriedades dos aglomerantes alcalinos	15
3	Materiais.....	16
3.1	Lama vermelha	16
3.2	Solução de hidróxido de sódio	17
3.3	Areia lavada de rio	17
3.4	Areia ferrosa	18
4	Metodologia.....	19
4.1	Análise química	19
4.2	Distribuição granulométrica	19
4.3	Área superficial específica	19
4.4	Massa específica	19
4.5	Moldagem e cura dos protótipos	20

4.6	Moldagem e cura dos corpos de prova	22
4.7	Retração dos corpos de prova	23
4.8	Massa específica dos corpos de prova	24
4.9	Resistência à tração na flexão	25
4.10	Resistência à compressão	25
4.11	Absorção de água	25
4.12	Avaliação da viabilidade normativa	26
5	Resultados e Discussões	27
5.1	Análise química	27
5.2	Distribuição granulométrica	28
5.3	Área superficial específica	30
5.4	Massa específica	30
5.5	Enrijecimento e retração dos protótipos	31
5.6	Retração dos corpos de prova	32
5.7	Massa específica dos corpos de prova	34
5.8	Resistência à tração na flexão	35
5.9	Resistência à compressão	37
5.10	Absorção de água	39
5.11	Avaliação da viabilidade normativa	41
6	Conclusão	45
6.1	Sugestões para trabalhos futuros	46
	Referências.....	47

1 INTRODUÇÃO

O alumínio é um elemento metálico utilizado de forma extensiva devido às suas propriedades, como resistência à corrosão, leveza, maleabilidade, condutividade de calor e eletricidade e facilidade de reciclagem. Em 2015 o alumínio foi a principal *commodity* brasileira (ABAL, 2019).

O refino do alumínio estabeleceu-se em 1888 pelo processo Bayer, idealizado por Karl Josef Bayer (HIND, 1999). O refino é feito a partir do minério de bauxita, que oferece amplas vantagens devido à possibilidade de lavra a céu aberto e a poucos metros abaixo do solo.

Durante a moagem da bauxita e sua adequação granulométrica, é gerado um resíduo denominado areia ferrosa. Após a digestão alcalina no processo Bayer, a alumina é obtida a partir da clarificação da bauxita e é gerado um rejeito denominado lama vermelha, depositado em lagoas de rejeitos e barragens, demandando impermeabilização adequada devido aos elevados valores de hidróxido de sódio no material (SILVA FILHO, 2007).

São produzidas anualmente 120 milhões de toneladas de lama vermelha, totalizando cerca de 2,7 bilhões de toneladas em 2013 (ABAL, 2019). Devido à praticamente inexistente alternativa de aplicação do rejeito além da sua deposição em lagoas e barragens, a lama vermelha representa um importante problema ambiental.

O aumento da preocupação e receio da população em geral, devido aos sérios desastres ambientais e humanos causados pela ruptura de barragens, como o da barragem de Fundão de Bento Rodrigues em 2015 e da Mina do Feijão de Brumadinho em 2019, faz com que uma alternativa à deposição de rejeitos da mineração seja cada vez mais almejada. Paralelamente, tem-se a indústria da construção civil como grande consumidora de matéria-prima. No Brasil, cerca de 75% do que se extrai do meio ambiente é consumido nesse setor (VGV, 2010).

Diante deste cenário, a aplicação destes resíduos industriais como matéria prima pela indústria da construção civil se torna uma alternativa para a redução da extração

de recursos naturais com conseqüente redução do volume de rejeitos de mineração depositados em barragens (BORGES, 2007).

A ativação alcalina destes rejeitos surge como uma alternativa mais sustentável se comparada aos materiais de construção convencionais, além de resultar em compósitos com rápido desenvolvimento de resistência mecânica, resistência ao fogo, estabilidade dimensional e boa aderência a agregados e reforços (DAVIDOVITS, 1994, 2015).

Inicialmente o processo de ativação alcalina era aplicado a materiais naturais, como o caulim. Porém, as matérias-primas logo se estenderam a materiais secundários e subprodutos industriais, podendo citar as escórias de alto forno, cinzas industriais, cerâmicas e rejeitos de mineração (SÁNCHEZ, 2011, VAN JAARSVELD, VAN DEVENTER e LUKEY, 2004).

Diante deste cenário, o presente trabalho propõe uma alternativa para a destinação final dos resíduos da indústria de alumina através do desenvolvimento de novos materiais aglomerantes através da ativação alcalina dos rejeitos. Como consequência, almeja-se a redução do volume final de deposição em pilhas e barragens.

1.1 Objetivo Geral

Avaliação da viabilidade técnica da produção de compósitos aglomerantes, tendo como precursores os rejeitos da mineração de alumina: lama vermelha e areia ferrosa.

1.2 Objetivos Específicos

I. Caracterização física e química da lama vermelha, da areia ferrosa e da areia lavada de rio;

II. Avaliação da melhor concentração do reagente, proporção de agregados, temperatura de cura e tempo de cura em protótipos reduzidos;

III. Produção de corpos de prova prismáticos com os melhores resultados apresentados nos protótipos reduzidos;

IV. Caracterização dos corpos de prova e determinação das propriedades mecânicas do compósito alcalino-ativado;

V. Avaliação da viabilidade técnica e normativa da utilização de rejeitos na produção de tijolos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Aspectos econômicos e sociais da mineração no Brasil

O Brasil é um país de grande extensão territorial, sendo o maior país da América Latina e o quinto maior país do mundo, com mais de 8,5 milhões de km² (IBGE, 2019). O território possui grande diversidade de formações geológicas, tornando o país um dos principais produtores mundiais de minério, detentor de reservas de caulim, grafita, bauxita, talco vermiculita, estanho, magnesita, ferro e manganês (IBGE, 2019).

A exportação de bens minerais em 2017 teve um volume superior a 403 milhões de toneladas, representando 13% das exportações totais do país e 30,5% do saldo comercial (IBRAM, 2017). O bem mineral mais exportado foi o minério de ferro, seguido do ouro, ferronióbio, cobre, bauxita, manganês, pedras naturais e de revestimento, caulim e outros, somando U\$32 bilhões (IBRAM, 2017), conforme a Figura 1.

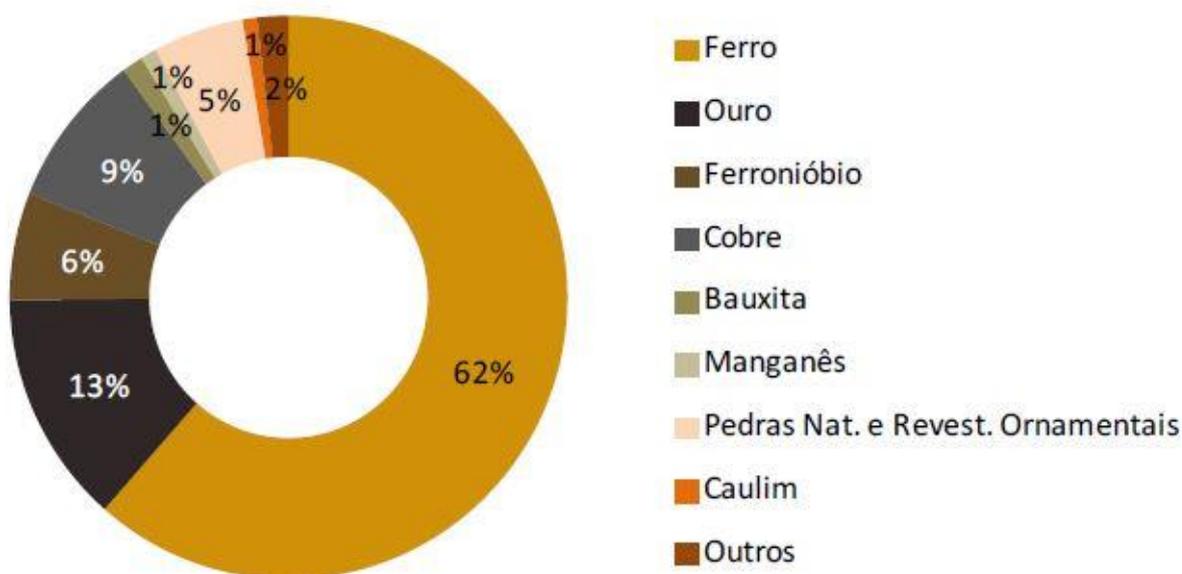


Figura 1 – Distribuição percentual das substâncias minerais nas exportações brasileiras em 2017. Fonte: (IBRAM, 2017).

As atividades da indústria extrativa de minerais representam 1,4% do PIB do país, sendo fator economicamente importante e empregando mais de 180 mil trabalhadores

diretamente (IBGE, 2010-2014). O fator multiplicador dos postos de trabalho da indústria de extrativismo mineral para a indústria de transformação mineral é de 1 para 3,6 postos de trabalho, significando que ao final do ano de 2017, este setor somava cerca de 651 mil trabalhadores diretos. Para o restante da cadeia industrial, a relação é de 1 para 11 postos de trabalho, sendo quase 2 milhões de vagas de emprego diretas, indiretas ou induzidas geradas pelo setor de extrativismo mineral (ANM, 2017).

Os estados que mais produziram minério no primeiro semestre de 2017 foram Minas Gerais (44,1%), seguido pelo Pará (37,0%) (DNPM, 2017), conforme a Figura 2.

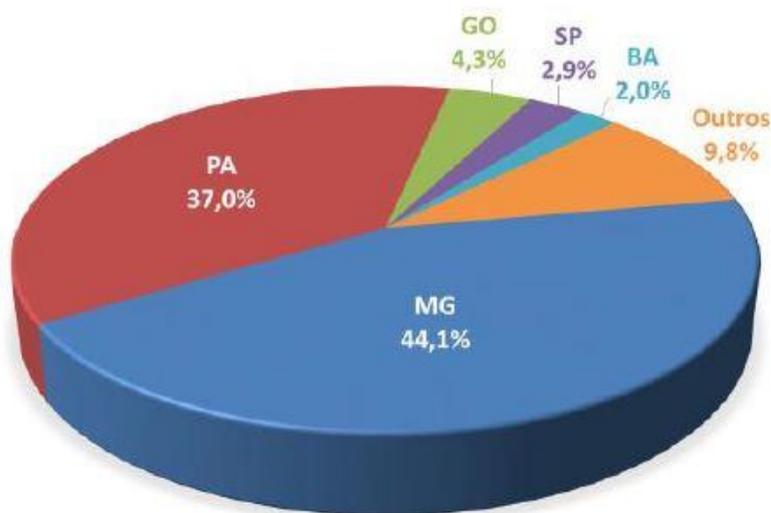


Figura 2 – Distribuição da arrecadação de CFEM no primeiro semestre de 2017.

Fonte: (DNPM, 2017).

O processo de extração mineral nestes estados movimenta sua economia, pelos fatores apresentados anteriormente, e é parte importante e fundamental do cotidiano de sua população (FLÔRES, 2012).

O uso crescente de produtos tecnológicos e o emprego de materiais metálicos nas mais diversas indústrias, desde automobilística até a agropecuária e construção civil, faz com que a mineração represente uma atividade não só economicamente

vantajosa, como também fundamental ao desenvolvimento humano e industrial (FLÔRES, 2012).

2.2 Barragens de rejeito

As barragens de rejeito são o destino final mais adotado no Brasil para os rejeitos da indústria de mineração (CETEM, 2010). Paralelamente ao aumento da capacidade das barragens devido à crescente extração de minérios, têm-se um aumento da preocupação e receio da população em geral, devido aos sérios desastres ambientais e humanos causados pela ruptura destas barragens.

No Brasil, há em média mais de três acidentes com barragens por ano (ANA, 2017). Os acidentes incluem o rompimento de grandes barragens, como o da barragem de Fundão, em Bento Rodrigues, 2015 e da Mina do Feijão, em Brumadinho, 2019, mas também outros eventos de menor espectro, como alagamentos. Segundo o Relatório de Segurança de Barragens, da Agência Nacional das Águas (ANA, 2017), além dos acidentes, foram contabilizados 52 incidentes nos últimos sete anos. Incidentes são ocorrências que podem levar a acidentes. Na Figura 3 é apresentado um levantamento de acidentes e incidentes registrados pela ANA.

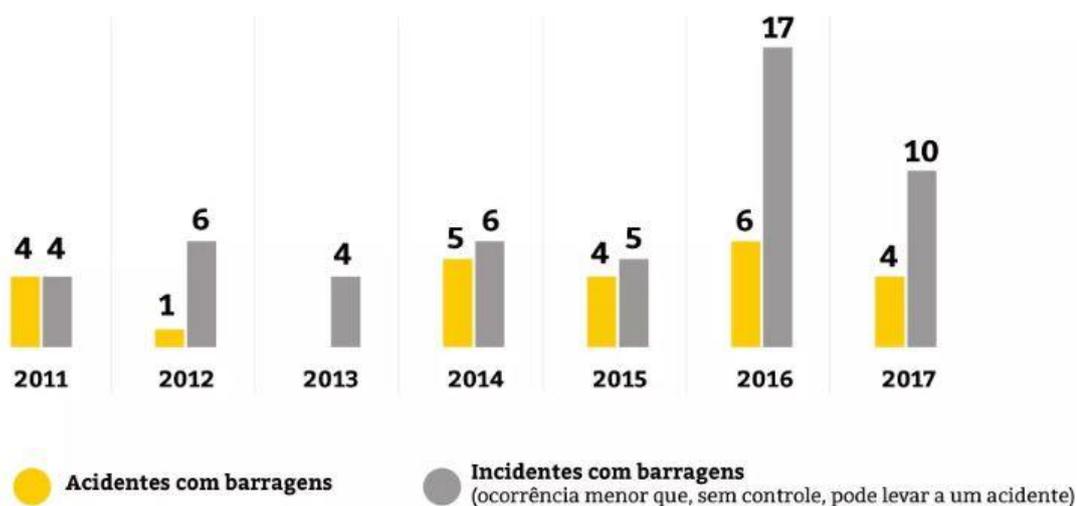


Figura 3 – Levantamento de acidentes e incidentes. Informações da ANA, adaptado por (FONSECA, 2019).

Ainda segundo o mesmo relatório (ANA, 2017), em 2017 o Brasil possuía mais de 24 mil barragens de contenção, sendo a maioria delas ligadas ao setor agrícola, sendo irrigação (41%), dessedentação animal (17%) e aquicultura (11%) os tipos principais. As barragens para contenção de rejeitos de mineração correspondem a cerca de 3,3% do número total de barragens e para contenção de resíduos industriais, 0,2%. Na Figura 4 é apresentada a distribuição das barragens por uso principal.

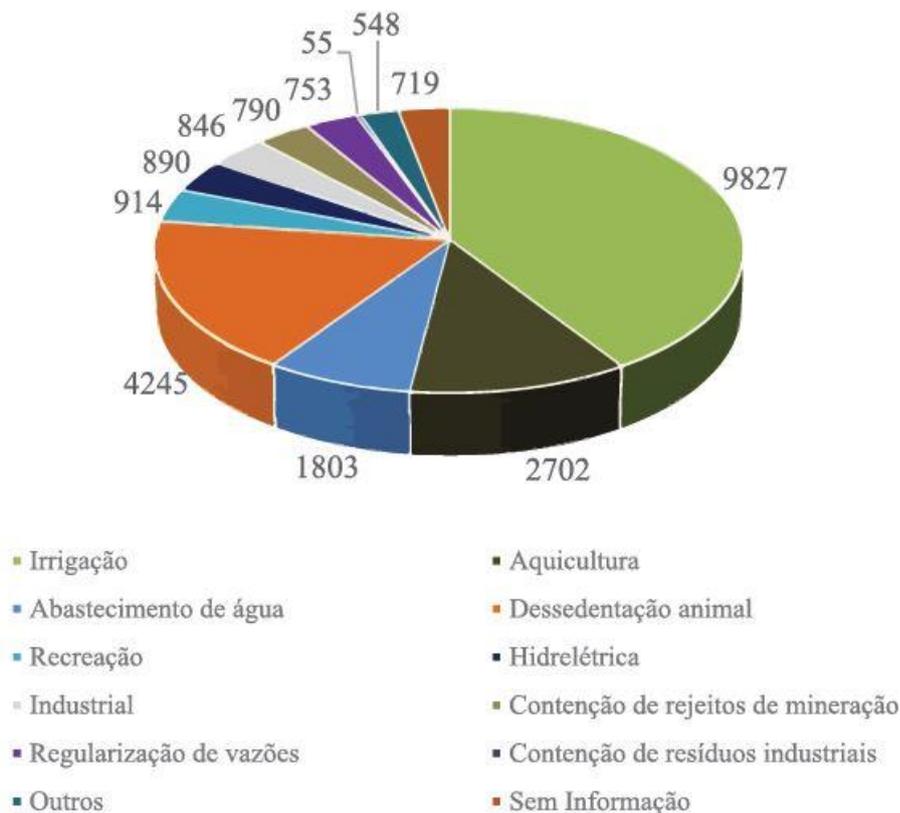


Figura 4 – Distribuição das barragens em relação ao uso principal. Fonte: (ANA, 2017).

O estado de Minas Gerais é o estado com maior número de barragens para contenção de rejeito, seguido pelo estado do Pará. O levantamento das barragens é um dado inconsistente entre as diversas agências de fiscalização (ANA, 2017).

Enquanto no Relatório de Segurança de Barragens (ANA, 2017) são listadas 55 barragens para contenção de rejeitos de mineração no estado de Minas Gerais, no registro da Fundação Estadual de Meio Ambiente – MG, são 691 (FEAM, 2019). Das

691 barragens registradas pela FEAM, 205 são classificadas como classe 3, que são as que apresentam maior risco a pessoas e ao meio ambiente em caso de eventual ruptura.

2.3 Extração do alumínio

O alumínio não existe na natureza em sua forma metálica, e apresenta-se sob a formulação do óxido de alumínio (Al_2O_3), também conhecido como alumina. A ocorrência natural em minério é dada principalmente pela bauxita (ABAL, 2019). Os depósitos mundiais de bauxita se dividem em aproximadamente 88% do tipo lateríticos, 11,5% cársticos e 0,5% *Tikhvin* (BÁRDOSSY, 1990).

A formação encontrada no Brasil é predominantemente laterítica, que, para a aplicação metalúrgica, deve conter hidróxido de alumínio nas formas Gibbsita ($Al_2O_3 \cdot 3H_2O$), Boehmita ($\gamma - Al_2O_3 \cdot H_2O$) ou Diásporo ($\alpha - Al_2O_3 \cdot H_2O$). A Gibbsita é a que apresenta o maior interesse comercial, por demandar menores pressões e temperaturas de processamento, o que implica em redução de custos de tratamento (IBRAM, 2017).

O Brasil ocupa a terceira posição no ranking de maiores reservas mundiais de bauxita, apresentando tanto a bauxita de grau metalúrgico para produção de alumina como também a bauxita refratária, utilizada nas indústrias químicas, cimenteiras e produção de refratários (TEIXEIRA e LIMA, 2003).

A extração da bauxita em geral é realizada a céu aberto e o minério é submetido à moagem a úmido em moinho de bolas. O material passante na peneira 44 μ m é encaminhado à digestão alcalina (HIND, 1999). A obtenção da alumina através do processo de digestão alcalina da gibbsita é denominada processo Bayer (HIND, 1999).

2.4 Processo Bayer e resíduos da indústria de alumina

Patenteado em 1887 por Karl Joseph Bayer, o processo Bayer é um processo químico hidrometalúrgico que tem como objetivo concentrar o hidróxido de alumínio das bauxitas extraídas e moídas (HABASHI, 1993).

Na Figura 5 – Esquema explicativo do processo Bayer. Fonte:..Figura 5 é apresentado um esquema explicativo da obtenção da alumina através do processo Bayer pra gibbsitas. A primeira etapa do processo é conhecida como área vermelha e compreende a digestão e clarificação do hidróxido de alumínio. Já a segunda etapa, conhecida como área branca, consiste na precipitação do hidróxido obtido (WAO, 2010).

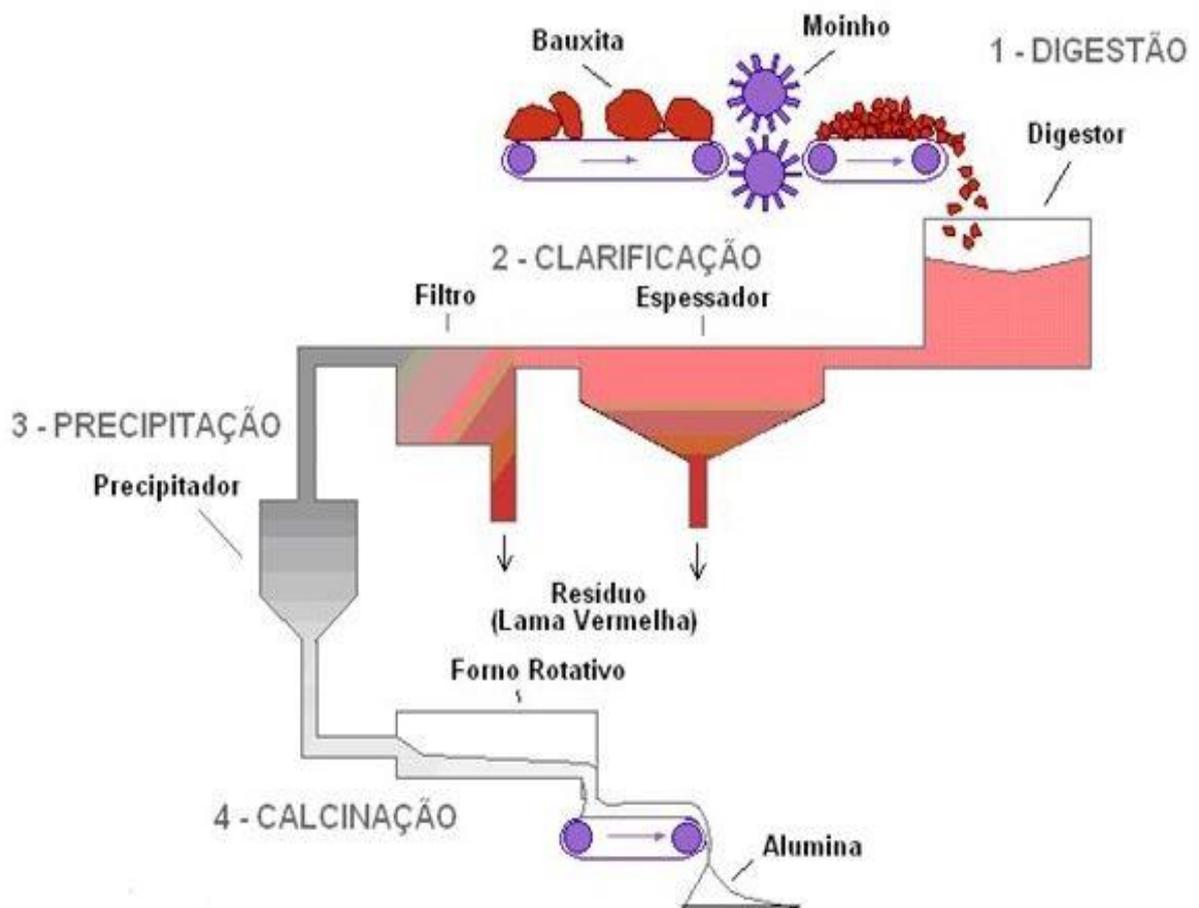


Figura 5 – Esquema explicativo do processo Bayer. Fonte: (WAO, 2010).

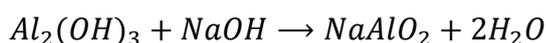
Após a adequação granulométrica do minério, dependendo do processo de moagem adotado, é adicionada uma pequena quantidade de reagente alcalino para aumentar sua eficiência antes do processo de adequação granulométrica (SILVA FILHO, 2007). O material passante segue para a digestão alcalina em uma solução

de hidróxido de sódio (NaOH), que reage com a gibbsita em uma faixa de temperatura de 140 a 160°C (HIND, 1999).

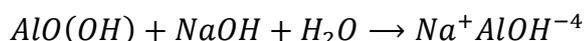
O material não passante na peneira de 44µm na fase de adequação granulométrica do minério é denominado Areia Ferrosa (AF). O material também pode apresentar eflorescências e certo teor alcalino devido à presença de hidróxido de sódio (HIND, 1999). A AF também é depositada em barragens e lagoas de rejeito, juntamente com a lama vermelha (SILVA FILHO, 2007).

A reação da gibbsita com o hidróxido de sódio resulta em uma solução de aluminato de sódio (CONSTANTINO, ARAKI, *et al.*, 2002). A dissolução é explicitada pela Equação 1 e pela Equação 2.

Equação 1 – Reação da digestão alcalina para a gibbsita.



Equação 2 – Reação da digestão alcalina para a boehmita e diásporo.



A solução de aluminato de sódio e os resíduos em suspensão da reação são transferidos para espessadores e são separados por sedimentação, com o auxílio de agentes flocculantes. O resíduo gerado no processo de clarificação da solução de aluminato de sódio é conhecido como Lama Vermelha (LV) (SILVA FILHO, 2007).

A LV é constituída basicamente dos minerais insolúveis que não possuem interesse econômico e que sobram após a digestão alcalina da bauxita pela solução de hidróxido de sódio, na produção de alumina pelo processo Bayer (HILDEBRANDO, 1998).

O rejeito apresenta coloração avermelhada devido aos óxidos e hidróxidos de ferro, que são insolúveis em soluções alcalinas. Sua composição varia de acordo com a composição da rocha-mãe e da eficiência do processo de concentração do hidróxido de alumínio, porém, no geral, é composta de ferro e sílica da bauxita, alumínio que não foi extraído durante o refino e óxido de sódio, residual do processo de digestão alcalina (REESE, 1955).

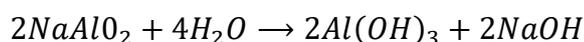
A LV gerada durante o processo Bayer é disposta em lagoas de rejeitos e barragens, demandando impermeabilização adequada devido aos elevados valores de hidróxido de sódio no material, que pode contaminar lençóis freáticos e o solo, além de oferecer risco às populações vizinhas (SILVA FILHO, 2007).

De acordo com a ABNT NBR 10004 (2004), a lama vermelha é classificada como um resíduo classe I – resíduo perigoso, que apresenta periculosidade em função de suas propriedades físicas, químicas, infectocontagiosas, podendo causar: risco à saúde pública, provocando mortalidade, incidência de doenças ou acentuando seus índices; risco ao meio ambiente, quando o resíduo for gerenciado de forma inadequada. Na medida que pode constituir perigo para populações vizinhas, pode ser considerada tóxica (HIND, 1999).

A quantidade de lama gerada por tonelada de alumina varia de acordo a qualidade da bauxita, representando cerca de 0,3 T para bauxitas de boa qualidade e 2,5 T para bauxitas de baixa qualidade (WANG, 2008). Dessa forma, o volume de lama gerado pela indústria é fator preocupante devido à sua dificuldade de armazenamento e ao seu poder contaminante.

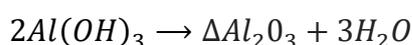
Após a clarificação da solução e retirada do resíduo, a solução passa por um filtro, é resfriada, e segue para a fase de precipitação, conforme a Equação 3. É feita a adição de cristais de hidróxido de alumínio para estimular a precipitação (CONSTANTINO, ARAKI, *et al.*, 2002).

Equação 3 – Reação de precipitação do hidróxido de alumínio.



O hidróxido de sódio filtrado é concentrado por evaporação e devolvido à etapa de digestão alcalina. O hidróxido de alumínio precipitado é calcinado para a obtenção do óxido de alumínio, conforme a Equação 4 (CONSTANTINO, ARAKI, *et al.*, 2002).

Equação 4 – Reação de obtenção do óxido de alumínio.



2.5 Ativação alcalina

A durabilidade e a resistência de cimentos de até 9000 mil anos encontrados na Grécia, Turquia, Síria e Egito, foram objeto de estudo de diversos pesquisadores. Apesar da idade, os cimentos possuíam uma elevada estabilidade e boa resistência à ação das intempéries (PINTO, 2006).

O desempenho ao longo do tempo, em comparação com o cimento Portland, motivou os trabalhos de Viktor Glukhovsky, do Instituto de Engenharia Civil de Kiev, na Ucrânia, devido à superioridade em parâmetros de durabilidade e desgaste. Durante o período de 1959 a 1965, Glukhovsky estudou os ligantes encontrados em edificações romanas e egípcias e descobriu compostos de aluminossilicatos cálcicos hidratados (GLUKHOVSKY, 1959). Como resultado, desenvolveu com sua equipe ligantes de base alcalina formados por aluminossilicatos moídos e resíduos industriais (PINTO, 2006).

Foram detectadas fases de géis de silicatos cálcicos similares às fases do cimento Portland e a presença de uma zeólita, a analcita, um aluminossilicato alcalino (sódico) hidratado, de estrutura tridimensional. Atribui-se a responsabilidade pela resistência ao desgaste das argamassas e concretos antigos à analcita (KRIVENKO, 1994).

Segundo Krivenko (1994), estes minerais não foram utilizados como materiais de partida por apresentarem um caráter amorfo, mas são a fase final estável de uma conversão a longo prazo de fases primárias em condições de umidade e temperatura bem determinadas.

Para Glukhovsky (1959), a durabilidade dos concretos antigos não é resultado da presença de géis de C-S-H, silicatos cálcicos hidratados. Quando neles aparece, na forma usual de C-S-H, está sempre associado a matrizes zeolíticas (PINTO, 2006).

Na Tabela 1 é apresentada a composição química de cimentos antigos encontrados em Roma. É possível observar que há uma presença significativa de sílica e alumina, correspondendo a cerca de 50% da composição total. No cimento Portland normal, a ocorrência é de cerca de 8%. Tem-se ainda óxidos alcalinos de sódio e potássio, cuja presença no cimento Portland é anormal (PINTO, 2006).

Tabela 1 – Composição química de cimentos antigos. Fonte: (PINTO, 2006).

Constituição química	Cimentos Romanos	
	160 a.C	140 a.C
SiO_2	42,00	19,56
Al_2O_3	14,48	14,01
Na_2O, K_2O	4,21	4,02
CaO, MgO	39,22	42,35

O pesquisador francês Joseph Davidovits, juntamente com um grupo de pesquisadores, desenvolveu ligantes baseados na ativação alcalina do caulim e metacaulim, com o objetivo de criar um novo material inorgânico, não inflamável e resistente ao fogo. Em 1979 Davidovits patenteou o material e fundou o *Geopolymer Institute* (CRIADO, 2009, DAVIDOVITS, 2015). O pesquisador denominou o novo material de “geopolímero”, devido à sua capacidade de se policondensar, ser inorgânico, endurecer rapidamente e por apresentar características como dureza e estabilidade até temperaturas de 1250°C.

Para melhor compreensão do processo de reação na ativação alcalina, é importante notar sua diferença em relação à reação do cimento Portland e materiais cimentícios suplementares. Denominam-se materiais cimentícios suplementares as adições minerais que são utilizadas em substituição total ou parcial ao cimento Portland e que podem possuir características tanto de materiais pozolânicos como de materiais cimentantes (MEHTA, 2008).

Segundo a ABNT NBR 12653 (2012), materiais pozolânicos são materiais constituídos de sílica e alumina que, por si só, possuem pouca ou nenhuma função aglomerante. Quando se encontram em forma amorfa e na presença de água, possuem a capacidade de reagir com o hidróxido de cálcio e formar compostos com propriedades aglomerantes.

Na ativação alcalina o processo de reação é diferente. Os materiais usados como aglomerantes também são constituídos por sílica e alumina, porém não há reação

com o hidróxido de cálcio, uma vez que o mesmo não se encontra na composição do aglomerante, que não há adição de cimento Portland na mistura (PINTO, 2004).

O material constituído por aluminossilicatos é ativado pela solução alcalina e a superfície dos minerais sofre uma hidrólise. Assim, é dissolvida uma quantidade inicial de íons de silício e alumínio. A reação é acelerada pela presença de íons OH^- que se tornam parte da estrutura, balanceando a carga positiva do alumínio. No equilíbrio, segunda fase da reação, as espécies dissolvidas reagem com os íons de silício e se polimerizam por condensação (DUXSON, 2007).

Na terceira fase da reação, ocorre a formação de um gel, pela condensação da estrutura, e formação de um material cimentante. A seguir a estrutura se reorganiza sucessivamente, até a formação da estrutura final. O mecanismo de reação pode ser observado na Figura 6 (DUXSON, 2007).

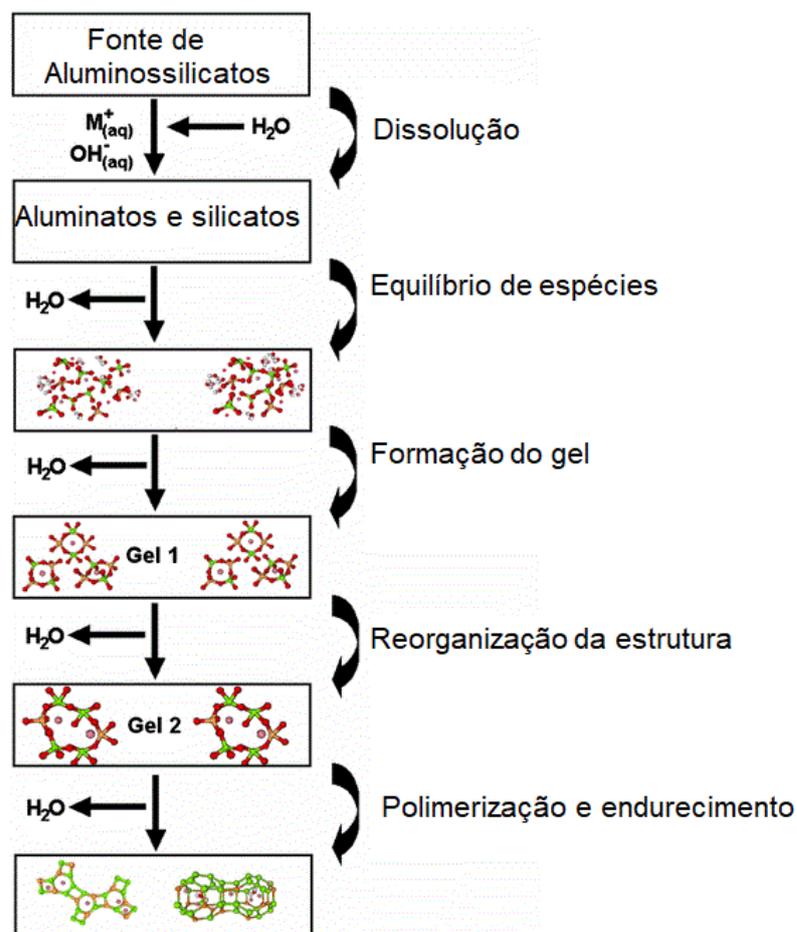


Figura 6 – Mecanismo de reação. Adaptado de: (DUXSON, 2007).

2.6 Propriedades dos aglomerantes alcalinos

Os aglomerantes alcalinos alcançam rapidamente elevadas resistências. Nas primeiras quatro horas, cerca de 70% da resistência final é atingida. A resistência final varia de acordo com as condições de composição, síntese e cura, porém já foram alcançados valores da ordem de 60 a 80MPa em compressão simples e 8MPa na flexo-tração (DAVIDOVITS, 2015). DEFÁVERI (2019) alcançou mais de 112MPa de resistência à compressão na idade de 7 dias para a ativação alcalina de rejeito de barragem de minério de ferro.

Por tratar-se de um material cuja matéria prima é abundante, uma vez que requer apenas materiais ricos em sílica e alumina, é possível reaproveitar resíduos industriais, diminuindo seu aporte de descarte no meio ambiente e disponibilizando uma nova gama de materiais no mercado (CETEM, 2010).

Devido à sua estrutura inorgânica, estabilidade química e baixa condutividade, os aglomerantes alcalinos possuem grande potencial de aplicação na indústria da construção civil (RICKARD, 2008). Também apresentam características importantes como resistência à abrasão e grande capacidade de adesão a outros materiais (WANG, 2010, BELL, 2005).

Os aglomerantes alcalinos podem apresentar eflorescências que prejudiquem sua estética e aplicabilidade, porém do ponto de vista prático, não exigem metodologias complexas de mistura e síntese, apenas pequenas adequações da metodologia e dos equipamentos utilizados na produção de concreto (TORGAL, 2006). O conhecimento prévio da composição química dos materiais constituintes é fundamental, uma vez que a dosagem do ativador alcalino é função da mesma (SOUZA, 2012).

3 MATERIAIS

Foram utilizados para a confecção das matrizes: lama vermelha, soluções de hidróxido de sódio em variadas concentrações, areia lavada de rio e areia ferrosa.

3.1 Lama vermelha

O rejeito da indústria de alumina, conhecido como lama vermelha (LV), utilizado neste estudo foi extraído de uma barragem da região de Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil. A LV foi armazenada no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Escola de Minas – UFOP, homogeneizada com um bastonete antes da realização de todos os ensaios.

Na Figura 7 é apresentada uma amostra em seu estado natural e na Figura 8 é apresentada uma amostra submetida ao processo de secagem para sua posterior caracterização.



Figura 7 – LV em seu estado natural. Fonte própria.



Figura 8 – LV seca para caracterização. Fonte própria.

3.2 Solução de hidróxido de sódio

A solução alcalina adotada como agente do processo de ativação alcalina foi a de hidróxido de sódio devido aos resultados superiores apresentados por alguns autores no processo de ativação alcalina (VASSALO, 2013). As soluções foram fabricadas com água destilada e hidróxido de sódio em pérolas, apresentado na Figura 9, de grau de pureza de 98%, nas concentrações 6M, 10M e 12M(mol/l).



Figura 9 – Hidróxido de sódio em pérolas. Fonte: (VITRILAB, 2019).

3.3 Areia lavada de rio

A areia lavada de rio (AR) utilizada é proveniente do rio do município de Ponte Nova, Minas Gerais, Brasil. Foi seca em estufa a 105°C por 24h, até a constância de massa e pode ser observada na Figura 10.



Figura 10 – Amostra de AR em seu estado natural. Fonte própria.

3.4 Areia ferrosa

A areia ferrosa (AF) utilizada foi extraída após o processo de adequação granulométrica em uma indústria de alumina da região de Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil. A AF foi armazenada em recipientes hermeticamente fechados no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Escola de Minas – UFOP. Pode-se observar uma amostra de AF na Figura 11 .



Figura 11 – Amostra de AF em seu estado natural. Fonte própria.

4 METODOLOGIA

Para os ensaios de caracterização as amostras de LV foram secas à 40°C até a constância de massa e destorroadas. As amostras de AR e AF foram secas à 105°C até a constância de massa e destorroadas.

Para a dosagem das misturas, ensaios de propriedades no estado fresco e moldagem e cura de corpos de prova prismáticos, as amostras de LV foram utilizadas em sua umidade natural. As amostras de AR e AF foram secas à 105°C até a constância de massa, destorroadas e separadas em quatro frações granulométricas segundo a ABNT NBR 7217 (1987) e através de separador mecânico, sendo elas: retida na malha 150µm, retida na malha 300µm, retida na malha 600µm e retida na malha 1,2mm.

4.1 Análise química

As amostras de LV, AR e AF passantes na peneira #200 (0,75µm) foram submetidas à análise química por Fluorescência de Raios X (FRX). O equipamento utilizado é do modelo Epsilon 3x PANalytical, locado no Laboratório de Materiais de Construção Civil (UFOP).

4.2 Distribuição granulométrica

As amostras de LV, AR e AF foram submetidas à análise física por granulometria a laser. As análises foram realizadas no equipamento Bettersize 2000, utilizando-se água destilada como dispersante.

4.3 Área superficial específica

Os ensaios foram realizados para as amostras de LV, seguindo-se o Protocolo Reciclos #9 “Método de Blaine” (SILVA, 2017). Foram ensaiadas três amostras, utilizando-se o permeabilímetro de Blaine.

4.4 Massa específica

A massa específica da LV foi ensaiada segundo a ABNT NBR NM 23 (2001). Utilizou-se o frasco volumétrico de Le Chatelier e querosene.

As massas específicas da AR e AF foram ensaiadas segundo a ABNT NBR NM 52 (2009). Foi utilizado o frasco volumétrico de Chapman, 500g de material e 200mL de água.

4.5 Moldagem e cura dos protótipos

Foram fabricados protótipos de endurecimento em menor escala com o objetivo de analisar resultados preliminares para agilizar o processo de produção. Foram fabricados traços de LV pura obedecendo a várias temperaturas de cura: temperatura ambiente ($\approx 25^{\circ}\text{C}$), 40°C , 60°C , 80°C e 100°C . Os resultados foram utilizados para definir a temperatura de ativação para os protótipos de LV com AR sob várias proporções LV:AR conforme o esquema apresentado na Figura 12.

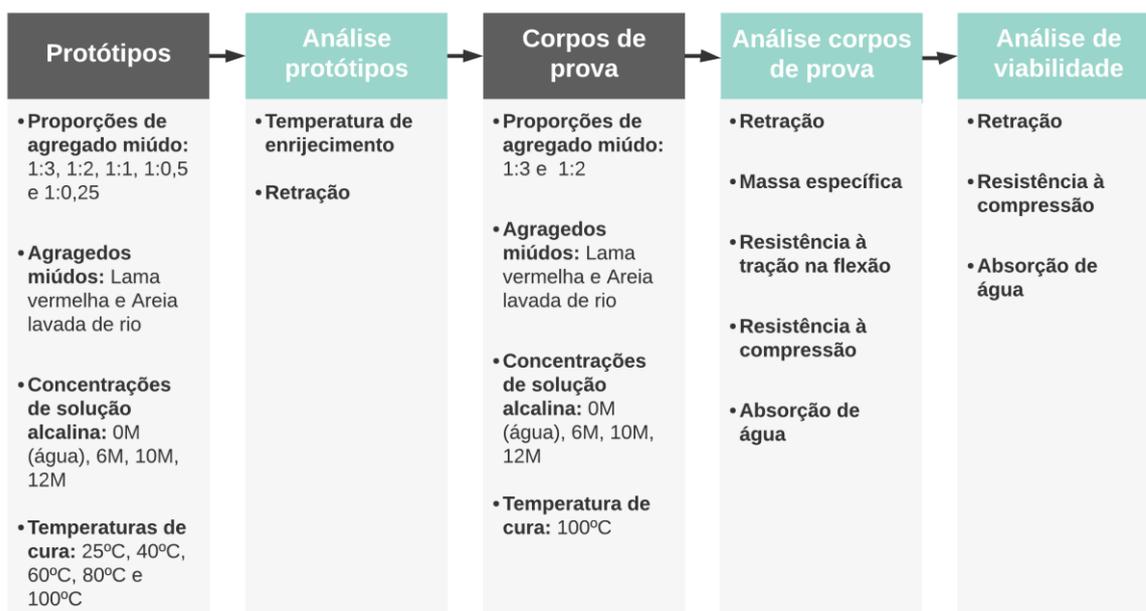


Figura 12 – Esquema de ensaios e análises realizadas.

Foram utilizadas várias concentrações de solução de hidróxido de sódio como ativador alcalino, sendo 0M (água), 6M, 10M, 12M. O procedimento adotado para a produção e moldagem dos protótipos é descrito a seguir:

1. Adição da amostra de solução de NaOH ao recipiente de mistura;
2. Adição da amostra de lama vermelha ao recipiente de mistura;

3. Adição das amostras de agregado miúdo;
4. Homogeneização da mistura com espátula por 1 minuto;
5. Moldagem dos protótipos em tubos de policloreto de vinila (PVC) de diâmetro interno de 27,8mm, utilizados como moldes para o processo de ativação.
6. Vedação dos moldes com placas de vidro e cura em temperatura ambiente e em estufa a 40°C, 60°C, 80°C e 100°C durante 7 dias.

Após o período de cura, os protótipos foram avaliados em termos de enrijecimento ou não enrijecimento e em termos de retração diametral e total. Os melhores resultados obtidos com os protótipos foram selecionados e repetidos em moldes prismáticos de 160x40x40mm para ambos os agregados miúdos, AR e AF.

Foi adotada a seguinte nomenclatura:

G RM x AG y z

Onde:

G indica geopolímero;

RM indica lama vermelha;

x indica a concentração da solução de NaOH utilizada (0M (água), 6M, 10M, 12M);

AG indica o agregado miúdo utilizado, AR ou AF;

y indica a proporção de agregado miúdo adotada sobre a massa de LV;

z indica o teor de umidade da mistura sobre a massa de LV seca.

As proporções y ensaiadas nos protótipos foram 1:3, 1:2, 1:1, 1:0,5, e 1:0,25. Para a análise da retração foram medidos os diâmetros e as alturas iniciais de cada molde e os diâmetros e alturas finais de cada protótipo ao fim do processo de cura. As retrações foram calculadas pela Equação 5 e pela Equação 6.

Equação 5 – Retração total.

$$\text{Retração total (\%)} = \left(1 - \frac{d_i^2 * h_i}{d_f^2 * h_f} \right) * 100$$

Equação 6 – Retração diametral.

$$\text{Retração diametral}(\%) = \left(1 - \frac{d_i^2}{d_f^2}\right) * 100$$

Para análise dos dados, foram calculadas as médias das retrações de todos os traços para cada proporção y de agregado miúdo adotado sobre a massa de LV.

4.6 Moldagem e cura dos corpos de prova

Para os corpos de prova prismáticos foram ensaiados os teores de umidade (z) de 1:0,2 e 1:0,4 e as melhores proporções de agregados miúdos y ensaiados nos protótipos. Para fins comparativos, foram moldados três corpos de prova prismáticos de LV pura através do procedimento apresentado anteriormente.

Para a moldagem dos corpos de prova prismáticos 40x40x160mm foram utilizados:

- a. Lama vermelha;
- b. Agregados miúdos: areia lavada de rio e areia ferrosa;
- c. Soluções de hidróxido de sódio de concentrações 0M (água), 6M, 10M, 12M;
- d. Molde para corpos de prova prismáticos 40x40x160mm;
- e. Estufa (80°C e 100°C);
- f. Argamassadeira de mesa FORTEST, modelo VC 370, conforme a Figura 13.
- g. Mesa para índice de consistência, molde de tronco cônico (125x80x65mm) e soquete.



Figura 13 – Argamassadeira de mesa. Fonte própria.

O procedimento adotado para a produção e moldagem dos compósitos alcalino-ativados é descrito a seguir:

1. Adição da amostra de solução de NaOH à cuba da argamassadeira;
2. Adição da amostra de lama vermelha à cuba da argamassadeira;
3. Homogeneização da mistura, em velocidade baixa, por 1 minuto;
4. Pausa na argamassadeira e raspagem do fundo, das laterais e da haste misturadora;
5. Adição das amostras de agregado miúdo;
6. Homogeneização da mistura, em velocidade baixa, por 30 segundos;
7. Homogeneização da mistura, em velocidade alta, por 3 minutos;
8. Moldagem dos corpos de prova em fôrmas prismáticas 40x40x160mm em três camadas, adensadas com 15 golpes de soquete e 30 golpes na mesa de consistência para cada camada;
9. Vedação dos moldes com placas de vidro e cura em estufa a 80°C e 100°C durante 7 dias.

4.7 Retração dos corpos de prova

Os corpos de prova foram medidos com um paquímetro com precisão de duas casas decimais antes de suas rupturas. A retração dos corpos de prova prismáticos foi avaliada em termos da retração na largura, segundo a Equação 7, retração na altura, segundo a

Equação 8 e retração no comprimento, segundo a Equação 9.

Equação 7 – Retração na largura.

$$\text{Retração largura}(\%) = \left(1 - \frac{b_m}{4}\right) * 100$$

Equação 8 – Retração na altura.

$$\text{Retração altura}(\%) = \left(1 - \frac{c_m}{4}\right) * 100$$

Equação 9 – Retração no comprimento.

$$\text{Retração comprimento}(\%) = \left(1 - \frac{a_m}{16}\right) * 100$$

Onde: a_m é a média do maior comprimento do corpo de prova (16cm);

b_m é a média da largura do corpo de prova (4cm);

c_m é a média da altura do corpo de prova (com a face que fica exposta no molde) (4cm).

Para avaliação dos traços, considerou-se os limites máximos de retração recomendando pela normativa de tijolos, NBR 7170 (ABNT, 1983), de 3mm em todas as dimensões. Considerando as dimensões recomendadas de 90mm para a largura e altura e de 190mm para comprimento, essas variações correspondem a 3,3% e 1,6%, respectivamente. Os traços fabricados foram avaliados conforme as porcentagens apresentadas anteriormente.

4.8 Massa específica dos corpos de prova

A massa específica dos corpos de prova foi estimada por uma adaptação da ABNT NBR 9778 (ABNT, 2005) e calculada a partir da Equação 10.

Equação 10 – Massa específica dos corpos de prova.

$$\text{Massa específica}(g/cm^3) = \left(\frac{m_m}{a_m * b_m * c_m}\right) * 100$$

Onde: m_m é a média da massa do corpo de prova em gramas;

a_m é a média do maior comprimento do corpo de prova (16cm);

b_m é a média da largura do corpo de prova (4cm);

c_m é a média da altura do corpo de prova (com a face que fica exposta no molde) (4cm).

Para análise dos dados, foram calculadas as médias das retrações de todos os traços para cada proporção de agregado miúdo e para cada proporção z de teor de umidade da mistura adotadas sobre a massa de LV.

4.9 Resistência à tração na flexão

No estado endurecido, foram determinadas propriedades mecânicas de tração na flexão segundo a ABNT NBR 13279 (2005), com idade de 7 dias, 3 corpos de provas para cada traço. Foi utilizado o equipamento Emic DL20000, com velocidade de carga de 50N/s.

4.10 Resistência à compressão

No estado endurecido, foram determinadas propriedades mecânicas de compressão uniaxial segundo a ABNT NBR 13279 (2005), com idade de 7 dias, 6 corpos de prova para cada traço. A análise dos dados obtidos foi realizada por método estatístico normalizado. Foi utilizado o equipamento Emic DL20000, com velocidade de carga 500N/s.

4.11 Absorção de água

Utilizou-se um método adaptado da norma para ensaios de absorção de água, ABNT NBR 9778 (2005), de acordo com o seguinte protocolo:

- a) Secar o fragmento de corpo de prova por 24 horas na estufa à 100°C até a constância de massa;
- b) Pesar a massa seca inicial (M_s);
- c) Imergir o fragmento de corpo de prova em água por 24 horas;
- d) Retirar o fragmento da água, secar sua superfície e pesar a massa saturada dos fragmentos (M_{sat}), massa de superfície saturada seca.

Após a realização do procedimento, a absorção de água foi obtida através da Equação 11.

Equação 11 – Absorção de água do fragmento.

$$\text{Absorção de água (\%)} = \frac{M_{sat} - M_s}{M_s} \times 100$$

4.12 Avaliação da viabilidade normativa

Para atender às normativas vigentes, os traços e respectivas proporções de agregado miúdo foram analisados comparativamente quanto aos seus resultados de retração, massa específica, resistência mecânica e absorção de água.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Análise química

Os resultados obtidos através da análise química por Fluorescência de Raios X encontram-se na Tabela 2.

Tabela 2 – Análise química dos materiais.

Elemento	LV(%)	Elemento	AR (%)	Elemento	AF (%)
Fe ₂ O ₃	50,2	SiO ₂	59,6	Fe ₂ O ₃	44,3
Al ₂ O ₃	25,9	Al ₂ O ₃	31,1	SiO ₂	39,0
SiO ₂	6,7	Fe ₂ O ₃	4,7	Al ₂ O ₃	10,1
Na ₂ O	5,7	K ₂ O	1,7	TiO ₂	3,6
TiO ₂	3,7	TiO ₂	1,2	Na ₂ O	1,31
CaO	1,9	SO ₃	1,0	P ₂ O ₅	0,4
P ₂ O ₅	0,9	CaO	0,5	CaO	0,3
SO ₃	0,5	MnO	0,1	K ₂ O	0,2

A LV apresenta altos teores Fe₂O₃ (50%), Al₂O₃ (25%), SiO₂ (6%) e Na₂O (5%) e baixos teores de CaO, P₂O₅ e SO₃, todos com valores menores que 2%. A relação Al/Si extraída da análise FRX explicitada na Equação 12 foi de 3,87, sendo um bom indicativo para a destinação como cimento alcalino ativado (PACHECO-TORGAL F, 2010, DAVIDOVITS, 1994).

Equação 12 – Relação Al/Si da lava vermelha analisada.

$$\frac{25,9}{6,7} = 3,87$$

Estes autores apontam para uma relação Al/Si de 4,5 para metacaulim como ligante. Alguns autores apontam ainda que a presença de Fe₂O₃ e CaO, na composição dos ligantes, não contribuem para o ganho de resistência dos cimentos alcalino ativados por não contribuírem para o processo de ativação (PACHECO-TORGAL F, 2010).

A presença de Na₂O (5,7%) na amostra é proveniente da adição de hidróxido de sódio durante a digestão no processo Bayer. O resíduo é neutralizado antes de sua deposição, porém ainda é possível encontrar o óxido de sódio e um teor alcalino residual.

Nota-se que o principal componente da AF é o Fe₂O₃ (44,3%) seguido pelo SiO₂ (39,0%). Essa composição é resultado do processo de extração da gibbsita, que faz com que a AF seja composta pelas frações de ferro e sílica da bauxita, residuais do processo de adequação granulométrica do minério (SILVA FILHO, 2007).

A AR é composta majoritariamente por SiO₂ e Al₂O₃, estando dentro dos parâmetros esperados para areias naturais de rio. A lavagem faz com que compostos argilosos estejam menos presentes em sua composição final (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

5.2 Distribuição granulométrica

Os resultados obtidos para a LV através da análise física por granulometria à laser encontram-se na Tabela 3.

Tabela 3 – Granulometria à laser da LV.

Percentil	Peneira (µm)
D10	1,31
D50	11,5
D90	47,2

Os resultados obtidos revelam que a LV apresenta uma granulometria com 90% do material com diâmetro inferior à 47,2 µm e 50% inferior à 11,5 µm. Os resultados apontam um material mais fino que os ensaiados por alguns autores. Barros (2017) ensaiou uma LV com D90 de 73,1 µm e D10 de 1,1 µm e Manfroi (2009) estudou amostras 100% passantes na granulometria de 28 µm e com D50 de 2,4 µm.

De acordo com Villar (2002, p. 28), a granulometria da lama vermelha varia de acordo com a região de extração da bauxita, devido à mineralogia da rocha de origem e devido aos métodos de extração e processamento do mineral.

A curva de distribuição granulométrica para a AR encontra-se na Figura 14 e para a AF na Figura 15. Pode-se observar que ambas as areias possuem granulometria dentro da Zona Utilizável, sendo classificadas como areias de granulometria média e mostrando-se aptas à produção de concreto (ABNT, 2009).

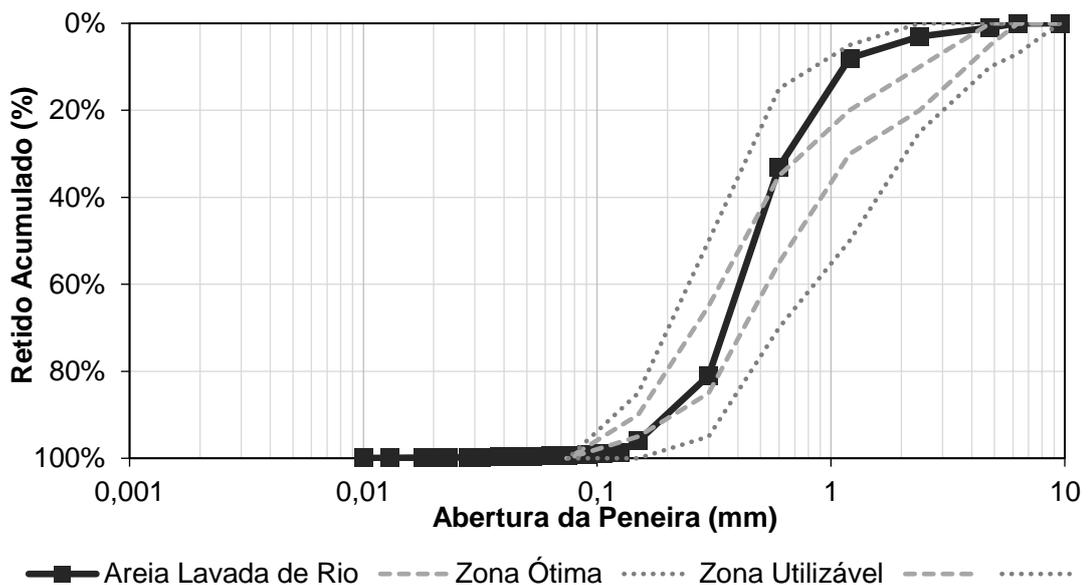


Figura 14 – Curva de Distribuição Granulométrica da AR. Fonte própria.

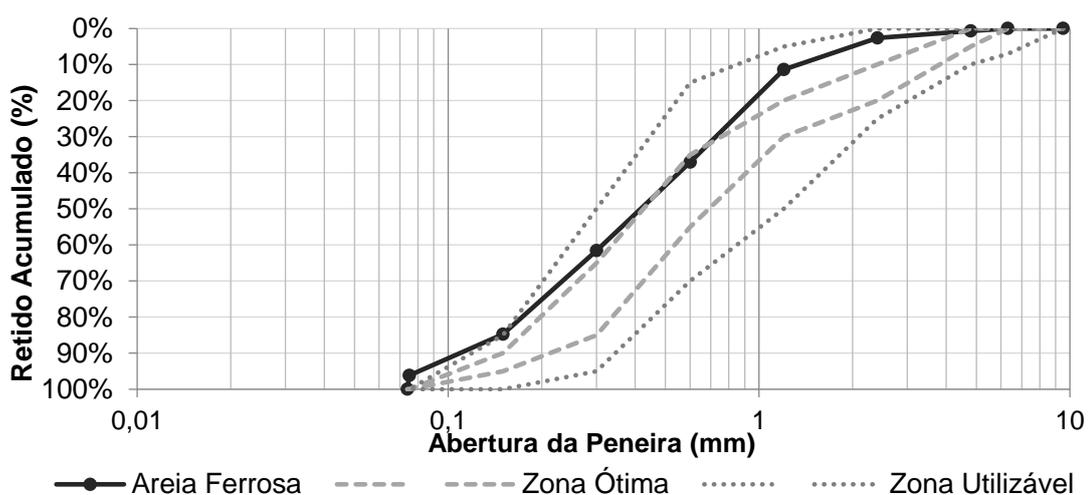


Figura 15 – Curva de Distribuição Granulométrica da AF. Fonte própria.

5.3 Área superficial específica

Os resultados obtidos através do Método de Blaine para a LV indicaram uma área superficial específica de 3490 cm²/g. Nota-se que a LV possui uma área superficial específica elevada, que se comparada com os cimentos disponíveis no mercado, equipara-se à do CPV-ARI, que deve ser superior a 3000 cm²/g segundo as especificações técnicas (ABNT, 2018).

Elevadas áreas superficiais específicas caracterizam elevadas superfícies de contato, que contribuem para uma maior reatividade química do material e empacotamento final da matriz, podendo resultar em uma maior resistência mecânica e consequente diminuição da porosidade do material (CASTRO e PANDOLFELLIL, 2009).

5.4 Massa específica

A Figura 16 apresenta os resultados para os ensaios de massa específica dos materiais.

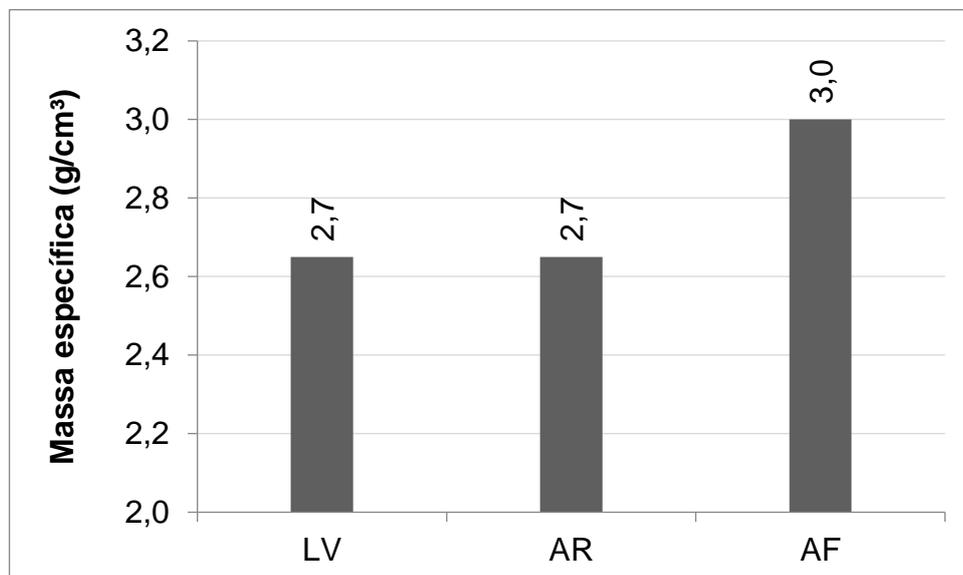


Figura 16 – Massa específica dos materiais. Fonte própria.

Pode-se notar que as massas específicas dos três materiais são próximas, com a variação máxima de 0,3 g/cm³, no caso da AF. Estes resultados são importantes para

a definição das relações LV/AR, LV/AF e líquido/sólido. Deve-se atentar ao fato de que os materiais podem apresentar inchamento devido à umidade.

A massa específica da AF, de valor 3,0 g/cm³ encontra-se fora da faixa de referência para areias, de 2,60 g/cm³ a 2,70 g/cm³ (MEHTA e MONTEIRO, 2014). A sua massa específica elevada pode ser resultado do seu alto teor de Fe₂O₃, que é o componente mais presente no material, correspondendo a 44,3% de sua composição química.

5.5 Enrijecimento e retração dos protótipos

Os resultados de enrijecimento obtidos para os protótipos de LV pura com várias temperaturas de cura são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Resultado dos protótipos com diferentes temperaturas.

Temperatura				
Ambiente (≈25°C)	40°C	60°C	80°C	100°C
Negativo	Negativo	Negativo	Positivo	Positivo

Para as amostras negativas, o material não enrijeceu após o período de cura de 7 dias. Para as amostras positivas, houve o enrijecimento do material.

Nas temperaturas de cura inferiores a 80°C as amostras não apresentaram enrijecimento após o período de cura de 7 dias. As amostras curadas nas temperaturas de ativação de 80°C e 100°C apresentaram enrijecimento após o período de 7 dias. A retração das amostras pode ser observada na Figura 17.



Figura 17 – Protótipos (a) 80°C; (b) 100°C. Fonte própria.

É possível observar que o protótipo curado sob a temperatura de 80°C apresentou eflorescência após o processo de cura. O protótipo curado sob a temperatura de ativação de 100°C não apresentou eflorescência e a avaliação visual qualitativa indica uma menor retração em relação ao protótipo curado a 80°C. Com isso, adotou-se a temperatura de ativação de 100°C para a cura dos protótipos com agregado miúdo. O resultado das retrações para cada proporção é apresentado na Figura 18.

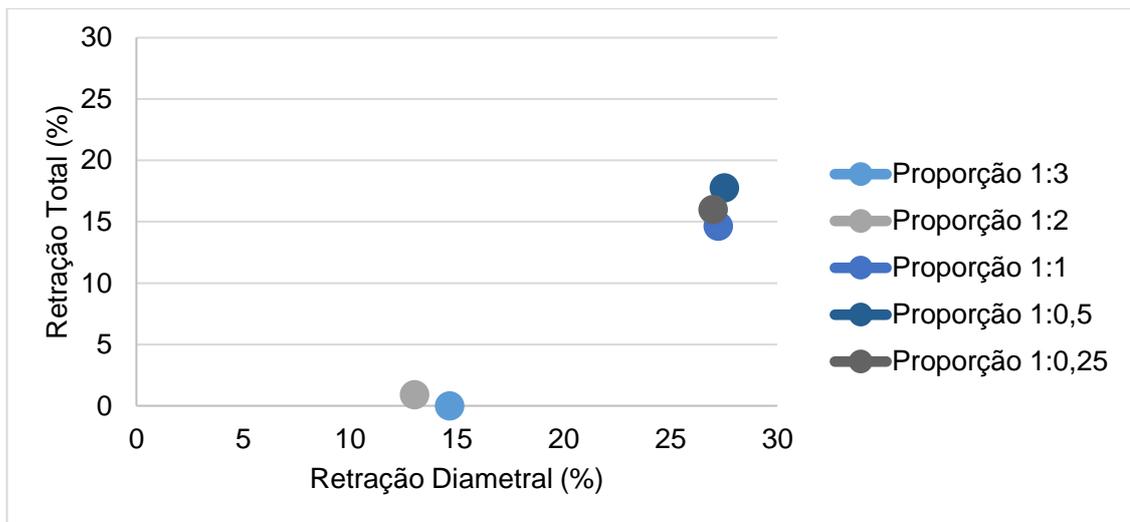


Figura 18 – Relação entre as retrações para os protótipos. Fonte própria.

Quanto mais próximo do eixo de origem, melhor o resultado em termos de retração percentual. Com os resultados, pôde-se observar que as retrações tanto diametraes quanto totais foram menores para os traços com proporção de areia 1:3 e 1:2, que foram então adotados como referência para moldagem, cura e análise em corpos de prova prismáticos.

5.6 Retração dos corpos de prova

Na Tabela 5 são apresentados os resultados referentes às retrações dos corpos de prova. Os traços que atenderam aos limites de retração exigidos para todas as dimensões foram destacados em azul claro.

Pode-se observar que, comparativamente ao desempenho do corpo de prova fabricado com LV pura, há uma redução média de 14,6% na retração da largura, de

38,2% na retração da altura e de 19,5% na retração do comprimento quando se adiciona os agregados AF e AR nos traços ensaiados.

Tabela 5 – Retração dos corpos de prova.

Traço	Retração largura	Retração altura	Retração comprimento
LV pura	9,8%	13,3%	10,5%
GRM-0-AR 1:3:0,4	1,9%	18,3%	2,5%
GRM-6-AR 1:3:0,4	0,1%	2,2%	0,5%
GRM-10-AR 1:3:0,4	5,1%	6,8%	1,9%
GRM-12-AR 1:3:0,4	0,3%	5,2%	0,4%
GRM-0-AR 1:2:0,4	1,6%	12,6%	2,7%
GRM-6-AR 1:2:0,4	0,3%	8,5%	2,9%
GRM-10-AR 1:2:0,4	0,4%	6,7%	2,5%
GRM-12-AR 1:2:0,4	1,4%	7,2%	2,1%
GRM-0-AR 1:3:0,2	0,6%	1,3%	0,3%
GRM-6-AR 1:3:0,2	0,4%	0,8%	0,9%
GRM-10-AR 1:3:0,2	0,2%	0,7%	0,5%
GRM-12-AR 1:3:0,2	0,3%	0,7%	0,4%
GRM-0-AR 1:2:0,2	0,9%	2,0%	1,5%
GRM-6-AR 1:2:0,2	0,4%	1,8%	1,5%
GRM-10-AR 1:2:0,2	0,5%	1,0%	1,7%
GRM-12-AR 1:2:0,2	0,7%	1,3%	1,7%
GRM-0-AF 1:3:0,4	2,0%	8,8%	3,4%
GRM-6-AF 1:3:0,4	2,2%	6,1%	1,1%
GRM-10-AF 1:3:0,4	1,9%	8,5%	2,4%
GRM-12-AF 1:3:0,4	1,3%	8,0%	3,5%
GRM-0-AF 1:2:0,4	4,4%	11,6%	4,7%
GRM-6-AF 1:2:0,4	3,0%	9,5%	1,2%
GRM-10-AF 1:2:0,4	4,3%	9,0%	2,5%
GRM-12-AF 1:2:0,4	1,9%	6,1%	4,0%
GRM-0-AF 1:3:0,2	0,5%	3,2%	2,2%
GRM-6-AF 1:3:0,2	2,3%	3,1%	3,0%
GRM-10-AF 1:3:0,2	0,5%	0,9%	1,6%
GRM-12-AF 1:3:0,2	0,7%	1,2%	1,6%
GRM-0-AF 1:2:0,2	1,4%	4,1%	2,7%
GRM-6-AF 1:2:0,2	1,2%	2,1%	2,5%
GRM-10-AF 1:2:0,2	1,7%	1,5%	2,7%
GRM-12-AF 1:2:0,2	1,3%	2,6%	2,3%

O desempenho dos traços com AR foi superior aos traços com AF. Pode-se observar ainda que o desempenho dos traços AR com proporção de líquidos 0,2 foram superiores aos de proporção 0,4. VASSALO (2013) e ZHANG e AHMARI (2012) apontam que a retração é mais suscetível em materiais que são submetidos à ativação alcalina quando há mais água do que a quantidade necessária para a reação.

Dentre os traços com AF, nota-se que os resultados que atendem a retração especificada foram os com menores teores de líquidos e soluções alcalinas de maior concentração molar.

5.7 Massa específica dos corpos de prova

Na Figura 19 são apresentados os resultados para os ensaios de massa específica dos corpos de prova.

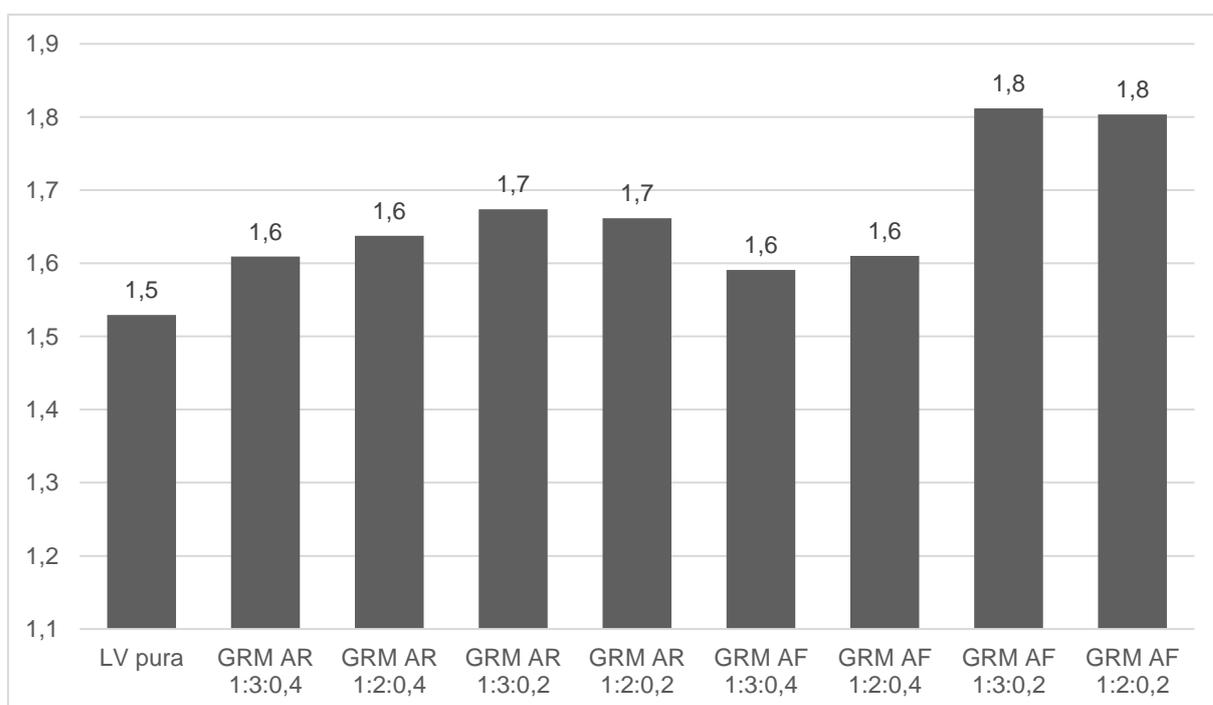


Figura 19 – Massa específica dos corpos de prova. Fonte própria.

As massas específicas de todos os corpos de prova fabricados ficaram dentro da faixa de 1,5-1,8 g/cm³. O material fabricado apresentou-se mais leve do que o padrão para os materiais alcalino-ativados, comumente na faixa de 2,0-2,4 g/cm³ (F. FAN, 2018) (DEFÁVERI, 2019).

Em comparação com os tijolos cerâmicos comerciais, o material apresentou-se mais leve que o esperado para tijolos maciços (1,8-2,0 g/cm³) (OPERACTION, 2020).

5.8 Resistência à tração na flexão

Na Figura 20 são apresentados os resultados do ensaio de resistência à tração na flexão para os traços fabricados com a AR. Na Figura 21 são apresentados os resultados para a AF.

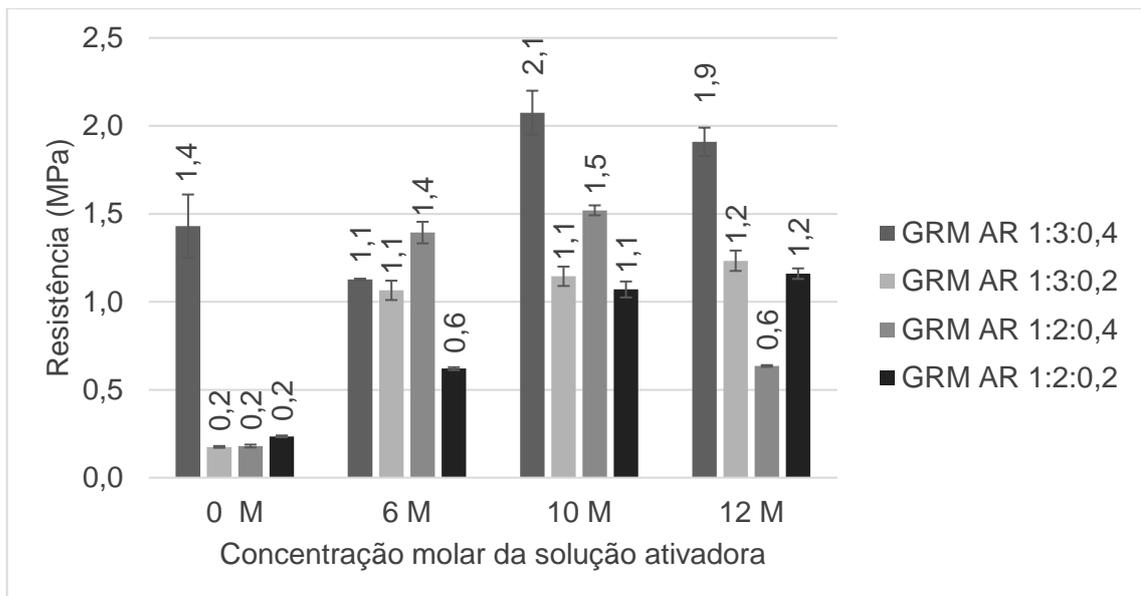


Figura 20 – Resistência à tração na flexão – AR. Fonte própria.

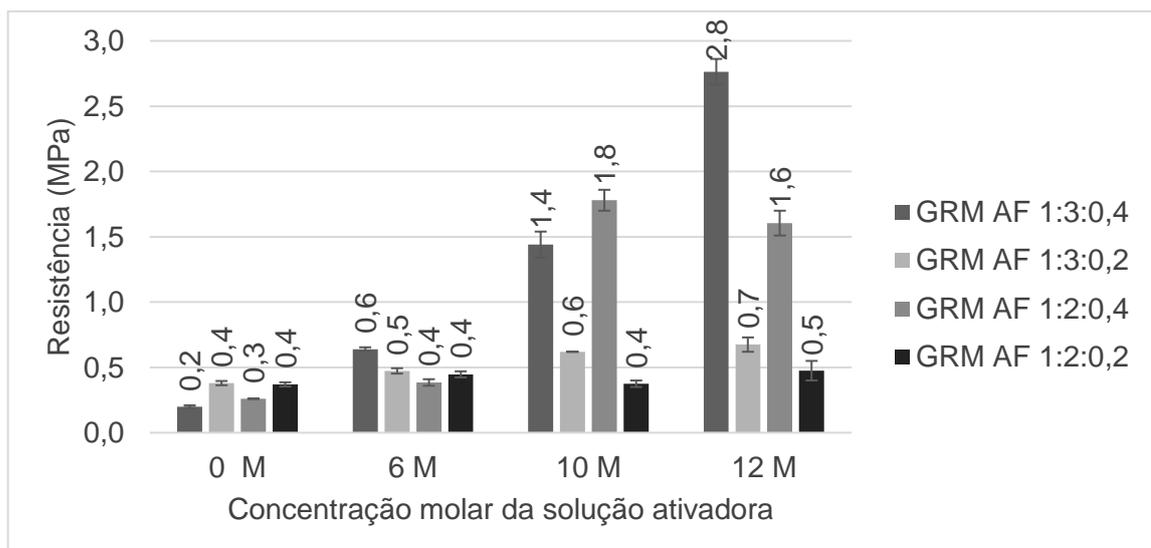


Figura 21 – Resistência à tração na flexão – AF. Fonte própria.

O corpo de prova de LV pura obteve o resultado de resistência à tração na flexão de 0,0 MPa e apresentou uma retração maior que os demais corpos de prova, o que sugere que ele tenha se rompido na fôrma devido à retração, conforme apresentado na Figura 22. Todos os corpos de prova fabricados com a adição das areias apresentaram ganho de resistência e maneabilidade em comparação ao material original.



Figura 22 – Corpos de prova de LV pura. Fonte própria.

Os melhores resultados foram no traço 1:3:0,4, sendo 2,1 MPa para o traço com AR e solução de concentração 10M e 2,8 MPa para o traço com AF e solução de concentração 12M.

Nota-se que há uma tendência de ganho de resistência à medida que se aumenta a concentração molar da solução alcalina. Os melhores resultados são para os corpos de prova fabricados com as soluções de concentração 10M e 12M.

Com altas concentrações alcalinas, tem-se também um aumento do pH. O pH elevado aumenta a eficácia da ativação alcalina, uma vez que favorece a formação do gel (NATH, 2016).

O melhor desempenho com pH mais elevado é também comprovado comparando-se os resultados entre os teores de umidade da mistura: 0,2 e 0,4. Os

traços com teor 0,4 apresentaram resistências superiores aos traços com o teor 0,2 na mistura.

5.9 Resistência à compressão

Na Figura 23 são apresentados os resultados do ensaio de resistência à compressão para os traços fabricados com a AR e na Figura 24 são apresentados os resultados para a AF.

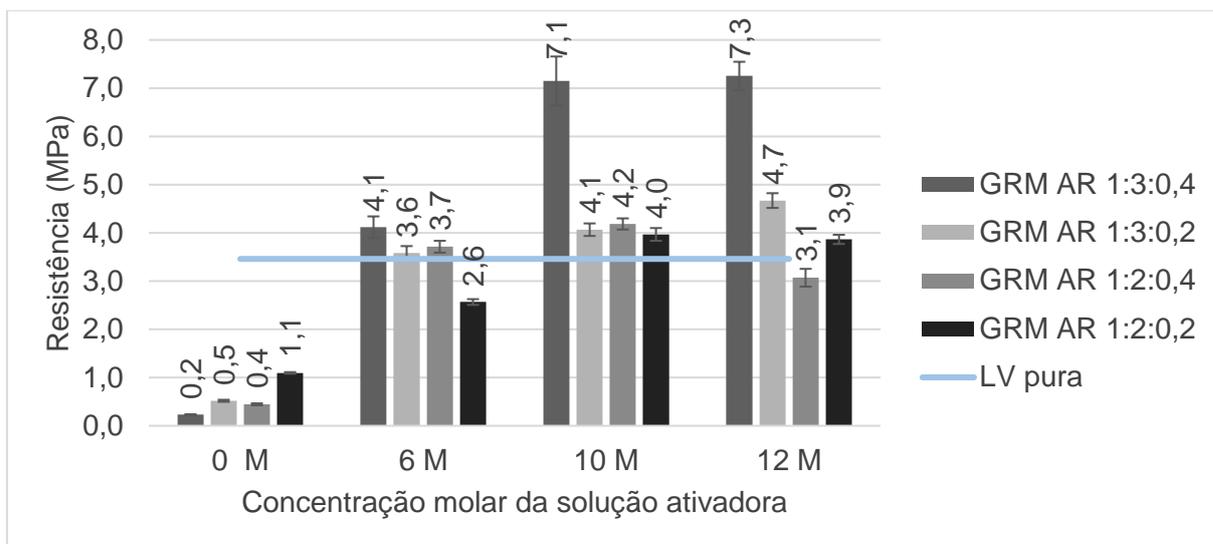


Figura 23 – Resistência à compressão – AR. Fonte própria.

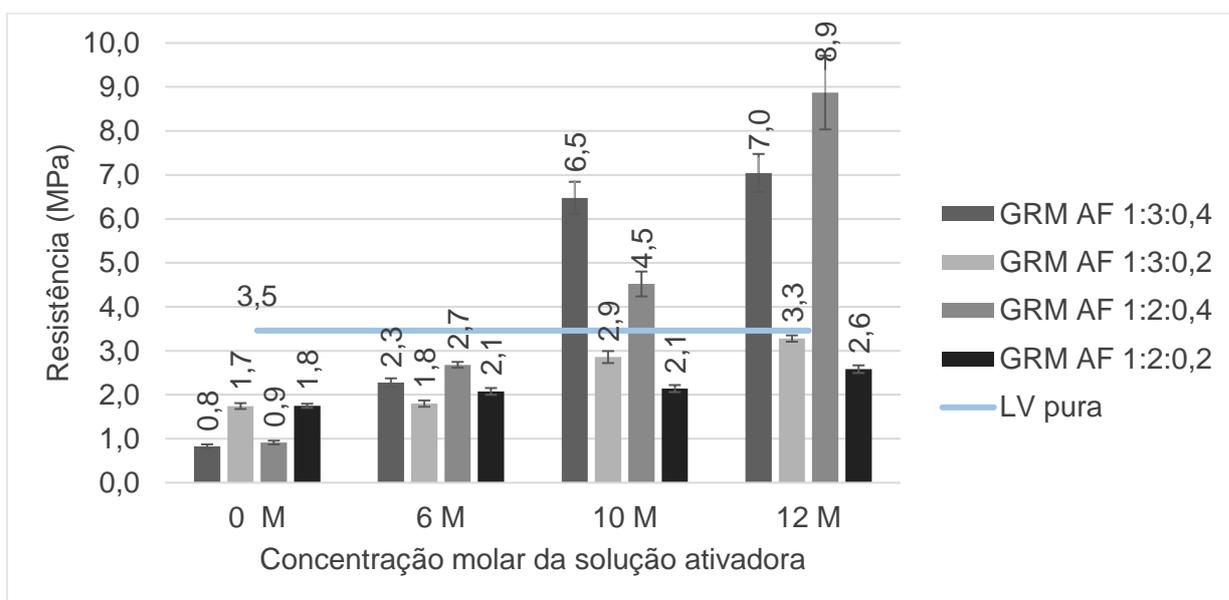


Figura 24 – Resistência à compressão – AF. Fonte própria.

Para fins comparativos, o desempenho dos corpos de prova fabricados com LV pura é apresentado em linhas em ambos os gráficos. Nota-se que, apesar de ser inviável a aplicação do material sem adição por ter se rompido devido à retração, os corpos de prova apresentaram considerável resistência à compressão com valores variando de 0,8 MPa a 8,9 MPa.

O padrão se mantém em relação à resistência à tração na flexão e em geral os melhores resultados foram para o traço 1:3:0,4, com as resistências variando de 7,1 MPa a 7,3 MPa nos corpos de prova fabricados com AR e de 6,5 MPa a 7,0 MPa nos corpos de prova fabricados com AF.

O melhor resultado absoluto foi para o traço 1:2:0,4 fabricado com AF, apresentando uma resistência à compressão de 8,9 MPa aos sete dias de idade. Devido à heterogeneidade dos rejeitos utilizados na fabricação, as propriedades deste corpo de prova podem ter sido alteradas, afetando sua resistência à compressão.

Assim como nos resultados para a resistência à tração na flexão, é observada novamente a tendência de ganho de resistência de acordo com o aumento da concentração da solução ativadora. Os melhores resultados são para as soluções de concentração 10M e 12M.

A superioridade dos resultados com teor de umidade da mistura de 0,4 se mantém. O melhor desempenho pode ser justificado pelo fato de que, com um maior teor de solução, tem-se uma maior disponibilidade de reagente alcalino para ser consumido na reação de ativação.

Segundo as normativas para tijolos cerâmicos maciços NBR 7170 (ABNT, 1983), são três as classes de resistência, apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 – Categorias de resistência à compressão. Fonte: NBR 7170 (ABNT, 1983)

Categoria	Resistência à compressão (MPa)
A	1,5
B	2,5
C	4,0

Nota-se que os melhores resultados se enquadram na categoria de resistência C e que, a partir da solução ativadora com concentração de 6M, todos os resultados enquadram-se acima do limite mínimo de resistência de 1,5 MPa. Não há exigência normativa para a resistência à tração na flexão.

5.10 Absorção de água

Na Figura 25 são apresentados os resultados para o ensaio de absorção de água para os traços fabricados com AR e na Figura 26 são apresentados os resultados para os traços fabricados com AF.

Tanto a normativa de tijolos maciços NBR 7170 (ABNT, 1983) quanto à normativa para componentes cerâmicos para alvenaria NBR 15270-1 (ABNT, 2017) estabelecem que o material deve apresentar absorção de água entre 8% e 22%. Estes limites foram delimitados pelas linhas vermelhas nas figuras.

Os corpos de prova fabricados com LV pura apresentaram uma absorção de água de 24,3%, desrespeitando o limite máximo estabelecido pelas normas técnicas.

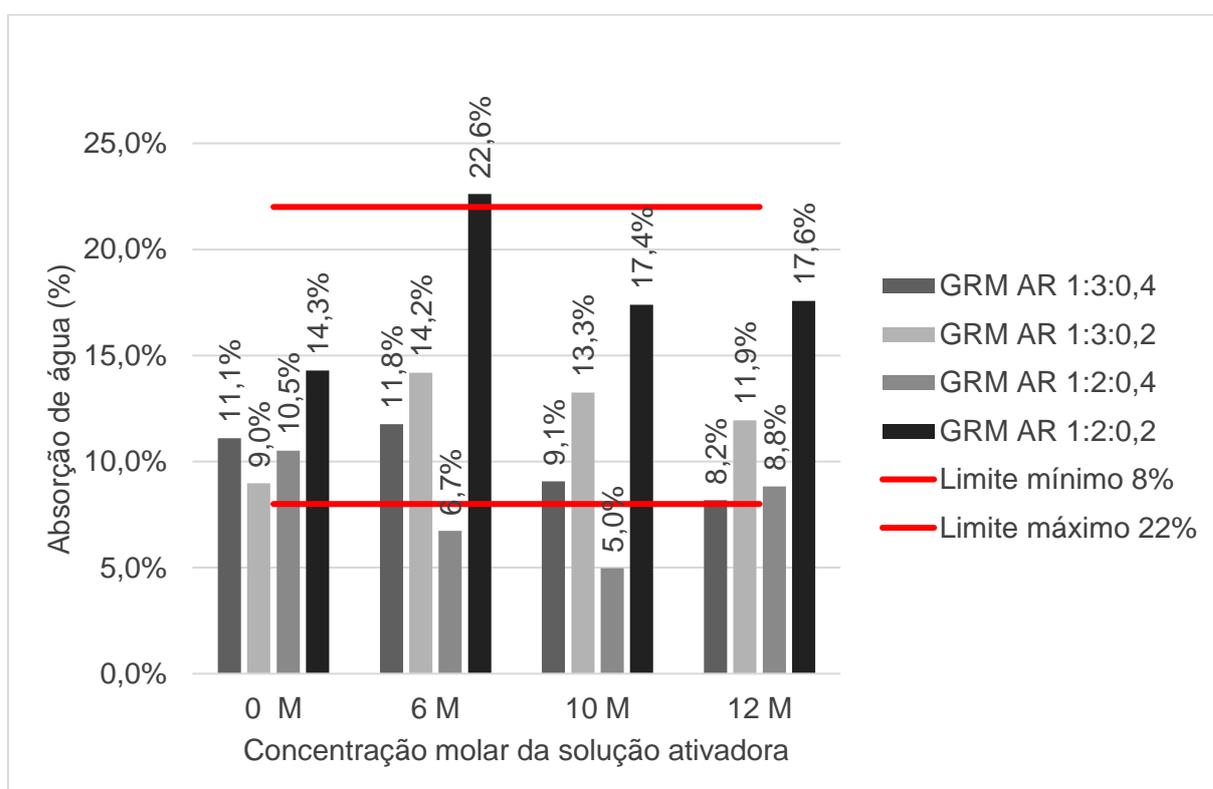


Figura 25 – Absorção de água – AR. Fonte própria.

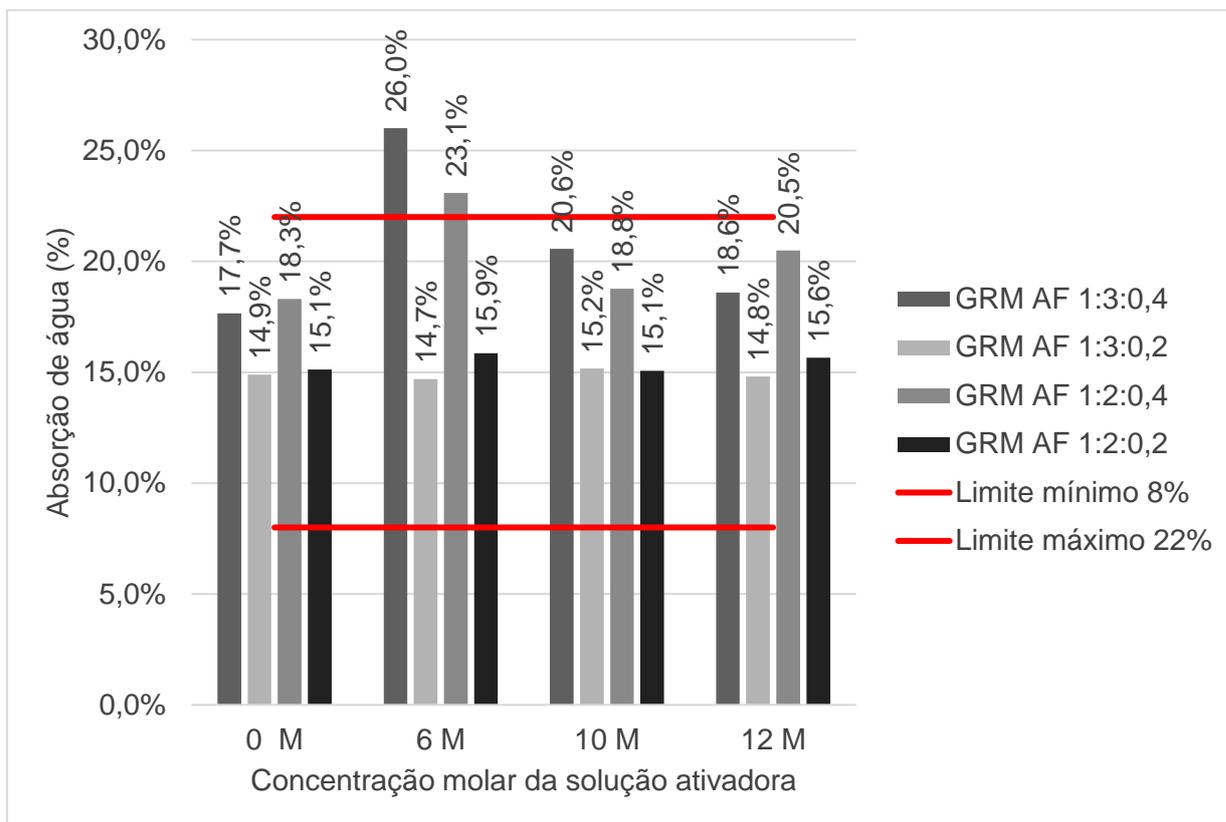


Figura 26 – Absorção de água – AF. Fonte própria.

Analisando os resultados dos ensaios de absorção de água, nota-se que o desempenho dos corpos de prova fabricados com AF foi superior ao desempenho dos que possuíam AR em sua composição. Enquanto apenas dois traços com AF ficaram fora dos limites estabelecidos pelas normativas e os demais apresentaram valores médios com uma variação média de 5,9 pontos percentuais, nos traços com AR foram três resultados fora das especificações técnicas e a variação foi maior, de 9,4 pontos percentuais.

O desempenho foi melhor para as concentrações molares de 0M e 12M, considerando que as concentrações de 6M e 10M apresentaram resultados inadequados por norma em pelo menos um dos traços ensaiados.

A única proporção de traço que não apresentou nenhum resultado não satisfatório para nenhum dos dois agregados miúdos (AR e AF) foi a proporção 1:3:0,2.

5.11 Avaliação da viabilidade normativa

Dentre os traços que respeitaram os limites de retração em todas as dimensões, estão dispostos na Figura 27 os seus respectivos índices de absorção de água.

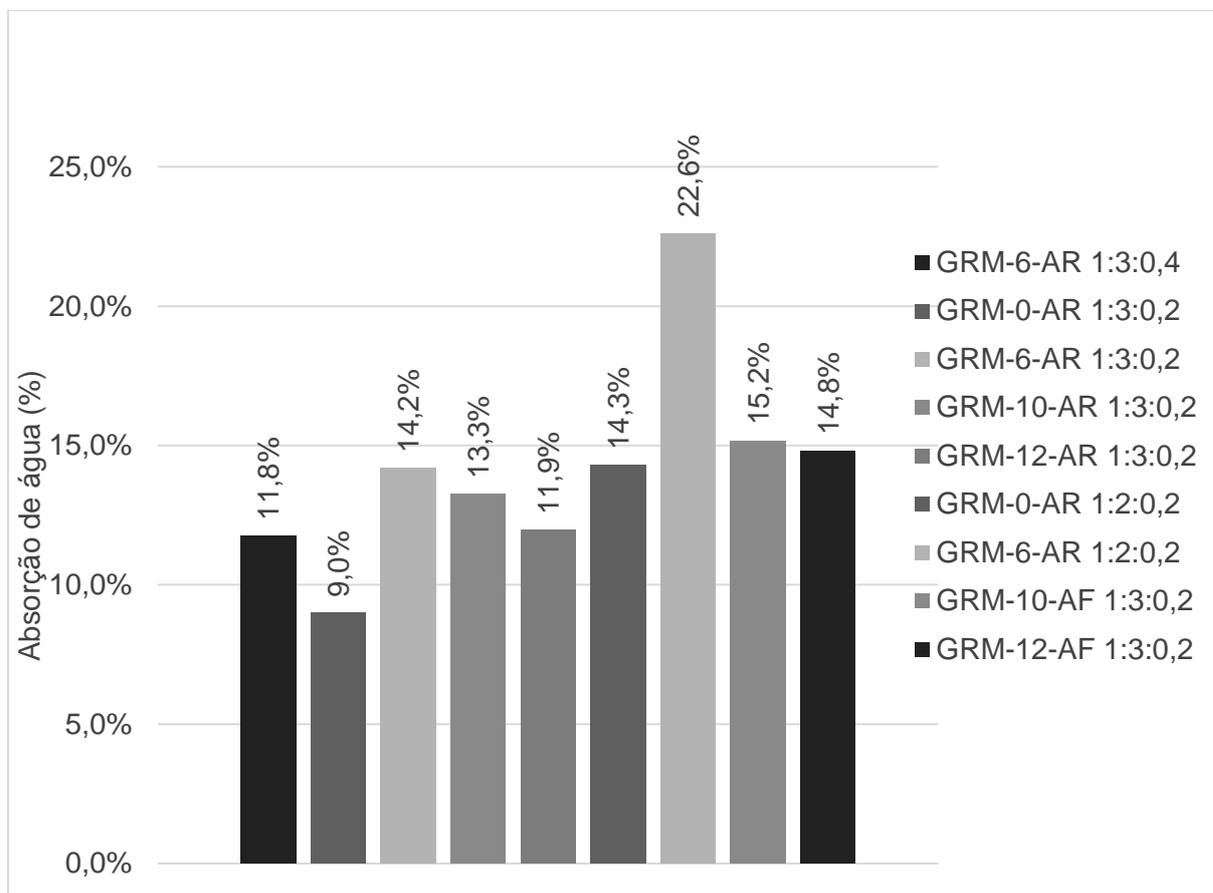


Figura 27 – Absorção de água dos traços com retração adequada. Fonte própria.

Todos os traços respeitaram os limites estabelecidos pelas normativas NBR 7170 (ABNT, 1983) e NBR 15270-1 (ABNT, 2017), com exceção do traço GRM-6-SD 1:2:0,2.

Em termos de resistência à compressão, apenas os traços com solução ativadora de concentração 0M não se enquadram no limite mínimo de 1,5 MPa exigido pela normativa de tijolos cerâmicos maciços NBR 7170 (ABNT, 1983). Os resultados apresentados na Figura 28 indicam que o traço com a maior resistência mecânica é o GRM-12-SD 1:3:0,2, que apresenta resistência à compressão de 4,7 MPa aos sete dias de idade.

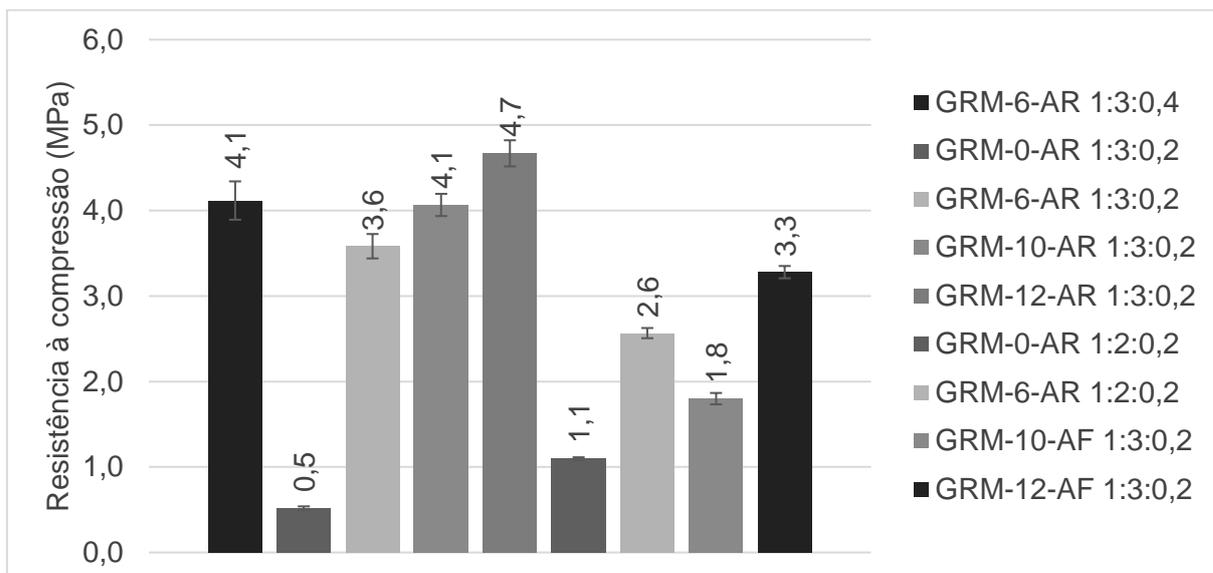


Figura 28 – Resistência à compressão dos traços com retração adequada. Fonte própria.

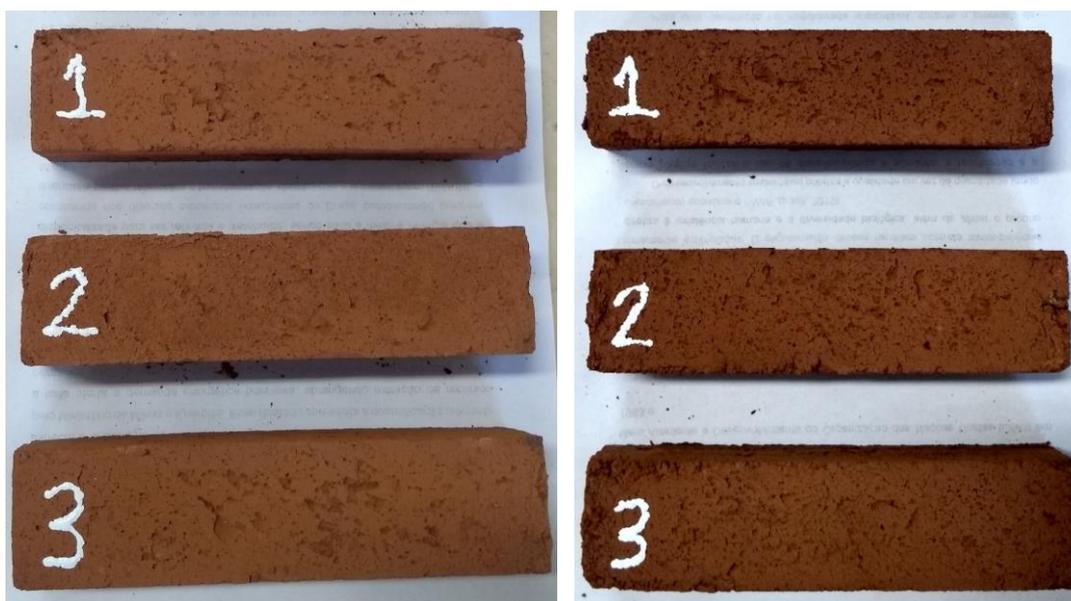
Dessa forma, são viáveis por normativa os traços apresentados na Tabela 7. Os traços produzidos com AF são economicamente e ambientalmente mais vantajosos por não exigirem a extração de agregado miúdo natural e por proporcionarem a incorporação de um maior volume de rejeito em sua produção.

Tabela 7 – Traços viáveis normativamente.

Identificação
GRM-6-AR 1:3:0,4
GRM-6-AR 1:3:0,2
GRM-10-AR 1:3:0,2
GRM-12-AR 1:3:0,2
GRM-10-AF 1:3:0,2
GRM-12-AF 1:3:0,2

Nota-se que os traços adequados por normativa são todos pertencentes à proporção de agregado miúdo 1:3.

Na Figura 29 podem ser observados os corpos de prova produzidos com AF. O traço GRM-10-AF 1:3:0,2 enquadra-se na categoria de resistência A e o traço GRM-12-AF 1:3:0,2 enquadra-se na categoria B.

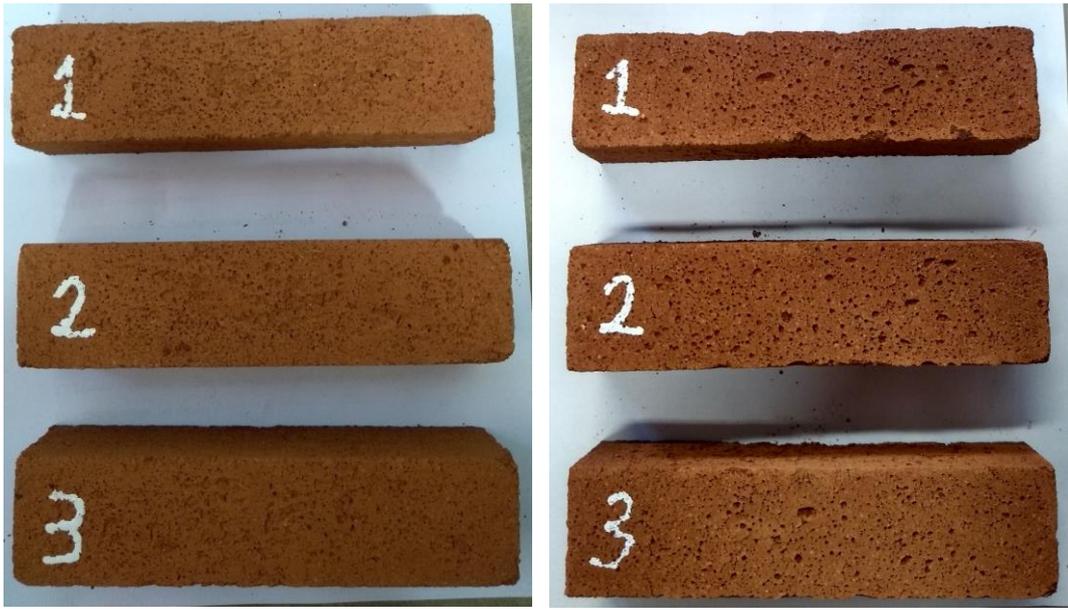


(a)

(b)

Figura 29 – Corpos de prova (a) GRM-10-AF 1:3:0,2 e (b) GRM-12-AF 1:3:0,2. Fonte própria.

Na Figura 30 e na Figura 31 podem ser observados os corpos de prova produzidos com AR. O traço GRM-6-AR 1:3:0,2 enquadra-se na categoria de resistência B e os traços GRM-6-AR 1:3:0,4, GRM-10-AR 1:3:0,2 e GRM-12-AR 1:3:0,2 enquadram-se na categoria C.



(a)

(b)

Figura 30 – Corpos de prova (a) GRM-6-AR 1:3:0,4 e (b) GRM-6-AR 1:3:0,2. Fonte própria.



(a)

(b)

Figura 31 – Corpos de prova (a) GRM-10-AR 1:3:0,2 e (b) GRM-12-AR 1:3:0,2. Fonte própria.

6 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi possível analisar o processo de ativação alcalina dos rejeitos da mineração de alumina, a lama vermelha e a areia ferrosa, para potencial aplicação como material inovador na indústria da construção civil. Os materiais, da forma como se apresentam *in natura*, sem ativador alcalino e sem adição de agregado miúdo, não atenderam as exigências normativas para uso como tijolo cerâmico maciço.

Em comparação à caracterização física e química da lama vermelha estudada em outros trabalhos, o rejeito utilizado neste trabalho apresentou-se dentro do padrão de heterogeneidade, umidade e finura esperados. As correções da umidade natural dos materiais apresentaram melhores resultados para a proporção de umidade final na mistura de 1:0,4.

Os rejeitos, combinados com as soluções ativadoras, resultaram em materiais viáveis segundo as exigências normativas consideradas, enquadrando-se nas categorias de resistência A, B e C. A maior resistência à compressão encontrada dentro dos traços viáveis por norma foi de 4,7 MPa aos sete dias de idade no traço GRM-12-AR-1:3:0,2 e a maior resistência à compressão ensaiada foi de 8,9 MPa no traço GRM-12-AF-1:2:0,4 para a mesma idade de ruptura.

De modo geral, foi possível concluir que a ativação alcalina dos rejeitos foi obtida, visto que houve ganho de resistência à tração na flexão, ganho de resistência à compressão, adequação dos teores de absorção de água e redução da retração em todas as dimensões, comparativamente à lama vermelha ensaiada em seu estado natural. Foi possível observar ainda que todas as características ensaiadas apresentaram ganho de desempenho proporcionalmente ao aumento da concentração alcalina das soluções ativadoras.

Uma vez que foram desenvolvidos materiais com propriedades mecânicas adequadas às normativas vigentes, é comprovadamente viável promover a síntese dos rejeitos da indústria de alumina através das misturas produzidas neste trabalho. Este método de tratamento pode ser muito vantajoso por consumir grande volume de rejeito, sendo necessários cerca de 8 kg de lama vermelha e 12 kg de areia ferrosa

para a produção de 30 tijolos, totalizando 20 kg de resíduos. O consumo destes rejeitos pode impactar diretamente na redução dos volumes armazenados em barragens e pilhas, o que reduziria os custos de retirada da umidade da lama vermelha através de filtros-prensa, aplicado atualmente em muitas indústrias extrativas de alumina.

O custo para a produção do material através da ativação alcalina pode ser inferior e, ainda, gerar margem de lucro ao disponibilizar os tijolos na cadeia produtiva da construção civil, responsável por grande parte do consumo e extração de matéria prima natural. Os procedimentos criados e aplicados, diferentemente das técnicas comumente aplicadas, não envolvem a secagem e moagem dos rejeitos, que são reaproveitados em sua condição natural e promovem um processo produtivo menos custoso e mais limpo.

A inovação e utilização de novos materiais, mais sustentáveis e com maior desempenho técnico, é um dos pilares para o crescimento do setor, que a cada dia demanda mais responsabilidade, consciência e preocupação com o descarte, consumo e sustentabilidade dos recursos naturais.

6.1 Sugestões para trabalhos futuros

Para a completa análise de viabilidade do material, é primordial simular sua aplicação em construções residenciais, prediais e industriais. Portanto, tornam-se necessários estudos que contemplem o desempenho à longo prazo da exposição dos materiais desenvolvidos às condições naturais de intempéries. Também é de grande interesse público a análise financeira da produção do material em escala industrial comparativamente aos métodos de armazenagem dos rejeitos utilizados atualmente e ao custo de mercado do tijolo convencional.

REFERÊNCIAS

ABAL. **Associação Brasileira do Alumínio**, 2019. Disponível em: <<http://www.abal.org.br/>>. Acesso em: Junho 2019.

ABNT. **NBR 7170 - Tijolo cerâmico para alvenaria**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro - RJ. 1983.

ABNT. **NBR 7217 - Agregados - Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro. 1987.

ABNT. **NBR NM 23 - Cimento Portland - Determinação da massa específica**. Rio de Janeiro. 2001.

ABNT. **NBR NM 43 - Cimento Portland - Determinação da pasta de consistência normal**. Rio de Janeiro. 2003.

ABNT. **NBR NM 65 - Cimento Portland - Determinação do tempo de pega**. Rio de Janeiro. 2003.

ABNT. **NBR 10004 - Resíduos Sólidos - Classificação**. Rio de Janeiro. 2004.

ABNT. **NBR 13276 - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência**. Rio de Janeiro. 2005.

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

ABNT. **NBR 9778 - Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**. Rio de Janeiro. 2005.

ABNT. **NBR 7211: Agregados para concreto**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2009.

ABNT. **NBR NM 52 - Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente**. Rio de Janeiro. 2009.

ABNT. **NBR 12653 - Materiais Pozolânicos - Requisitos**. Rio de Janeiro. 2012.

ABNT. **NBR 15270-1 - Componentes cerâmicos - Blocos e tijolos para alvenaria - Parte 1: Requisitos**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro - RJ. 2017.

ABNT. **NBR 16697. Cimento Portland - Requisitos**. ABNT. Rio de Janeiro. 2018.

ANA. Relatório de Segurança de Barragens. **Agência Nacional de Águas**, 2017. Disponível em: <<https://www.ana.gov.br/>>. Acesso em: Junho 2019.

ANM. **Agência Nacional de Mineração**, 2017. Disponível em: <<http://www.anm.gov.br/>>. Acesso em: Junho 2019.

BÁRDOSSY, G. . A. G. J. J. **Lateritic bauxites**. Amsterdam London New York: Elsevier, 1990.

BARROS, T. R. Proposta para produção de aglomerantes para construção civil a partir. **Universidade Federal de Ouro Preto**, Ouro Preto, 2017.

BELL, J. . G. M. . &. K. W. USE OF GEOPOLYMERIC CEMENTS AS A REFRACTORY ADHESIVE FOR METAL AND CERAMIC JOINS. [S.I.]: Ceram. Eng. Sci. Proc, 2005. p. 407-413.

BORGES, P. **Utilização de resíduo de lã de vidro em fabricação de concreto**. Ouro Preto: Dissertação de Mestrado. REDEMAT/UFOP, 2007.

CASTRO, A. L.; PANDOLFELLIL, V. C. Revisão: conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. **Cerâmica**, São Paulo, v. 55, n. 333, Março 2009. ISSN 0366-6913.

CETEM. **Introdução ao Tratamento de Minérios**. Centro de Tecnologia Mineral - CETEM. Rio de Janeiro. 2010.

CONSTANTINO, V. R. L. et al. **Preparação de compostos de alumínio a partir da bauxita: considerações sobre alguns aspectos envolvidos em um experimento didático**. 25. ed. [S.I.]: Química Nova, v. 3, 2002. p. 470-498.

CORR, D. J. et al. Investigating entrained air voids and Portland cement hydration with low-temperature scanning electron microscopy. **Cement & Concrete Composites**, v. 26, p. 1007–1012, 2004.

CRIADO, M. **ALKALI ACTIVATED FLY ASH: EFFECT OF ADMIXTURES ON PASTE RHEOLOGY**. [S.I.]: Rheol Acta, 2009.

DAVIDOVITS, J. **Properties of geopolymer cements, Alkaline Cements and Concretes**. Kiev, Ukraine: [s.n.], 1994.

DAVIDOVITS, J. **Geopolymer Chemistry and Applications**. 4. ed. [S.I.]: [s.n.], 2015. Cap. 1.

DEFÁVERI, K. C. S. . S. L. F. . C. J. M. F. . P. R. A. F. . B. G. J. **Iron ore tailing-based geopolymer containing glass wool residue: A study of mechanical and microstructural properties**. [S.I.]: Construction and Building Materials, v. 220, 2019. p. 375-385.

DNPM. Informe Mineral 1/2017. **Departamento Nacional de Produção Mineral**, 2017. Disponível em: <<http://www.anm.gov.br/dnpm/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/informe-mineral>>. Acesso em: Junho 2019.

DUXSON, P. F.-J. **Geopolymer technology: the current state of the art**. [S.I.]: Journal of Materials Science, 2007. p. 2917–2933.

F. FAN, Z. L. G. X. H. P. C. C. Mechanical and thermal properties of fly. **Construction and Building Materials**, v. 160, p. 66-81, 2018.

FEAM. Fiscalização de Barragens 2019. **Fundação Estadual de Meio Ambiente - MG**, 2019. Disponível em: <<http://www.feam.br/component/content/article/15/1728-barragens-2019>>. Acesso em: Junho 2019.

FLÔRES, J. C. C. . L. H. M. **Fechamento de Mina: aspectos técnicos, jurídicos e socioambientais**. Centro Universitário Morro do Cruzeiro, Ouro Preto– MG : Editora UFOP, 2012. p. 316.

FONSECA, B. **Brasil registra mais de três acidentes com barragens por ano**. **Publica**, 2019. Disponível em: <<https://apublica.org/2019/01/brasil-registra-mais-de-tres-acidentes-em-barragens-por-ano/>>. Acesso em: Junho 2019.

GLUKHOVSKY, V. D. **SOIL SILICATES**. Kiev: Gostroiizdat Publish, 1959.

HABASHI, F. **A textbook of hydrometallurgy**. Enr., Canada: Métallurgie Extractive Québec, 1993. p. 689.

HILDEBRANDO, E. A. **Aplicação de Rejeito do processo Bayer (lama vermelha) como matéria-prima na indústria de cerâmica estrutural**. [S.l.]: Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química – UFPA, 1998.

HIND, R. A. . B. S. K. . G. S. C. **The surface chemistry of Bayer process solids: a review**. [S.l.]: Colloids and surfaces A: Physicochemical and engineering aspects, v. 146, 1999. p. 359-374.

IBGE. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**, 2010-2014. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/explica/pib.php>>. Acesso em: Junho 2019.

IBGE. IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Conhecendo o Brasil**, 2019. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>>. Acesso em: Junho 2019.

IBRAM. Relatório Anual - 2017/2018. **Instituto Brasileiro de Mineração**, 2017. Disponível em: <http://portaldamineracao.com.br/ibram/wp-content/uploads/2018/07/Diagrama%C3%A7%C3%A3o_Relat%C3%B3rioAnual_ver_s%C3%A3oweb.pdf>. Acesso em: Junho 2019.

KRIVENKO, P. **Alkaline Cements**. [S.l.]: **First International Conference on Alkaline Cements**, 1994. p. 12-45.

MANFROI, E. P. C. M. Avaliação da Lama Vermelha como material pozolânico em substituição ao cimento para produção de argamassas. In: MANFROI, E. P. C. M. **Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina**. Florianópolis: UFSC, 2009.

MEHTA, P. K. . M. P. J. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. IBRACON, 2008. 674.

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

NATH, S. K. E. A. Microstructural and morphological evolution of fly ash based geopolymers. **Construction and Building Materials**, India, v. 126, p. 756-765, Mar 2016.

OPERACTION. **Densidade dos materiais. Operaction**, 2020. Disponível em: <<http://www.operaction.com.br/densidade-dos-materiais>>. Acesso em: 18 Julho 2020.

PACHECO-TORGAL F, J. S. Influence of sodium carbonate addition on the thermal reactivity of tungsten mine waste mud based binders. **Construction and Building Materials**, n. 24, p. 56–60, 2010.

PINTO, A. T. **Introdução ao estudo dos geopolímeros**. Vila Real: Universidade Trás-os-Montes e Alto Douro, 2006.

PINTO, T. **SISTEMAS LIGANTES OBTIDOS POR ATIVAÇÃO ALCALINA DO METACAULINO**. [S.I.]: Universidade do Minho, 2004.

REESE, K. M. . C. W. H. In **Aluminum production the first stage is Alumina**. 47. ed. [S.I.]: Industrial and Engineering Chemistry, v. 9, 1955. p. 1672-1680.

RICKARD, W. . V. R. A. . & W. P. THERMAL CHARACTER OF GEOPOLYMERS SYNTHESISED FROM CLASS F FLY ASH CONTAINING HIGH CONCENTRATIONS OF IRON AND QUARTZ. In: **International Journal of Applied Ceramic Technology**. [S.I.]: Ceramic Product Development and Comercialization, 2008.

SÁNCHEZ, P. **Estudo da viabilidade do uso do caulim do quadrilátero ferrífero na fabricação de novos materiais cerâmicos e sua comparação com as cerâmicas tradicionais**. Ouro Preto: Tese de Doutorado. Universidade Federal de Ouro Preto, 2011.

SILVA FILHO, E. B. . A. M. C. M. . D. M. M. **Lama vermelha da indústria de beneficiamento de alumina: produção, características, disposição e aplicações alternativas**. 2. ed. [S.I.]: Revista Matéria, v. 12, 2007. p. 322 – 338.

SILVA, S. & M. Protocolo Reciclos #9 – Método de Blaine. **Universidade Federal de Ouro Preto, RECICLOS**, 2017. Disponível em:

<http://www.reciclos.ufop.br/media/uploads/downloads/PROTOCOLO_RECICLOS_0__metodo_de_blaine.pdf>. Acesso em: Junho 2019.

SOUZA, R. D. Z. **Estudo da Influência do ativador alcalino nas propriedades mecânicas do geopolímero**. [S.l.]: Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de graduação em Engenharia de Materiais da Universidade do Vale do Paraíba, 2012.

TEIXEIRA, N. S.; LIMA, M. H. R. **A indústria do alumínio primário no Brasil: perspectivas de relações comerciais com a China**. Rio de Janeiro: Departamento de Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), 2003.

TORGAL, F. **DESENVOLVIMENTO DE LIGANTES OBTIDOS POR ACTIVAÇÃO ALCALINA DE LAMAS RESIDUAIS DAS MINAS DA PANASQUEIRA**. [S.l.]: [s.n.], 2006.

VAN JAARSVELD, J.; VAN DEVENTER, J.; LUKEY, G. The characterization of source materials in fly ash-based geopolymers. **Materials Letters**, v. 57, p. 1272-1280, 2004.

VASSALO, É. A. D. S. **Obtenção de geopolímero a partir de metacaulim ativado**. Belo Horizonte - MG: Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia (Dissertação de Mestrado), 2013.

VG. Construção Civil é responsável pelo consumo de 75% dos recursos naturais do planeta. **Portal VGV**, 2010. Disponível em: <<https://www.portalvgv.com.br/site/construcao-civil-e-responsavel-pelo-consumo-de-75-dos-recursos-naturais-do-planeta/>>. Acesso em: Junho 2019.

VILLAR, L. F. D. S. Tese de doutorado em Engenharia Civil apresentada ao programa de Pós Graduação da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. In: VILLAR, L. F. D. S. **Estudo do adensamento e ressecamento de resíduos de mineração e processamento de bauxita**. Rio de Janeiro, RJ: PUC- RJ, 2002. p. 28.

VITRILAB. Hidróxido de Sódio 500grs - Pérolas 500grs - Pérolas Hidróxidos Químicos. **VITRILAB - MATERIAL E EQUIPAMENTO DE LABORATÓRIO**, 2019.

Disponível em: <http://www.vitrilab.pt/webcontent/Hidroxido_de_Sodio_500grs_-_Perolas_500grs_-_Perolas_Hidroxidos_Quimicos_.htm>. Acesso em: 04 Set 2020.

WANG, Q. . Y. P. . & F. J. **A Discussion on Improving Hydration Activity of steel slag by altering its mineral compositions**. [S.l.]: Journal of Hazardous Materials, 2010. p. 1070–1075.

WANG, S. . A. H. M. . T. M. O. Novel applications of red mud as coagulant, adsorbent and catalyst for environmentally benign processes. **Chemosphere**, v. 72, p. 1621-1635, 2008.

WAO. **World Aluminium Organization**, 2010. Disponível em: <<http://www.world-aluminium.org/>>. Acesso em: Junho 2019.

WIKIPÉDIA. Hidróxido de sódio. **Wikipédia**, 2020. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Hidr%C3%B3xido_de_s%C3%B3dio>. Acesso em: 18 Julho 2020.

ZHANG, L.; AHMARI, S. Production of eco-friendly bricks from copper mine tailings through geopolymerization. **Elsevier Construction and Building Materials**, v. 29, p. 323–331, 2012.