



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

Thamires Rangueri de Barros

Proposta para produção de aglomerantes para construção civil a partir
de resíduos gerados na indústria de alumina

Ouro Preto / MG
2017

Thamires Rangueri de Barros

Proposta para produção de aglomerantes para construção civil a partir
de resíduos gerados na indústria de alumina

Monografia apresentada ao
Curso de Engenharia Civil da
Universidade Federal de Ouro Preto
como parte dos requisitos para a
obtenção do Grau de Engenheiro
Civil

Área de concentração:
Materiais

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Jorge Brigolini Silva
Co-orientador: Prof. Dr. Ricardo André Fiorotti Peixoto

Ouro Preto / MG
2017

Thamires Rangueri de Barros

Proposta para produção de aglomerantes para construção civil a partir
de resíduos gerados na indústria de alumina

Monografia apresentada ao
Curso de Engenharia Civil da
Universidade Federal de Ouro Preto
como parte dos requisitos para a
obtenção do Grau de Engenheiro
Civil

Prof. Guilherme Jorge Brigolini Silva (D.Sc) - Orientador - UFOP

Prof. Ricardo André Fiorotti Peixoto (D.Sc) – Co-orientador - UFOP

Keoma Defaveri do Carmo e Silva (M.S.c)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, por ter me dado forças para vencer estes cinco anos de lutas e desafios, pela paciência e misericórdia com minha alma. Agradeço aos meus pais, por serem meu porto seguro e meus melhores amigos. Por renunciarem seus desejos pessoais para garantirem minha educação em todos estes anos. À minha irmã Thalita, por ter sido companheira e ter me ajudado sempre que precisei. Ao meu noivo Renan, pela força, incentivo, compreensão e dedicação à nós.

Agradeço ao Grupo de Pesquisa em Resíduos Sólidos Industriais – RECICLOS, por ter proporcionado um ambiente de trabalho e pesquisas sempre alegre e divertido. Agradeço principalmente ao Keoma, Letícia e Junio, por terem me ajudado muito em todas as fases deste trabalho, sem vocês eu não teria conseguido.

Agradeço aos professores Guilherme Brigolini e Ricardo Fiorotti, pelos anos de amizade, paciência, confiança e pelos ensinamentos imprescindíveis. A todos os professores que acreditaram e me ajudaram a trilhar o caminho da engenharia.

A todos, o meu mais sincero Obrigado!

RESUMO

Nos dias atuais, encontrar soluções sustentáveis para o resíduo de bauxita tem se mostrado um dos maiores desafios da indústria do alumínio. Devido à grande quantidade de lama vermelha gerada e aos problemas socioambientais acarretados, propõe-se neste trabalho a geopolimerização como uma solução interessante, uma vez que esta técnica seria capaz de aproveitar características típicas deste material, como alcalinidade e teor de silício e alumínio, e produzir materiais sólidos com propriedades semelhantes às cerâmicas tradicionais. Com a proposta de produção de aglomerantes para a construção civil, este trabalho aborda uma ampla revisão bibliográfica sobre diversos estudos realizados nesta área e caracteriza física e quimicamente uma amostra de lama vermelha proveniente da região de Ouro Preto – MG. Foram feitos os ensaios de pH, granulometria a laser, umidade, fluorescência de raios-X, difração de raios-X, resistência à tração na flexão e resistência à compressão dos corpos de prova produzidos com a lama. Avaliou-se também a influência de diferentes teores de umidade nas resistências para 7 dias de cura e comparou-se aos resultados obtidos para argamassas convencionais de cimento Portland com a mesma idade. Os resultados obtidos estão de acordo com as referências utilizadas e evidenciaram que este processo de geopolimerização pode contribuir na produção materiais utilizáveis na construção civil, como por exemplo o tijolo cerâmico. Dessa forma, teríamos uma alternativa sustentável à utilização deste resíduo e à diminuição dos grandes volumes de lama vermelha depositados no meio ambiente.

Palavras-chave: resíduo de bauxita, lama vermelha, geopolímeros, materiais sustentáveis.

ABSTRACT

Actually, to find a sustainable solution for bauxite waste has been proven to be one of the biggest challenges facing the aluminum industry. Due to the large amount of red mud generated and the socio-environmental problems involved, was proposed the geopolymerization as an interesting solution, since this technique would be able to take advantage of typical characteristics of this material, such as alkalinity and silicon and aluminum content, and to produce solid materials with properties similar to traditional ceramics. With the proposal of binder production for civil construction, this work deals with a wide bibliographic review on several studies in this area and physically and chemically characterizes a sample of red mud from the region of Ouro Preto - MG. The pH, particle size distribution, moisture, X-ray fluorescence, X-ray diffraction, flexural tensile strength and compressive strength of the specimens produced with the red mud were measured. It was also evaluated the influence of different moisture contents in the resistances for 7 days of cure and was compared to the results obtained for conventional mortars of Portland cement with the same age. The results obtained are in accordance with the references used and have shown that this geopolymerization process can contribute to the production of feasible materials for civil construction, such as ceramic brick. In this way, we would have a sustainable alternative to the use of this residue and the reduction of the large volumes of red mud deposited in the environment.

Keywords: bauxite residue, red mud, geopolymers, sustainable materials.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - PRINCIPAIS DEPÓSITOS MINERAIS NAS REGIÕES BRASILEIRAS. FONTE: IBRAM – 2012	17
FIGURA 2 - COMPANHIAS MINERADORAS BRASILEIRAS. FONTE: DNP, 2012.	19
FIGURA 3 - BALANÇA MINERAL BRASILEIRA - EXPORTAÇÕES E IMPORTAÇÕES. FONTE: MDIC – 2012	20
FIGURA 4 - MAPA DA LOCALIZAÇÃO DAS MINAS DE BAUXITA - BRASIL. FONTE: ABAL,2012.	23
FIGURA 5 - FOTO AÉREA DE UMA MINA DE BAUXITA DA ALCOA ALUMÍNIO SA EM POÇOS DE CALDAS MG. FONTE: PANORAMIO, 2016.	24
FIGURA 6 - FLUXOGRAMA E ESQUEMA DO PROCESSO BAYER (ADAPTADO DE WAO,2010).	25
FIGURA 7 - PRINCIPAIS ETAPAS DE PRODUÇÃO DO ALUMÍNIO PRIMÁRIO. FONTE: HYDRO BRASIL, 2016.	28
FIGURA 8 - LAGOA DE DISPOSIÇÃO DE LAMA VERMELHA NA REGIÃO DE BUDAPEST, HUNGRIA. FONTE: EPA/SANDOR, 2006.	28
FIGURA 9 - PROCESSO DE HIDRATAÇÃO DO CIMENTO. FONTE: MEHTA & MONTEIRO.	33
FIGURA 10 - PROCESSO PRODUTIVO DO CIMENTO PORTLAND. FONTE: RESDIL, 2016.	36
FIGURA 11 - ASPECTOS E IMPACTOS AMBIENTAIS E SOCIAIS NO PROCESSO PRODUTIVO DO CIMENTO. FONTE: MAURY, 2012.	38
FIGURA 12 – MONUMENTOS DA ANTIGUIDADE CLÁSSICA. (A) PIRÂMIDES DO EGITO. (B) COLISEU DE ROMA. FONTE: REVISTA GALILEU, 2016.	40
FIGURA 13 - SEQUÊNCIA DE GEOPOLIMERIZAÇÃO. FONTE: NAGEM, 2013.	42
FIGURA 14 - TAXA DE DISSOLUÇÃO EM MEIO ÁCIDO. FONTE: PINTO, 2006.	44
FIGURA 15 - LAMA VERMELHA IN NATURA. FONTE: AUTOR.	45
FIGURA 16 - CONSISTÊNCIA PASTOSA DA LAMA VERMELHA. FONTE: AUTOR.	46
FIGURA 17 - CORPOS DE PROVA NO ESTADO IN NATURA. FONTE: AUTOR.	46
FIGURA 18 - PHMETRO UTILIZADO - HANNA HI 2212. FONTE: AUTOR.	47
FIGURA 19 - GRANULÔMETRO BETTERSIZ 2000. FONTE: DIRECT INDUSTRY.	49
FIGURA 20 - ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO. FONTE: AUTOR.	51
FIGURA 21 - PRENSA EMIC DL 20000 FONTE: AUTOR.	52
FIGURA 22 - MODELO DE CORPOS DE PROVA PRODUZIDOS PARA CADA UMIDADE ESTUDADA. FONTE: AUTOR	52
FIGURA 23 – CP’S APÓS DESMOLDE - 28/05/2017 FONTE: AUTOR.	53
FIGURA 24 - CP’S APÓS DOIS DIAS DE DESMOLDE - 30/05/2017 FONTE: AUTOR.	54
FIGURA 25 – CP’S APOS 16 DIAS DE DESMOLDE – 14/07/2017 FONTE: AUTOR.	54
FIGURA 26 - COMPARATIVO ENTRE O TEOR DE UMIDADE DAS AMOSTRAS	55
FIGURA 27 – RETRAÇÃO (a), VAZIOS E DESPLACAMENTOS (b) - UMIDADE U1. FONTE: AUTOR	56
FIGURA 28 - RETRAÇÃO (A), VAZIOS E DESPLACAMENTOS (B) - UMIDADE U2. FONTE: AUTOR.	56
FIGURA 29 - RETRAÇÃO (A), VAZIOS E DESPLACAMENTOS (B) - UMIDADE U3. FONTE: AUTOR.	56
FIGURA 30 - CURVA GRANULOMÉTRICA DA AMOSTRA DE LV	57
FIGURA 31 - ANÁLISE MINERALÓGICA DA LAMA VERMELHA.	59

FIGURA 32 - RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO.....	60
FIGURA 33 - RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	61

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - ÍNDICE DE DESENVOLVIMENTO HUMANO NAS REGIÕES AFETADAS PELA MINERAÇÃO.	
FONTE: UNDP - 2012	19
TABELA 2 - PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DA BAUXITA. FONTE: CETEM, 2011.	22
TABELA 3 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA LAMA VERMELHA (%) GERADA EM DIFERENTES PAÍSES. FONTE: FILHO, ALVES E MOTTA, 2007.	29
TABELA 4 - ESTUDOS DE VALORIZAÇÃO DA LAMA VERMELHA. FONTE: MANFROY, 2009.	31
TABELA 5 - CONSTITUIÇÃO QUÍMICA DOS CIMENTOS ANTIGOS. FONTE: PINTO, 2006.	41
TABELA 6 - VALORES DE UMIDADE DAS ANÁLISES.	55
TABELA 7 - GRANULOMETRIA DA AMOSTRA DE LV	57
TABELA 8 - TEORES DE ÓXIDOS OBTIDOS NA ANÁLISE QUÍMICA	58
TABELA 9 – MÉDIA DAS RESISTÊNCIAS À TRAÇÃO NA FLEXÃO DAS UMIDADES.	60
TABELA 10 - MÉDIA DAS RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO DAS UMIDADES	61

LISTA DE EQUAÇÕES

<i>EQUAÇÃO 1 - REAÇÃO NO PROCESSO DE DIGESTÃO PARA BAUXITO GIBBISÍTICO</i>	<i>26</i>
<i>EQUAÇÃO 2 - REAÇÃO NO PROCESSO DE DIGESTÃO PARA BAUXITO BOEMITA E DIÁSPORO:</i>	<i>26</i>
<i>EQUAÇÃO 3 - PRECIPITAÇÃO DO HIDRÓXIDO DE ALUMÍNIO</i>	<i>26</i>
<i>EQUAÇÃO 4 - PRODUÇÃO DO ÓXIDO DE ALUMÍNIO</i>	<i>26</i>
<i>EQUAÇÃO 5 - REDUÇÃO DO ALUMÍNIO</i>	<i>27</i>
<i>EQUAÇÃO 6 - TEOR DE UMIDADE</i>	<i>48</i>
<i>EQUAÇÃO 7 - LEI DE BRAGG</i>	<i>50</i>
<i>EQUAÇÃO 8 - RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO</i>	<i>51</i>
<i>EQUAÇÃO 9 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO</i>	<i>52</i>

LISTA DE SIGLAS

ABCP – *Associação Brasileira de Cimento Portland*

ABNT – *Associação Brasileira de Normas Técnicas*

CFEM – *Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais*

CMED - *Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento*

DNPM – *Departamento Nacional de Produção Mineral*

EPA – *Environmental Protec्य Agency*

IBRAM – *Instituto Brasileiro De Mineração*

MDIC – *Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços.*

UNDP – *United Nations Development Program*

LISTA DE SÍMBOLOS

Al – Alumínio

C – Carbono

Cd – Cádmio

Cr – Cromo

Ni – Níquel

Zn – Zinco

Al_2O_3 – Óxido de Alumínio (alumina)

CaO – Óxido de Cálcio (cal)

CO_2 – Dióxido de Carbono

Fe_2O_3 – Óxido de Ferro III (hematita)

H_2O – Água

MgO - Periclásio

NaOH – Hidróxido de Sódio (soda caústica)

SiO_2 - Óxido de silício (sílica)

TiO_2 - Dióxido de Titânio

$\gamma\text{-Al}(\text{OH})_3$ - Gibbsita

$\alpha\text{-AlO}(\text{OH})$ - Diaspório

$\gamma\text{-AlO}(\text{OH})$ - Boehmita

$\text{Ca}_3(\text{AsO}_4)_2$ - Arseniato de Cálcio

$\text{Ca}(\text{OH})_2$ – Hidróxido de Cálcio (cal hidratada)

$(\text{CaO})_3\text{SiO}_2$ - Silicato tricálcico

$(\text{CaO})_2\text{SiO}_2$ - Silicato dicálcico

$\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$ – Aluminato tricálcico

$\text{Ca}_2\text{AlFeO}_5$ – Ferro-aluminato tetracálcico

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	15
2. OBJETIVOS.....	16
2.1. Objetivo Geral.....	16
2.2. Objetivo Específico.....	16
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1. A importância econômica e social da mineração.....	17
3.2. O Ciclo produtivo do alumínio.....	20
3.2.1. Bauxita: da composição ao refino.....	22
3.2.2. Alumina.....	27
3.2.3. A Lama Vermelha: produção, disposição e danos ambientais	28
3.3. Cimento Portland.....	32
3.3.1. Composição do Cimento Portland.....	33
3.3.2. Processo Produtivo do Cimento Portland.....	35
3.3.3. Limitações do Cimento Portland.....	36
3.4. Geopolimerização: das civilizações antigas até a tecnologia atual ...	39
3.4.1. Durabilidade dos cimentos antigos.....	39
3.4.2. Ativação alcalina.....	41
3.4.3. Propriedades dos Geopolímeros	43
3.4.4. Âmbitos e aplicações dos geopolímeros	44
4. METODOLOGIA	45
4.1. Coleta de amostras e estudo inicial.....	45
4.2. Análise de pH	47
4.3. Análise de umidade	47
4.4. Granulometria a laser	48
4.5. Fluorescência de Raios-X.....	49
4.6. Difração de Raios-X	49
4.7. Resistência à tração na flexão.....	50
4.8. Resistência à compressão.....	51

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	53
5.1. Estudo inicial	53
5.2. pH da Lama Vermelha.....	54
5.3. Teores de Umidade	55
5.4. Análise granulométrica	57
5.5. Fluorescência de Raios-X.....	58
5.6. Difração de Raio X	59
5.7. Resistência à tração na flexão.....	60
5.8. Resistência à compressão.....	61
6. CONCLUSÃO	62
7. TRABALHOS FUTUROS	63
8. REFERÊNCIAS	64

1. INTRODUÇÃO

O alumínio é o terceiro elemento mais encontrado na crosta terrestre e o mais abundante entre os elementos metálicos (CARDOSO et al., 2010). Suas propriedades, como resistência à corrosão, maleabilidade, supercondutividade de calor e eletricidade, resistência ao fogo e facilidade de reciclagem, permitem que seja utilizado de forma extensiva em diversos setores da economia mundial.

Nos últimos 15 anos o setor de produção do alumínio brasileiro sofreu grandes mudanças estruturais que propiciaram a criação de uma nova realidade tanto do lado dos suprimentos quanto do lado da demanda (MASSARENTE et al., 2013). Em 2015 o alumínio primário¹ assumiu a condição de principal commodity² brasileira e conquistou a décima maior produção mundial, precedido pela China, Rússia, Canadá e outros (ABAL, 2015).

Para atender à crescente demanda das indústrias de transformação, o desenvolvimento do processo de produção de alumínio iniciou-se em 1888 por Karl Josef Bayer e tornou-se internacionalmente conhecido como “Processo Bayer” (HINDI et al., 1999). Este processo é utilizado para o refino da matéria-prima bauxita³, uma rocha que geralmente é encontrada próxima à linha do Equador e que é lavrada a poucos metros abaixo do solo.

Como resultado do beneficiamento e refino da bauxita, obtém-se a alumina ou óxido de alumínio (Al_2O_3), produto intermediário que requer alta qualidade para se produzir um metal de excelência e de baixo impacto ambiental. A obtenção do alumínio eletrolítico (primário) ocorre pela redução da alumina calcinada por eletrólise no processo conhecido como Hall-Héroult (ABAL, 2016).

Durante a clarificação da bauxita e obtenção da alumina é produzido um rejeito denominado lama vermelha (red mud), principal rejeito industrial do Processo Bayer, que vem sendo disposto de forma direta em lagoas desenvolvidas justamente para este fim. Caso estes locais de disposição não sejam adequadamente projetados, o rejeito pode constituir um risco ao meio ambiente e às populações dos arredores.

¹ Alumínio primário é aquele obtido após o processamento da bauxita e da alumina, por meio de uma série de processos químicos; alumínio secundário é todo metal resultante da reciclagem da sucata de alumínio.

² Palavra inglesa que se refere a produtos primários com baixo grau de industrialização, produzidos em larga escala e comercializados mundialmente. Geralmente são minérios e gêneros agrícolas.

³ Recebeu este nome devido à primeira mineração comercial ter corrido no distrito de Les Baux, França.

Com uma produção anual de 120 milhões de toneladas e inventário total de 2,7 bilhões de toneladas, a lama vermelha representa um importante problema ambiental, visto que não possui praticamente nenhuma aplicação além do pequeno uso em indústrias cimentícias e cerâmicas (Binnemans & Colaboradores, 2013).

O aumento dos custos econômicos e dos riscos ambientais referentes à lama vermelha têm incentivado as empresas e pesquisadores a buscarem por alternativas à aplicação segura deste resíduo (BARROS, 2013). Aliado a isso, tem-se a construção civil como grande consumidor de matéria prima para produção de materiais e a constante preocupação com o desenvolvimento sustentável deste setor da economia.

Diante deste panorama econômico e agravante ambiental, o presente trabalho propõe como contribuição à redução deste rejeito e ao desenvolvimento de novos materiais de base tecnológica no setor da construção civil, a utilização da lama vermelha na produção de materiais aglomerantes⁴ por meio da geopolimerização, como ferramenta para conter o resíduo de bauxita na forma de um sólido coeso, com propriedades que lhe permitam agregar valor.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Esta pesquisa propõe a utilização de rejeito da indústria de alumina para a produção de aglomerantes destinados à construção civil.

2.2. Objetivo Específico

- Coleta e caracterização física e química do rejeito;
- Estudo e proposta dos resíduos para a aplicação como precursor para a produção de aglomerantes;
- Avaliação das propriedades da geopolimerização da lama vermelha.
- Influência da umidade na resistência dos geopolímeros.

⁴ Matérias ligante, geralmente pulverulento, que promove a união entre os grãos dos agregados. Os aglomerantes são utilizados na obtenção de pastas, argamassas e concretos.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. A importância econômica e social da mineração

Em relação à perspectiva da mineração, o Brasil destaca-se por ser um dos principais produtores mundiais de minérios (Global Player) e por possuir uma das maiores reservas geológicas conhecidas (IBGE, 2016). O País ocupa a liderança mundial como detentor de reservas de nióbio⁵ e tantalita⁶ e se situa entre os seis maiores detentores mundiais das reservas de caulim, grafita, bauxita, talco, vermiculita, estanho, magnesita, ferro e manganês (FLÔRES, 2012).

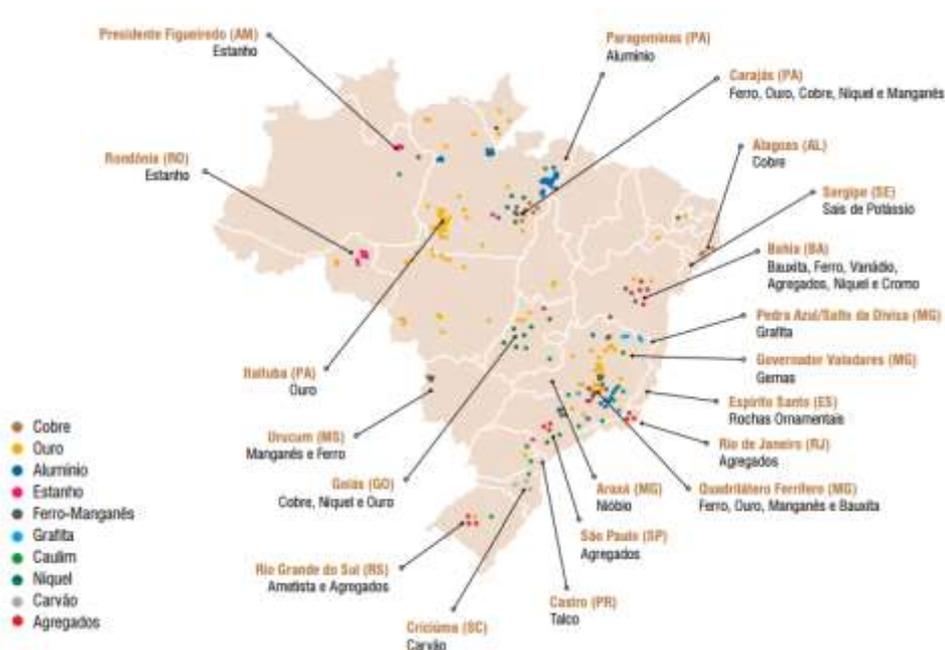


FIGURA 1 - PRINCIPAIS DEPÓSITOS MINERAIS NAS REGIÕES BRASILEIRAS. FONTE: IBRAM – 2012

Por possuir mais de 8,5 milhões de km² e uma grande diversidade de terrenos e formações geológicas, os recursos minerais brasileiros são expressivos e abrangem uma produção de 72 substâncias minerais, das quais 23 são metálicas, 45 não-metálicas e 4 energéticas (PINHEIRO, 2011).

A trajetória da mineração brasileira iniciou-se há 500 anos, concomitantemente ao descobrimento do país. Com a chegada do governo português, os ibéricos empenharam-se na busca por ouro e pedras preciosas

⁵ Elemento químico usado como liga na produção de aços especiais e um dos metais mais resistentes à corrosão e temperaturas extremas.

⁶ Minério composto de ouro, nióbio e tântalo. Bastante valorizado e aplicado na indústria eletrônica por oferecer resistência ao calor.

em áreas mais distantes do litoral brasileiro. Apesar das inúmeras tentativas lusitanas, apenas na segunda metade do século XVII foram descobertas jazidas de ouro nas montanhas que hoje compõem o estado de Minas Gerais (ABAL, 2016).

Com o desenvolvimento da ciência no país, a procura e descoberta de jazidas, a tecnologia de processos extrativistas e a produção mineral cresceram a passos largos, criando uma associação direta com as etapas históricas e a prosperidade econômica do Brasil, como evidenciado a seguir (ABAL, 2016).

- Séculos XVI a XIX:

- Entradas e Bandeiras;
- Ciclo do ouro e dos diamantes (MG, BA, GO E MT);
- Primeiras indústrias de ferro (MG e SP).

- Século XX

- **Início da industrialização** (pós Revolução de 1930) e que se firma com a Segunda Guerra Mundial (grande siderurgia, cimento, metalurgia de alumínio, cobre, chumbo, tungstênio e outros para o “Esforço de Guerra”);
- **Década de 50** e seguintes: ampliação e diversificação da indústria (automobilística, naval, eletrodomésticos e outras), do agronegócio (cana-de-açúcar, grãos, pecuária, suinocultura, avicultura e outros) e da produção mineral, tanto para consumo interno quanto para exportação.
- **Século XXI:** Brasil com mais de 8800 empresas mineradoras atuando em todo o território, se firma como “Global Player” na Mineração.



FIGURA 2 - COMPANHIAS MINERADORAS BRASILEIRAS. FONTE: DNPM, 2012.

Com o passar dos anos, as técnicas e processos rudimentares evoluíram para ações empresariais totalmente aderente às práticas internacionais de sustentabilidade, aliando a responsabilidade social e a preservação ambiental aos objetivos financeiros das operações minerárias (IBRAM, 2003).

Historicamente, a mineração sempre desempenhou um fator significativo no desenvolvimento econômico e social de áreas remotas, atuando como fator de atração de novos empreendimentos. Hoje, em regiões de poucas ofertas de emprego, a mineração representa uma das poucas oportunidades – quando não se constitui a única – de realização de atividades econômicas organizadas (FLÔRES, 2012).

TABELA 1 - ÍNDICE DE DESENVOLVIMENTO HUMANO NAS REGIÕES AFETADAS PELA MINERAÇÃO. FONTE: UNDP - 2012

Municípios – Estados	Minério	IDH do Estado	IDH do Município
Itabira – MG	Minério de Ferro	0,766	0,798
Araxá – MG	Nióbio	0,766	0,799
Nova Lima – MG	Ouro	0,766	0,821
Catalão – GO	Fosfato	0,773	0,818
Cachoeiro de Itapemirim – ES	Rochas Ornamentais	0,767	0,770
Parauapebas – PA	Minério de Ferro	0,720	0,740
Oriximiná – PA	Bauxita	0,720	0,769
Presidente Figueiredo – AM	Cassiterita	0,713	0,742

Os maiores estados produtores de minérios em 2012, de acordo com o recolhimento da CFEM⁷ – Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais, são: MG (53,2%), PA (28,6%), GO (4,1%), SP (2,8%), BA (2,0%) e outros (9,3%). Em 2012, a arrecadação da CFEM alcançou novo recorde de R\$ 1,832 bilhão. Em 2011 a arrecadação já havia sido significativa com R\$ 1,540 bilhão, ou seja, 42,8% superior à de 2010, que foi de R\$ 1,078 bilhão (IBRAM, 2012).

Nos dias atuais, a evolução tecnológica da informática, das telecomunicações e da eletrônica, cria uma dependência significativamente maior do homem aos produtos provenientes do subsolo em comparação com a época da Revolução Industrial. Dessa forma, a indústria extrativa mineral não se apresenta apenas como uma atividade econômica de destaque da balança comercial brasileira, mas sim como uma prática imprescindível ao desenvolvimento social e tecnológico.

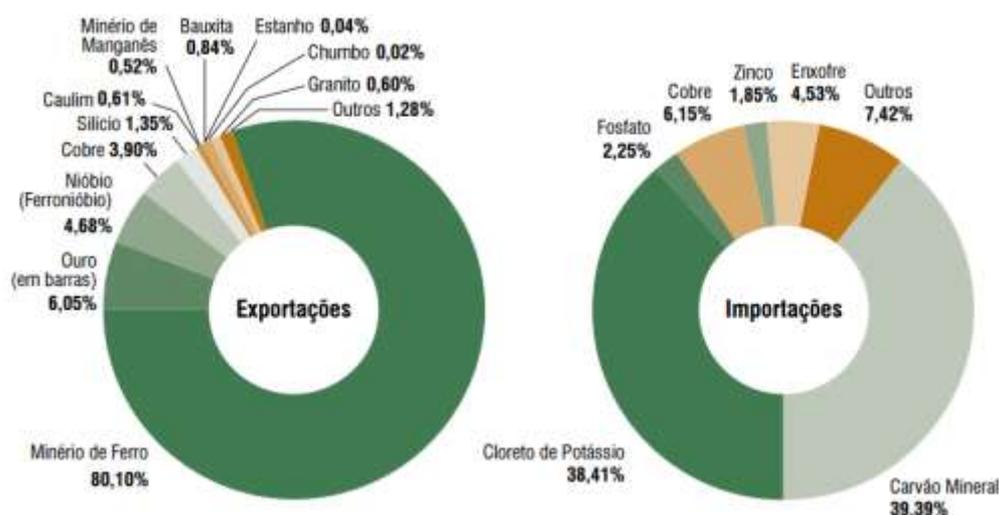


FIGURA 3 - BALANÇA MINERAL BRASILEIRA - EXPORTAÇÕES E IMPORTAÇÕES. FONTE: MDIC – 2012

3.2. O Ciclo produtivo do alumínio

Apesar de ser o terceiro elemento mais abundante na crosta terrestre (8%), o alumínio necessita de processos tecnológicos para sua utilização e, por esse motivo, foi o metal mais jovem incorporado nas operações industriais. Há

⁷ Conhecida também como “royalty” da mineração, é um dos muitos encargos incidentes na cadeia mineral. Contribuição estabelecida pela constituição de 1988.

sete mil anos, vasos de cerâmica eram produzidos na Pérsia com um tipo de barro que continha óxido de alumínio (Al_2O_3), hoje conhecido como alumina. Trinta séculos mais tarde, egípcios e babilônios usaram uma outra substância contendo alumínio na fabricação de cosméticos e produtos medicinais (ABAL, 2016; DNPM, 2016).

Suas aplicações industriais são relativamente recentes, sendo produzido em escala industrial a partir do final do século XIX. Quando foi descoberto verificou-se que seu processamento a partir das rochas que o continham era extremamente difícil, e tal fato o classificou, durante alguns anos, como um metal mais valioso que o ouro (ABAL, 2016).

No Brasil, duas iniciativas concorreram para implantar a produção de alumínio: a da Elquisa - Eletroquímica Brasileira S/A, de Ouro Preto (MG) e a da CBA - Companhia Brasileira Alumínio, de Mairinque (SP). A Elquisa teve dificuldades de comercialização devido ao excesso de produção mundial de alumínio e somente em 1938, com o apoio do governo Vargas, começou em definitivo a produção do metal em Ouro Preto.

Com uma combinação de aumento de renda e maior conscientização sobre temas de sustentabilidade, criaram-se as condições para que a demanda pudesse começar a se materializar. Hoje, 75% do consumo de alumínio no Brasil está em quatro setores, os mesmos quatro que concentram mundialmente a demanda pelo metal: Bebidas (embalagens), Transportes, Construção Civil e Eletricidade (MASSARENTE, et. al., 2013).

Sua obtenção na forma metálica segue um processo que se inicia, usualmente, na mineração de bauxita, seguida do seu beneficiamento⁸. Todas as etapas da cadeia produtiva do alumínio serão citadas a seguir, mas somente as etapas relevantes para esta pesquisa serão esclarecidas no decorrer deste trabalho. São elas:

- Extração e beneficiamento da bauxita;
- Produção de óxido de alumínio (alumina);
- Obtenção do metal primário em lingotes ou líquido (alumínio 99,7%);
- Fabricação de produtos semimanufaturados;

⁸ Operações que buscam modificar a granulometria, a concentração relativa e/ou a forma dos minerais, sem que haja modificação das identidades química e física destes.

- Fabricação de produtos manufaturados finais;
- Reciclagem.

3.2.1. Bauxita: da composição ao refino

O nome “bauxita” é derivado da cidade Le Baux na França onde foi identificada em 1821, pelo geólogo Pierre Berthier. O Centro de Tecnologia Mineral (CETEM) define: “bauxita é constituída por óxido de alumínio hidratado de composições variáveis” (SILVA FILHO, et. al., 2007).

Tais variabilidades de composições são derivadas principalmente da gênese dos depósitos de rocha, podendo conter um ou vários hidróxidos de alumínio e algumas impurezas (SOUZA SANTOS, 1989). Embora seja descrita como minério de alumínio, a heterogeneidade da bauxita em espécie deve-se principalmente às impurezas como sílica, óxido de ferro (hematita, magnetita, goethita e outros) e titânio, e pelos hidróxidos gibbsita ($\gamma\text{-Al}(\text{OH})_3$), diaspório ($\alpha\text{-AlO}(\text{OH})$) e boehmita ($\gamma\text{-AlO}(\text{OH})$), sendo que os últimos apresentam polimorfismo⁹.

Na Europa há a predominância do hidróxido boehmita, na China depósitos de diaspório, e nas regiões tropicais como Brasil, Guiana, Jamaica e países africanos, as jazidas são compostas predominantemente por gibbsita e são as que apresentam maior interesse comercial (CETEM, 2001). A bauxita forma-se principalmente pela ação do intemperismo, ao qual a superfície da crosta terrestre está submetida, sobre rochas aluminossilicáticas.

A composição típica da bauxita de uso industrial é: 40-60% de Al_2O_3 ; 12-30% de H_2O combinada; 1-15% de SiO_2 livre e combinada; 1-30% de Fe_2O_3 ; 3-4% de TiO_2 ; 0,05-0,2% de outros elementos e óxidos (LIMA, 2002). A Tabela 2 a seguir apresenta as principais características da bauxita.

TABELA 2 - PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DA BAUXITA. FONTE: CETEM, 2011.

	GIBBSITA	BOEHMITA	DIASPÓRIO
Al_2O_3 (%)	65,4	85,0	85,0
Peso Específico	2,3 – 2,4	3,01 – 3,06	3,3 – 3,5

⁹ Propriedade de minerais que possuem a mesma composição química, mas estruturas cristalinas diferentes.

A bauxita é normalmente extraída em explorações a céu aberto, geralmente em camadas de 4 a 6 metros de espessura em um revestimento superficial de solo e vegetação, favorecendo, na maioria dos casos, a remoção do solo por maquinários menores como retroescavadeiras. Oitenta por cento da produção de bauxita do mundo ocorre em minas de superfície, sendo o restante, principalmente do Sul da Europa e Hungria, a partir de escavações subterrâneas (WAO, 2010).

As principais empresas produtoras do segmento metalúrgico são: Mineração Rio do Norte S/A (MRN) em Oriximiná (PA); Cia. Geral de Minas (Alcoa) em Poços de Caldas (MG); Cia. Brasileira do Alumínio (CBA) em Itamarati e Cataguases ambas em Minas Gerais; a Novelis do Brasil Ltda. em Ouro Preto (MG) e VALE com produção em Paragominas (PA), de acordo com a Figura 4 a seguir.

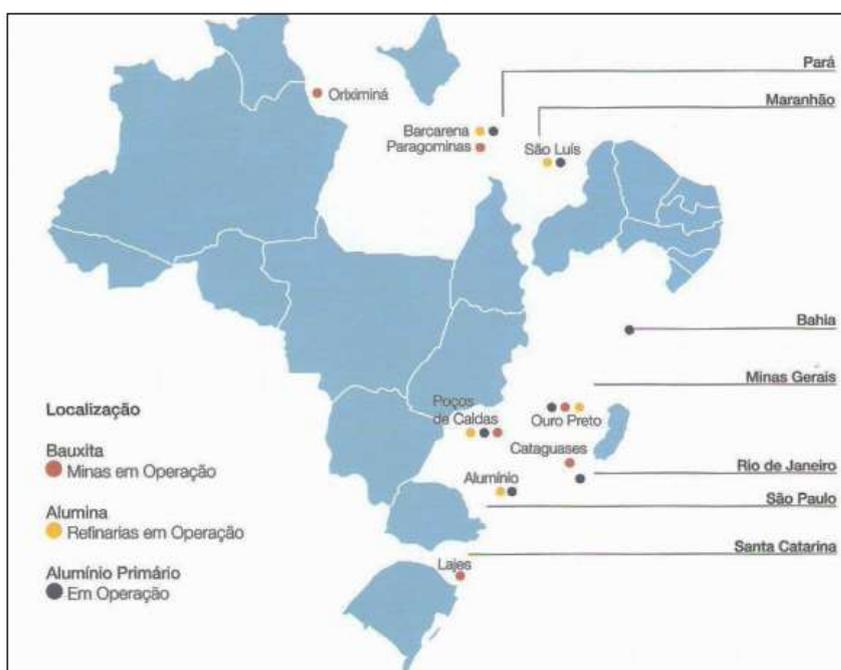


FIGURA 4 - MAPA DA LOCALIZAÇÃO DAS MINAS DE BAUXITA - BRASIL. FONTE: ABAL,2012.

Atualmente o Brasil ocupa a terceira posição no ranking de reservas de bauxita do mundo. As reservas brasileiras caracterizam-se por serem tanto de grau metalúrgico (83,7%), para a produção de alumina, como de grau não metalúrgico ou refratária (16,3%), utilizada na produção da indústria química (sulfato de alumínio), de abrasivos e de cimento (aluminoso) e refratários (TEIXEIRA, 2003).



FIGURA 5 - FOTO AÉREA DE UMA MINA DE BAUXITA DA ALCOA ALUMÍNIO SA EM POÇOS DE CALDAS MG. FONTE: PANORAMIO, 2016.

Segundo o Balanço Mineral Brasileiro (BRASIL, 2001), as reservas brasileiras de bauxita são do tipo tri-hidratada, enquanto que jazidas encontradas na França, Grécia e Hungria, são do tipo monohidratadas. Esse fato é essencialmente positivo, pois as plantas de alumina projetadas para utilizarem bauxitas tri-hidratadas exigem pressões e temperaturas mais baixas, o que implica custos de tratamentos menores.

Como citado anteriormente, o processo utilizado para o refino da bauxita é denominado “Processo Bayer”, e possui por objetivo concentrar o hidróxido de alumínio presente na rocha. O processo se baseia no princípio de que os hidratos de alumínio são muito solúveis em soda caustica, não ocorrendo o mesmo com os outros óxidos constituintes da rocha, que não são aproveitáveis (VILLAR, 2002).

Na primeira etapa do processo (conhecida como área vermelha), ocorre a solubilização do hidróxido de alumínio e sua separação dos sólidos, já na segunda (área branca) há a precipitação do mesmo, como ilustra a Figura 5 a seguir.

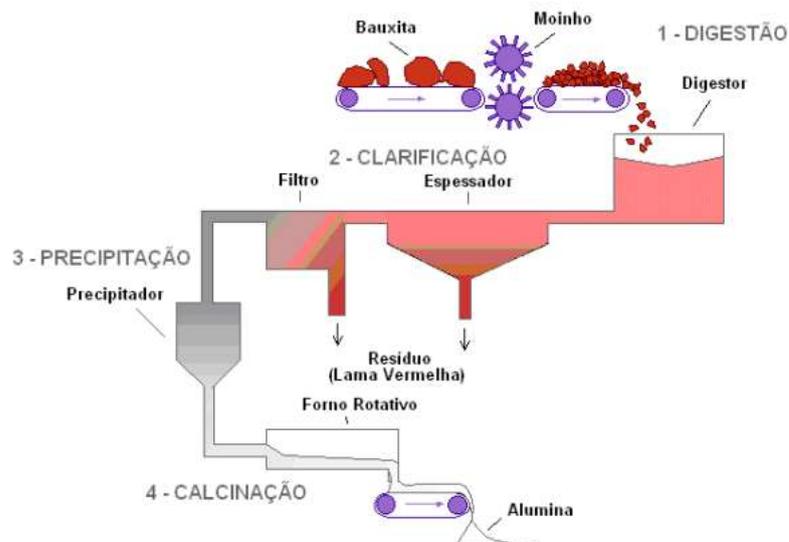


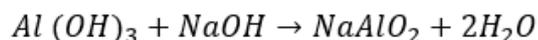
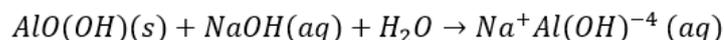
FIGURA 6 - FLUXOGRAMA E ESQUEMA DO PROCESSO BAYER (ADAPTADO DE WAO,2010).

Na mineração de bauxita ocorre a remoção do solo orgânico que será estocado e reservado para um futuro trabalho de recomposição e reflorestamento do terreno, após extração do minério. Por conseguinte, a bauxita sofre um processo de lavagem para a retirada de material argiloso e sílica livre, gerando aproximadamente 30 % de resíduo (mistura de argila e sílica) (BARROS, 2013).

Após uma adequação granulométrica feita por de um moinho de bolas (diâmetros entre 0,08 mm e 0,06 mm), o material passante abaixo de 44 μm segue para a etapa de digestão, onde é adicionado a uma solução de cal (CaO) e NaOH sob determinadas condições de pressão e temperatura. A adição de cal, tem como principal finalidade promover a redução, por precipitação, de íons carbonato e fosfatos dissolvidos no meio (CBA, 2008; CONSTANTINO et al., 2002).

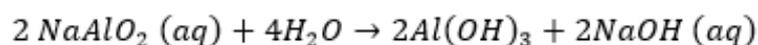
As condições experimentais da etapa de digestão podem variar muito e um dos aspectos a ser considerado é a natureza do composto que contém alumínio pois a gibbsita apresenta maior solubilidade em solução de soda do que as duas formas $\text{AlO}(\text{OH})$ polimórficas. Nesta etapa, o NaOH reage com a gibbsita em uma faixa de temperatura de 140 a 160°C, formando uma solução de aluminato de sódio, também conhecida como “licor verde”¹⁰. As Equações 1 e 2 que descrevem a dissolução é:

¹⁰ Licor concentrado ou lixívia é a denominação da solução alcalina cuja concentração foi acertada para a digestão da bauxita.

EQUAÇÃO 1 - REAÇÃO NO PROCESSO DE DIGESTÃO PARA BAUXITO GIBBSÍTICO**EQUAÇÃO 2 - REAÇÃO NO PROCESSO DE DIGESTÃO PARA BAUXITO BOEMITA E DIÁSPORO:**

A solução que contém o aluminato de sódio e os resíduos do bauxito em suspensão são transferidos aos espessadores onde, com auxílio de agentes floclulantes, os resíduos são separados por sedimentação, formando o resíduo lama vermelha (red mud). Um dos fatores que influenciam a velocidade de sedimentação é a relação goethita/hematita¹¹, quanto maior a quantidade de hematita presente no sistema maior a velocidade (NAGEM, 2013).

O material filtrado é esfriado, e vai à etapa de precipitação. Nesta etapa, ocorre a adição de cristais de hidróxido de alumínio para estimular a precipitação de $Al(OH)_3$ (Equação 3). Após a remoção do $Al(OH)_3$, o filtrado alcalino é concentrado por evaporação e retornado à etapa de digestão. A maior parte do hidróxido de alumínio é calcinada¹² para produzir óxido de alumínio (Al_2O_3) (Equação 4), enquanto que uma pequena fração é submetida à secagem e usada como tal (ANTUNES, 1998).

EQUAÇÃO 3 - PRECIPITAÇÃO DO HIDRÓXIDO DE ALUMÍNIO**EQUAÇÃO 4 - PRODUÇÃO DO ÓXIDO DE ALUMÍNIO**

¹¹ Óxidos de ferro.

¹² Tratamento térmico de sólidos, capaz de promover transformações fisicoquímicas como a eliminação de substâncias voláteis neles contidas. Desidratação.

3.2.2. Alumina

A maior parte (cerca de 90%) da alumina mundial obtida pela calcinação do $\text{Al}(\text{OH})_3$ é usada no processo eletrolítico Hall-Héroult para a preparação do alumínio metálico (aproximadamente 0,5 tonelada de alumínio é produzida por tonelada de alumina). Os outros 10% são aplicados em diversos setores da indústria para a fabricação de materiais refratários, abrasivos, velas de ignição, cerâmicas e outros (CONSTANTINO, 2002).

A fase de produção de alumínio primário é a etapa de maior consumo energético na cadeia produtiva (>90%). No processo de produção de alumínio eletrolítico, a alumina produzida na refinaria é solubilizada em um eletrólito fundido a aproximadamente 950°C , onde a corrente elétrica produzida quebra as moléculas de alumina para formar o alumínio. Posteriormente, retira-se o alumínio das cubas eletrolíticas e transporta-o ao lingotamento onde será ajustada a composição química do produto final (Grotheim e Welch, 1988). A Equação 5 representa a redução do alumínio.

EQUAÇÃO 5 - REDUÇÃO DO ALUMINIO



Todas as etapas de refino e transformação da alumina estão ilustradas na Figura 7 que se apresenta a seguir. O detalhamento do processo eletrolítico, fundição, extrusão¹³ e laminação não serão detalhados neste trabalho por não serem relevantes no objetivo da pesquisa.

¹³ Passada forçada, através de um orifício, de uma porção de metal ou de plástico, para que adquira forma alongada ou filamentosa.

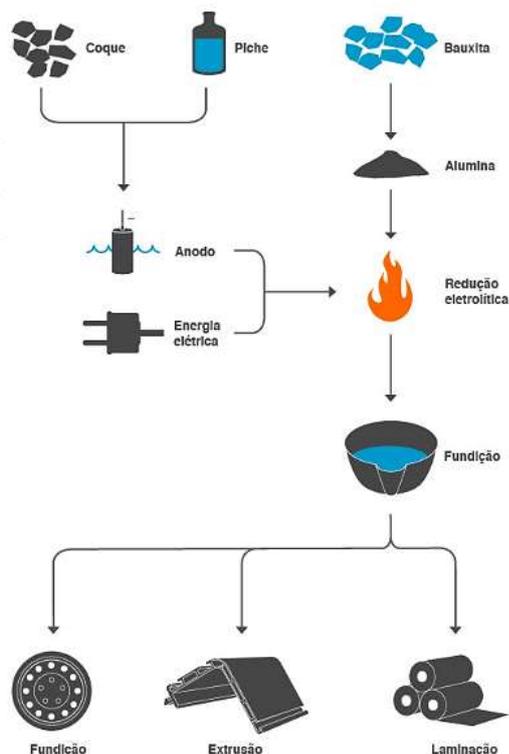


FIGURA 7 - PRINCIPAIS ETAPAS DE PRODUÇÃO DO ALUMÍNIO PRIMÁRIO. FONTE: HYDRO BRASIL, 2016.

3.2.3. A Lama Vermelha: produção, disposição e danos ambientais

A lama vermelha (red mud) consiste no resíduo dos componentes minerais insolúveis que resta após a digestão da bauxita pelas soluções de hidróxido de sódio, na fabricação de alumina pelo processo Bayer (HILDEBRANDO, 1998). Os óxidos e hidróxidos de ferro, por serem praticamente insolúveis em soluções alcalinas, se encontram em sua totalidade na lama, dando a tonalidade avermelhada das lagoas de rejeito (Figura 8).



FIGURA 8 - LAGOA DE DISPOSIÇÃO DE LAMA VERMELHA NA REGIÃO DE BUDAPEST, HUNGRIA. FONTE: EPA/SANDOR, 2006.

Durante o processo Bayer o resíduo é descartado na forma de pasta apresentando concentração de sólidos na faixa de 10-30%, pH em torno de 13 e elevada força iônica. A composição química da lama vermelha varia extensamente e depende da natureza da bauxita e da técnica empregada no processo Bayer em cada planta industrial (Tabela 3). Normalmente, a lama vermelha retém todo o ferro, titânio e sílica presentes na bauxita, além do alumínio que não foi extraído durante o refino, combinado com o sódio sob a forma de um silicato hidratado de alumínio e sódio de natureza zeolítica¹⁴ (REESE & CUNDIFF, 1955; MCCONCHIE et. Al., 2002). Podem conter traços de óxidos de V, Ga, P, Mg, Zn, Th, Ni, Mn, Cr e Nb (WANG et al, 2008; PRADHAN et al, 1996).

TABELA 3 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA LAMA VERMELHA (%) GERADA EM DIFERENTES PAÍSES. FONTE: FILHO, ALVES E MOTTA, 2007

Referência	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Na ₂ O	TiO ₂	MgO	CaO	K ₂ O	LOI ⁽¹⁾	País
Freitas (2003)	46,60	14,36	16,57	2,43	4,34	0,08	2,62	-	-	Brasil
Pan et al (2003)	9,46	7,17	17,75	3,23	2,41	1,51	38,69	0,50	16,38	China
Gencet al (2003)	34,05	25,45	17,06	2,74	4,90	1,86	3,69	-	-	Austrália

A literatura apresenta controvérsia quanto à toxicidade da lama vermelha. A lama vermelha não é particularmente tóxica (NUNN, 1998), inclusive a Environmental Protection Agency (EPA) não classifica a lama vermelha como um resíduo perigoso (EPA, 2005). Entretanto, Hind et al. (1999), consideram-na tóxica, na medida em que pode constituir um perigo para as populações vizinhas, devido à presença de elevados valores de cálcio e hidróxido de sódio.

De acordo com a ABNT NBR 10004:2004, a lama vermelha pertence à classe I – resíduo perigoso, ou seja, aquele que apresenta periculosidade em função de suas propriedades físicas, químicas ou 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.

¹⁴ Os zeólitos são minerais cristalinos naturais, compostos por alumino-silicatos hidratados de metais alcalinos (Na, K) e alcalino-terrosos (Ca, Mg), que se formaram essencialmente quando as cinzas vulcânicas se depositaram em ambientes lacustres alcalinos. É possível reproduzir em laboratório a sua síntese de formação, obtendo-se zeólitos sintéticos que não se encontram, necessariamente, correspondência em todos os zeólitos naturais.

Elevadas concentrações de metais pesados¹⁵ na composição química da lama vermelha também podem caracterizar a mesma como um resíduo perigoso. Brunori et al. (2005) detectaram a presença dos metais pesados arsênio, cádmio, níquel, zinco, chumbo, cobre, cromo e vanádio na lama vermelha italiana. Já, Leonardou et al. (2008) verificaram somente a presença de cromo na lama vermelha da Grécia. Em pesquisa com a lama vermelha da França, Ambroise e Pera (2000) verificaram a existência dos seguintes metais pesados: arsênio, cádmio, cromo e zinco.

As lagoas de disposição de lama vermelha devem ser projetadas de forma adequada caso contrário, corre-se o risco de contaminação ambiental. Os custos associados são altos, devido à necessidade de impermeabilização da área antes da disposição, feita normalmente através de membranas plásticas ou da aplicação de camada de material impermeável, devido aos riscos de contaminação do solo e do lençol freático, entre outros componentes. A vida útil da área de disposição é curta, normalmente entre 4 a 7 anos, e a reabilitação da área é um processo lento (KIRKPATRICK, 1996; NGUYEN & BOGER, 1998; JAMAICAN BAUXITE CASE, 2006).

Há inúmeros problemas ambientais decorrentes da disposição inadequada da lama, que vão desde as formas mais comuns de contaminação de solo e lençol freático em locais próximos às imensas lagoas até o enorme impacto visual gerado pelas mesmas, podendo provocar danos a flora e fauna da região. As indústrias de alumina despendem enormes gastos com o armazenamento da lama e a manutenção destes tanques (SILVA FILHO, et al, 2008). A Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (CMED) cita entre as atividades industriais mais poluentes a indústria de metais não-ferrosos e dentre elas a do alumínio (DONAIRE, 1995).

Pesquisas têm apresentado algumas aplicações para a construção civil, tais como pavimentação, insumo para produção de tijolos, telhas, e revestimentos cerâmicos (Nakamura et al., 1969; Kara, 2005; Singh & Garg, 2005). A ativação térmica da lama vermelha a temperaturas próximas a 400°C têm sido usada para proporcionar maior adsorção¹⁶, aplicando assim no tratamento de efluentes.

¹⁵ Grupo de elementos situados entre o cobre e o chumbo na tabela periódica tendo pesos atômicos entre 63,546 e 200,590 e densidade superior a 4,0 g/cm³.

¹⁶ Técnica que apresenta a maior eficiência na remoção da cor. A adsorção consiste na transferência de massa de uma fase fluida para uma fase sólida (adsorvente/adsorvedor).

Na Tabela 4 encontra-se uma síntese de alguns estudos realizados em diferentes países com a valorização da lama vermelha para a produção de novos materiais.

TABELA 4 - ESTUDOS DE VALORIZAÇÃO DA LAMA VERMELHA. FONTE: MANFROY, 2009.

Referência	País	Materiais produzidos com a Lama Vermelha
Sglavo et al. (2000)	Itália	Produtos Cerâmicos (colorante)
Kavas (2006)	Turquia	Tijolos queimados produzidos com resíduos provenientes da indústria de boro
Yalçin e Sevinç (2000)	Turquia	Placas cerâmicas, artigos sanitários, porcelanas e eletroporcelanas (isoladores de alta tensão)
Yang e Xiao (2007)	China	Tijolos sem queima, produzidos com cinzas, areia, cal, gesso e cimento Portland
Yang et. al (2009)	China	Telhas cerâmicas
Gordon et al. (1996)	Jamaica	Compósito cimentício (cal hidratada, microssilica, calcário)
Singh et al. (1996)	Índia	Clínquer
Tsakiridis e Leonardou (2004)	Grécia	Clínquer
Vangelatos et al. (2009)	Grécia	Clínquer
Martins et al. (2008)	Brasil	Clínquer e pozolana (lama seca)
Ribeiro e Morelli (2008)	Brasil	Pozolana (lama seca)
Rossi et al. (2008)	Brasil	Agregado graúdo
Sotero et al. (2009)	Brasil	Blocos de concreto para pavimentação
Pera et al. (1997)	França	Concreto colorido (lama como pozolana)
Pera e Pera (2000)	França	Concreto auto-nivelante (lama como agente de viscosidade) e concreto colorido (lama com pozolana)

Para a aplicação da lama vermelha em matrizes cimentícias devem ser consideradas as interações dos metais pesados da lama vermelha e a matriz cimentícia, pois os metais pesados presentes na lama vermelha podem alterar algumas propriedades nos materiais cimentícios (MANFROI, 2009).

Concentrações elevadas de “Cr” aceleram a hidratação do cimento e também o tempo de pega. Concentrações elevadas de “Ni” retardam o tempo de pega. O “Zn” retarda a hidratação do cimento e tempo de pega (STEPHAN et al., 1999).

Em matrizes cimentíceas com presença de arsênio podem ocorrer formações de produtos insolúveis como o $\text{Ca}_3(\text{AsO}_4)_2$ na superfície das partículas de cimento hidratadas (MOLLAH et al. Apud HALIM et al., 2004)

A presença de cádmio (Cd) forma um precipitado na superfície do C-S-H e dentro dos poros da matriz de cimento, prejudicando o mecanismo de lixiviação. Quando o cádmio se apresenta na forma de hidróxido $\text{Cd}(\text{OH})_2$ pode ser encapsulado na matriz de C-S-H ou nos cristais de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (CARTLEDGE et al. apud HALIM et al., 2004).

O metal chumbo pode ser absorvido pelo silicato de cálcio hidratado ou então, pode precipitar como silicato de chumbo (HALIM et al., 2004).

3.3. Cimento Portland

A origem do cimento remonta há cerca de 4.500 anos sendo utilizado em construções egípcias, grandes obras gregas e romanas, como o Panteão de Agripa e o Coliseu, foram construídas com o uso de solos de origem vulcânica que possuíam propriedades de enrijecimento em contato com a água (PINTO, 2006).

Sua mais antiga utilização descoberta no império macedônio na região onde hoje é Vergina, Grécia, que pertenceu ao imperador Alexandre o Grande, análise feitas nos prédios do complexo funerário deste império mostram que os macedônios fizeram o cimento três séculos antes dos romanos, que se pensaram serem os criadores originais (PEREIRA et al., 2013).

O cimento Portland foi criado por um construtor inglês, Joseph Aspdin, que o patenteou em 1824. Nessa época, era comum na Inglaterra construir com pedra de Portland, uma ilha situada no Sul desse país. Como o resultado da invenção de Aspdin se assemelhasse na cor e na dureza a essa pedra de Portland, ele registrou esse nome em sua patente. É por isso que o cimento é chamado cimento Portland (ABCP, 2002)

No Brasil, o marco da implantação da indústria brasileira de cimento foi em 1924, com a implantação de uma fábrica em Perus, estado de São Paulo, pela Companhia Brasileira de Cimento Portland, porém as primeiras toneladas foram produzidas e colocadas no mercado apenas em 1926. Até então, o consumo de cimento no país dependia exclusivamente do produto importado (MASSARENTE, et. al., 2016).

A produção nacional foi gradativamente se elevando com a implantação de novas fábricas e tecnologias e a participação de produtos importados foi diminuindo aos poucos durante as décadas seguintes, até praticamente desaparecer nos dias de hoje (MAURY & BLUMENSCHHEIN, 2016).

O cimento Portland é um material pulverulento, constituído de silicatos e aluminatos complexos, que, ao serem misturados com a água, hidratam-se, formando uma massa gelatinosa, finamente cristalina, também conhecida como “gel” (Figura 9). Esta massa, após contínuo processo de cristalização, endurece, oferecendo então elevada resistência mecânica (STEPHAN, et.al.,1999).

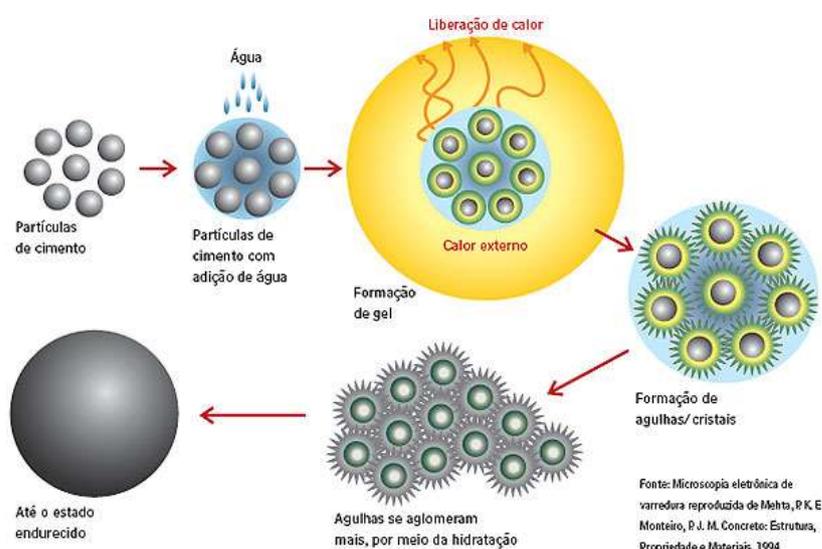


FIGURA 9 - PROCESSO DE HIDRATAÇÃO DO CIMENTO. FONTE: MEHTA & MONTEIRO.

3.3.1. Composição do Cimento Portland

O cimento Portland é composto de clínquer e de adições. O clínquer é o principal componente e está presente em todos os tipos de cimento Portland. Já as adições podem variar de um cimento para outro, classificando os diferentes tipos de produtos disponíveis no mercado (ABCP, 2002).

O clínquer é um material granular de 3mm a 25mm de diâmetro, resultante da calcinação de uma mistura de calcário, argila e de componentes químicos, como silício, alumínio e ferro, obtidos de jazidas em geral situadas nas proximidades das fábricas de cimento (ABCP, 2002).

Estes compostos trazem acentuada característica de ligante hidráulico e estão diretamente relacionados com a resistência mecânica do material após a hidratação. São submetidos a tratamento térmico em forno rotativo, na

temperatura de queima de 1450°C, onde ocorrem fusões parciais e, durante o resfriamento, nódulos de clínquer são produzidos.

Segundo a ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland), o clínquer é composto por quatro fases principais, o silicato tricálcico ((CaO)₃SiO₂), o silicato dicálcico ((CaO)₂SiO₂), a fase aluminato (Ca₃Al₂O₆) e a fase ferrita (Ca₂AlFeO₅). Estes compostos podem ser denotados de forma abreviada (C₃S, C₂S, C₃A, C₄AF, respectivamente); abreviaturas estas que são válidas somente nas fases puras, que praticamente não são encontradas em clínqueres industriais, que contêm impurezas de alguns elementos, como Al, Fe, Mg, Na, K, Cr, Ti, Mn, P entre outros, sob forma de solução sólida¹⁷. Podem ocorrer ainda outras fases individualizadas, como o periclásio (MgO), em clínqueres magnesianos, e cal livre (CaO), em clínqueres com alto fator de saturação de cal ou com problemas no processo de fabricação.

Em relação às adições incorporadas ao cimento Portland temos o gesso, as escórias de alto forno, os materiais pozolânicos e os materiais carbonáticos. O gesso tem como função principal controlar o tempo de início de endurecimento do clínquer moído quando este é misturado com água. Se este material não fosse adicionado à mistura, o cimento endureceria instantaneamente quando entrasse em contato com a água, prejudicando a trabalhabilidade do material (MAURY & BLUMENSCHHEIN, 2016).

A escória de alto-forno é um composto obtido durante a produção do ferro-gusa¹⁸ nas indústrias siderúrgicas e se assemelham aos grãos de areia. Elas eram consideradas um material sem valor, até ser descoberto que ela tem uma propriedade de ligante hidráulico muito resistente, ou seja, reagem em presença de água, desenvolvendo características aglomerantes de forma muito semelhante à do clínquer (ABCP, 2002). Essa descoberta tornou possível o desenvolvimento de novos materiais que apresentaram melhoria de propriedades, como maior durabilidade e resistência mecânica final.

Os materiais pozolânicos são rochas vulcânicas ou matérias orgânicas fossilizadas encontradas na natureza, certos tipos de argilas queimadas em elevadas temperaturas (550°C a 900°C) e derivados da queima de carvão

¹⁷ No fenômeno de solução sólida uma ou mais posições atômicas específicas de uma estrutura mineral são substituídas, em proporções variadas, por dois ou mais elementos químicos diferentes. A quantidade de solução sólida é determinada pelos tamanhos e cargas dos íons envolvidos e a temperatura em que se dá a substituição [KLEIN e HURLBUT JR., 1999].

¹⁸ Produto obtido no alto-forno pela reação de redução do minério de **ferro** com carvão ou coque (combustível derivado do carvão), juntamente com o calcário

mineral nas usinas termelétricas (PEREIRA, 2013). Os materiais pozolânicos, quando pulverizados em partículas muito finas, também passam a apresentar a propriedade de ligante hidráulico como a escória de alto-forno, quando, sob forma de grãos finíssimos, forem adicionados em água na presença de clínquer. Desta forma, no processo de hidratação haverá liberação de hidróxido de cálcio (cal) que reagirá com a pozolana.

Os materiais carbonáticos são rochas moídas, que apresentam carbonato de cálcio em sua constituição. Tal adição melhora tanto a trabalhabilidade dos concretos quanto das argamassas, pois os grãos ou partículas deste material possuem dimensões adequadas para se alojar entre as demais partículas da mistura. Quando presentes no cimento são conhecidos como fíler calcário (TEIXEIRA PINTO, 2016).

3.3.2. Processo Produtivo do Cimento Portland

As matérias-primas necessárias para a produção de cimento (carbonato de cálcio, sílica, alumínio e minério de ferro) são geralmente extraídas de rocha calcária ou argila por meio de detonações. Em seguida, são trituradas e transportadas para a fábrica onde são armazenadas e homogeneizadas (ABCP, 2002).

A moagem das matérias-primas produz um pó fino conhecido como cru que é pré-aquecido e em seguida introduzido em um forno rotativo. O material que dará origem ao clínquer é aquecido a uma temperatura de 1.500° C antes de ser subitamente resfriado por rajadas de ar (ABCP, 2002).

Uma pequena quantidade de gesso (3 a 5%) é adicionada ao clínquer para regular o tempo de pega do cimento. Logo em seguida, a mistura é finamente moída para se obter o "cimento puro", e assim, está pronta para receber o acréscimo de diferentes adições (ABCP, 2002).

Finalmente, o processo produtivo do cimento termina e o produto final é armazenado em silos, antes de ser enviado a granel ou em sacos para os pontos de venda. A Figura 10 a seguir, desenvolvida pela produtora de cimentos RESDIL, ilustra de forma detalhada todo o processo de fabricação do material (RESDIL, 2016).

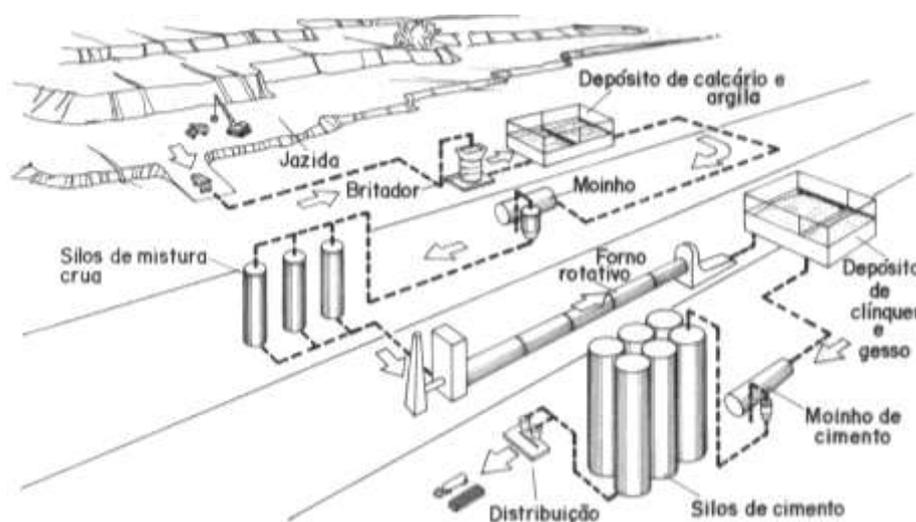


FIGURA 10 - PROCESSO PRODUTIVO DO CIMENTO PORTLAND. FONTE: RESDIL, 2016.

3.3.3. Limitações do Cimento Portland

Apesar dos inestimáveis serviços que este material tem prestado, convém começar por referir as consideráveis desvantagens que o Cimento Portland (CP) apresenta. Só assim se compreenderá o interesse em promover o desenvolvimento de materiais alternativos (MAURY, 2016).

O processo produtivo do cimento tem sido apontado como gerador de impactos tanto ambientais, como sociais. Impactos relacionados com as comunidades no entorno das fábricas eram corriqueiros e alguns deles causavam conflitos com seus habitantes, tanto por gerarem problemas no meio natural como por questões relacionadas à saúde humana, tais como: contaminações no ar, na água ou no solo (MAURY, 2016).

A indústria do cimento é responsável por aproximadamente 3% das emissões mundiais de gases de efeito estufa e por aproximadamente 5% das emissões de CO₂ (CSI, 2002). As plantas de fabricação de cimento estão entre as maiores fontes de emissão de poluentes atmosféricos perigosos, dos quais se destacam dioxinas e metais tóxicos, como mercúrio, chumbo, cádmio, arsênio, antimônio e cromo; produtos de combustão incompleta e os ácidos halogenados¹⁹. Cabe também ressaltar que a extração mineral gera danos irreversíveis à paisagem natural, deteriorando o solo natural, impactando ambientes fluviais e contaminando cursos d'água.

¹⁹ Compostos orgânicos obtidos pela substituição de pelo menos um átomo de hidrogênio de um hidrocarboneto por átomo de halogênio.

A exposição de trabalhadores a material particulado na indústria de produção de cimento é potencialmente uma das mais preocupantes em função do fato de trabalharem com material sólido, onde a possibilidade de geração de poeiras é elevada, expondo o trabalhador a riscos. A Figura 11 a seguir abrange uma série de danos causados pela indústria do cimento ao meio em que está instalada (MAURY, 2016).

Estes aspectos, justificam por si só a necessidade de desenvolver sistemas alternativos, que garantindo comportamentos mecânicos e físico-químicos similares, resolvam problemas atuais, permitindo a utilização de matérias primas menos estruturadas, mais baratas e que concorram para ajudar a solucionar grande parte dos problemas ambientais decorrentes da exploração continuada dos recursos (HENRIQUES & PORTO, 2016).

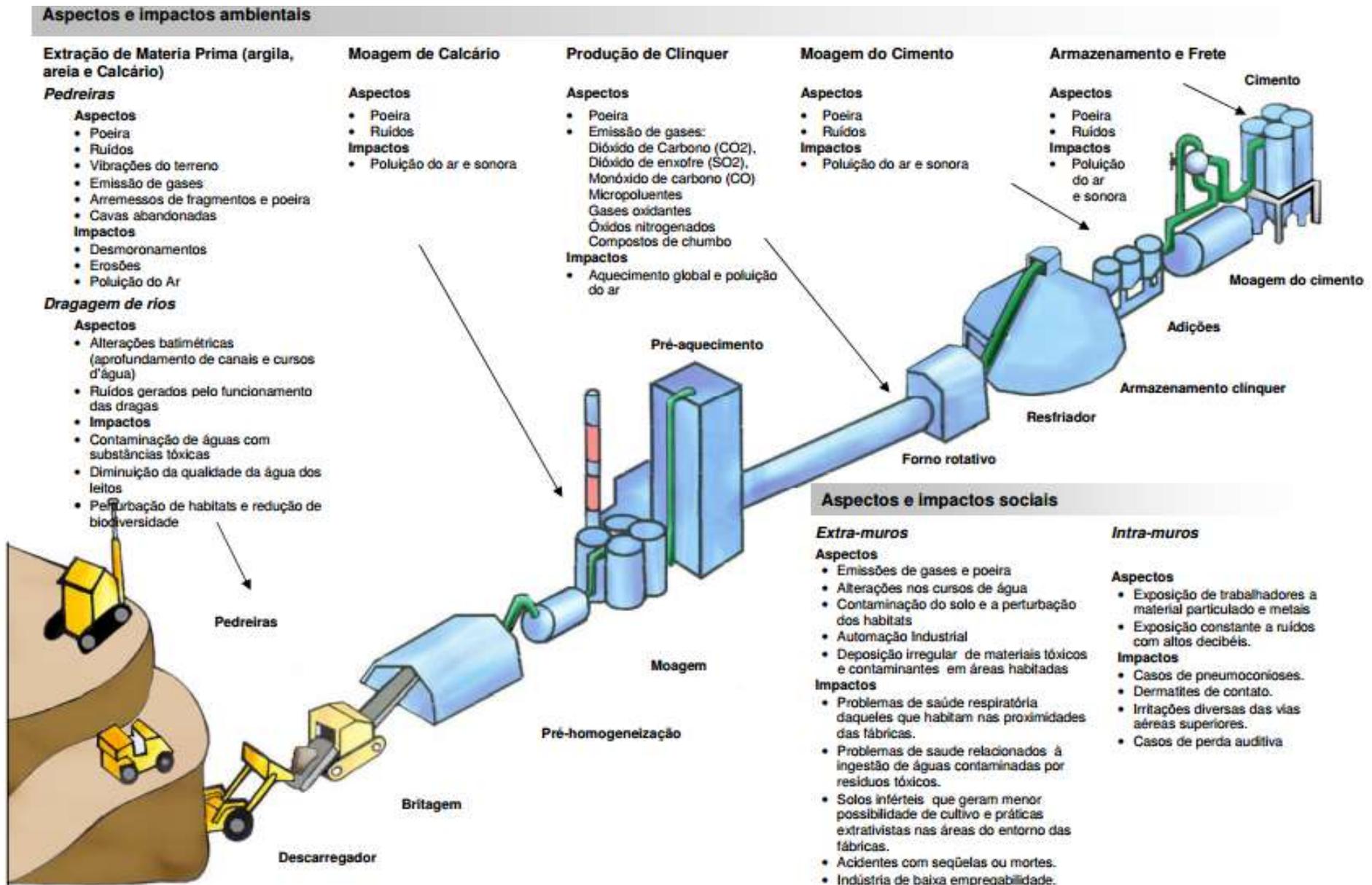


FIGURA 11 - ASPECTOS E IMPACTOS AMBIENTAIS E SOCIAIS NO PROCESSO PRODUTIVO DO CIMENTO. FONTE: MAURY, 2012.

3.4. Geopolimerização: das civilizações antigas até a tecnologia atual

A ativação alcalina de aglomerantes hidráulicos à base de cimento Portland e escórias de alto-forno vem sendo realizada com sucesso desde a década de 40 em vários países do mundo. Para uma melhor compreensão da tecnologia de produção geopolimérica que está sendo desenvolvida nos dias atuais, propôs-se uma explicação mais detalhada desde a origem das grandes construções antigas até as pesquisas realizadas atualmente. No decorrer deste trabalho, será traçada e descrita uma ordem cronológica de fatos e descobertas relevantes que fomentaram novas pesquisas no setor da engenharia de materiais para a construção civil (PINTO, 2006).

3.4.1. Durabilidade dos cimentos antigos

Estudos realizados sobre cimentos antigos com idades de até 9000 anos, como é o caso de argamassas encontradas ainda em serviço em Jericó, bem como outras realizações na Grécia, Turquia, Síria e sobretudo no Egito, mostram curiosamente que, apesar da idade, tais cimentos patenteiam uma notável estabilidade, boa resistência a ação permanente e intensa dos agentes meteóricos (Figura 12) (SILVA, et. al., 2007).

Os concretos e argamassas antigas apresentam-se com a dureza e estabilidade da rocha natural, não evidenciando grandes sinais de desgaste ou alteração química e assumindo um comportamento mecânico continuado a um nível muito satisfatório²⁰ (PINTO, 2006).

O excelente comportamento desses cimentos antigos, quando comparados com os seus equivalentes modernos (já citados anteriormente cimentos do tipo Portland), foi a motivação principal dos trabalhos que Viktor Glukhovsky, do Instituto de Engenharia Civil de Kiev, na Ucrânia, desenvolveu a partir dos anos 50 do século passado (PINTO, 2006).

²⁰ É preciso referir que nem todas as estruturas antigas foram construídas com o mesmo tipo de materiais, já que apenas um pequeno número de obras apresenta as características que acima se assinalam e por isso ainda existe. A maior parte das construções antigas já desapareceu, não necessariamente apenas por razões de ordem estrutural; mas tudo leva a crer que os antigos construtores reservavam para determinadas construções mais importantes, materiais que, garantindo à partida melhor comportamento, não utilizariam com frequência por serem mais escassos, de mais difícil mobilização, ou eventualmente de custo mais elevado. É provável, porém, que a noção que eles tivessem quanto à durabilidade que tais materiais viriam a conferir às suas obras, fosse meramente superficial.

As conclusões da investigação que ele e a sua equipe conduziram, levaram à descoberta de ligantes de base alcalina a partir de aluminossilicatos do tipo da escória industrial, dotados de propriedades notáveis e com um campo de aplicação muito promissor (PINTO, 2006).

Além de serem detectadas fases cristalinas de géis de silicatos cálcicos do mesmo tipo dos que ocorrem no cimento Portland, embora com estrutura ligeiramente diferente, também foram descobertas a presença de uma zeólita, a analcita, um aluminossilicato alcalino (sódico) hidratado, de estrutura tridimensional e a quem se atribui a responsabilidade pela resistência ao desgaste das argamassas e concretos antigos (KRIVENKO, 1994).

Segundo Krivenko, estes minerais não foram utilizados como materiais de partida por apresentarem um carácter amorfo²¹, mas são antes a fase final estável de uma conversão a longo prazo de fases primárias em condições de humidade e temperatura bem determinadas.

A presença desta zeólita permitiu compreender o modo de formação dos cimentos antigos: as zeólitas formam-se na natureza, por exemplo, pela interação entre cinzas vulcânicas muito finas e praticamente amorfas e ambientes lacustres de carácter alcalino (águas com elevado teor em carbonatos ou bicarbonatos de sódio). É possível também obter zeólitas nas mesmas condições a partir de sílica biogênica (esqueletos de radiolários e foraminíferos²²), certas argilas, feldspatos e algumas formas de quartzo (PINTO, 2006).



FIGURA 12 – MONUMENTOS DA ANTIGUIDADE CLÁSSICA. (A) PIRÂMIDES DO EGITO. (B) COLISEU DE ROMA. FONTE: REVISTA GALILEU, 2016.

²¹ Material amorfo ou substância amorfa é a designação dada à estrutura que não têm ordenação espacial a longa distância (em termos atômicos), como os sólidos regulares.

²² Protozoários que se locomovem através de pseudópodes, são de vida livre e se reproduzem por divisão binária.

Segundo Glukhovsky, é errado pensar-se que a durabilidade dos concretos antigos se fica a dever à presença de géis de C-S-H, silicatos cálcicos hidratados, e quando neles aparece, na forma usual de C-S-H, está sempre associado a matrizes zeolíticas (PINTO, 2006).

A Tabela 5 mostra a composição química de cimentos antigos encontrados em Roma. Como se vê, entra na sua composição uma significativa quantidade de sílica e alumina, em valores muito superiores aos que ocorrem no cimento Portland normal (cerca de 24 e 8% respectivamente) e ainda a presença (> 4%) de óxidos alcalinos (Na₂O e K₂O) cuja presença no cimento Portland normal é muito condicionada (PINTO, 2006).

TABELA 5 - CONSTITUIÇÃO QUÍMICA DOS CIMENTOS ANTIGOS. FONTE: PINTO, 2006.

Constituição Química (%)	Cimentos Romanos	
	160 AC	140 AC
SiO ₂	42,00	39,56
Al ₂ O ₃	14,48	14,01
Na ₂ O, K ₂ O	4,21	4,02
CaO, MgO	39,22	42,35

A presença de óxidos alcalino-terrosos, cálcio e magnésio, resulta de as cinzas vulcânicas serem combinadas com cal viva ou óxido de magnésio (resultante da calcinação da dolomita). Estes óxidos, em contato com a água, hidratam, passando à fase de hidróxidos que possuem marcado caráter alcalino. Então, a reação de ativação alcalina é processada entre o agente alcalino e as cinzas vulcânicas, muito reativas e constituídas por aluminossilicatos e óxidos alcalino-terrosos (PINTO, 2006).

3.4.2. Ativação alcalina

Davidovits, juntamente com um grupo de pesquisadores, objetivaram desenvolver materiais inorgânicos não inflamáveis e resistentes ao fogo, chegando em um material silico-aluminoso ativado alcalinamente, denominando pelo pesquisador de geopolímero. Em 1979 Davidovits registou a patente acerca desse novo material e fundou o Geopolymer Institute (DAVIDOVITS, 2015).

Ativação alcalina é a reação de síntese dos geopolímeros, sendo definida, de modo geral como uma reação de hidratação de alumino-silicatos com substâncias alcalinas ou alcalinoterrosos, sendo uma vasta gama de materiais

aluminosilicosos suscetíveis a esse tipo de reação. De uma forma geral, dependendo da seleção de matérias-primas e condições de processamento, os materiais ativados alcalinamente podem exibir uma grande variedade de propriedades e características, incluindo elevada resistência à compressão, baixa retração, cura rápida ou lenta, resistência a ácidos, resistência ao fogo e baixa condutividade térmica (BITENCOURT, 2016).

Os primeiros geopolímeros sintetizados utilizavam como materiais precursores quartzo, caulinita e hidróxido de sódio em concentrações variadas e temperatura de síntese de 150°C. Desta forma, os geopolímeros apresentam minerais bases alumino-silicatados (caulinita, metacaulinita, cinzas voláteis, solos calcinado), que em condições alcalinas promovem as reações que possibilitam as ligações poliméricas Si-O-Al-O (NAGEM, 2013).

As etapas do processo de síntese dos polímeros inorgânicos podem ser divididas em cinco partes, são elas: dissolução, equilíbrio das fases, formação do gel, reorganização da estrutura e a polimerização/endurecimento (Figura 13). A etapa de dissolução é representada pela hidrólise superficial do mineral, como também uma pequena dissolução das espécies de Al e Si pela solução alcalina, as hidroxilas atuam como catalisador e o metal atua como elemento formador da estrutura. No equilíbrio as espécies dissolvidas reagem com os íons silicato dissolvidos e polimerizam por condensação. Na terceira etapa ocorre a formação do gel, e sucessivamente ocorre a reorganização da estrutura e formação da estrutura final (DUXON et al., 2007).

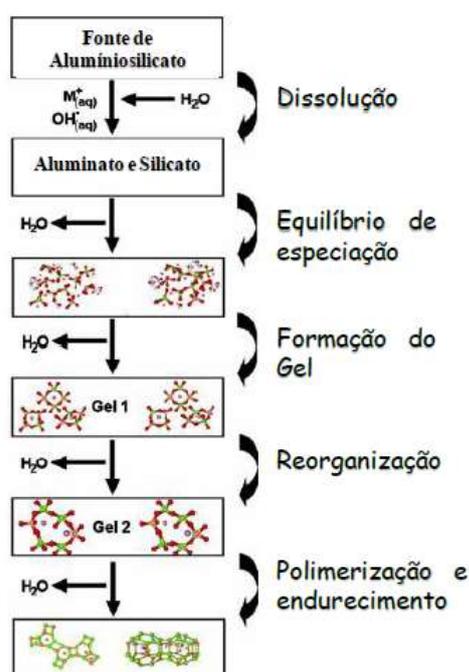


FIGURA 13 - SEQUÊNCIA DE GEOPOLIMERIZAÇÃO. FONTE: NAGEM, 2013.

Até o momento, trabalhos de pesquisa realizados mostram que é provável que este novo ligante tenha um enorme potencial para se tornar uma alternativa ao cimento Portland.

Alguns pesquisadores utilizaram lama vermelha para síntese de polímeros inorgânicos com aplicação na construção civil. Eles obtiveram as melhores propriedades mecânicas com 85% de lama vermelha e 15% de metacaulinita em fase sólida e a fase aquosa contendo uma concentração de 3,5M de SiO_2 e 8M de NaOH sendo a relação sólido/líquido de $2,9 \text{ gL}^{-1}$ (Dimas *et al.*, 2009). Bittencourt *et al.* (2012) também utilizaram a geopolímerização em lama vermelha utilizando KOH e CaOH para melhoria das propriedades mecânicas e químicas.

3.4.3. Propriedades dos Geopolímeros

Dependendo das condições de síntese e de cura, os geopolímeros alcançam fácil e rapidamente valores de resistência mecânica na ordem de 60 a 80 Mpa em compressão simples e 7-8 Mpa em flexo-tração. Em muitos casos, 70% da resistência final é atingida nas primeiras 4 horas, embora se verifique um acréscimo com a idade, porém menos significativo do que no cimento Portland (DAVIDOVITS, 2015).

O fator primordial e que constitui uma maior valia destes novos materiais, está na inércia química que apresentam à maior parte das agressões ambientais. Mesmo em termos de reações álcalis-agregado, e mau grado o forte ambiente alcalino, não são detectados quaisquer sinais de reação com a sílica, porque basicamente o processo é, do ponto de vista cronológico, diferente (PINTO, 2006).

A Figura 14 a seguir mostra o comportamento (taxa de dissolução) de amostras de geopolímero em solução ácida de H_2SO_4 e HCl a 5%, em comparação com o cimento Portland, com escórias de alto-forno e com um aluminato cálcico.

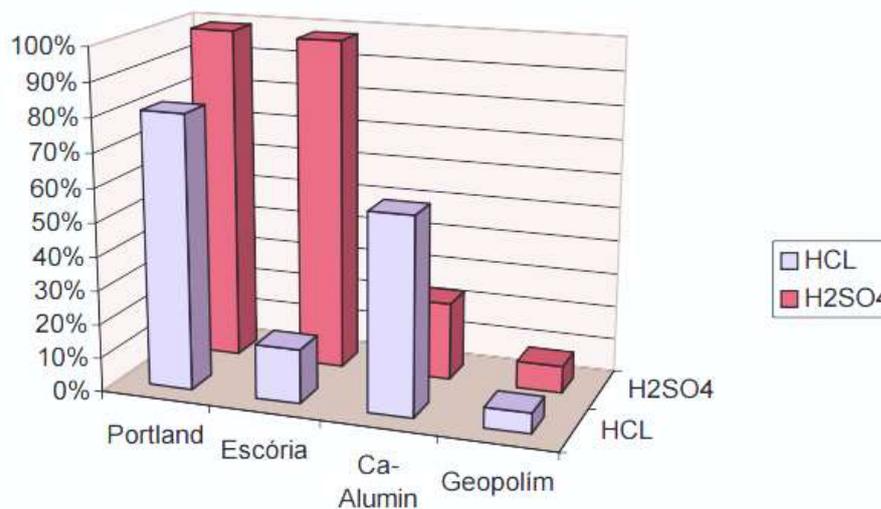


FIGURA 14 - TAXA DE DISSOLUÇÃO EM MEIO ÁCIDO. FONTE: PINTO, 2006.

3.4.4. Âmbitos e aplicações dos geopolímeros

A tecnologia dos geopolímeros tem sido aplicada na manufatura de produtos similares aos que são produzidos com o cimento Portland. Em termos gerais, todos os materiais que tenham sofrido um tratamento térmico na sua gênese, são potencialmente aptos para a ativação alcalina: - pó de tijolo, vidro moído, materiais cerâmicos, escombros de concreto, cinzas de queima (carvão ou nafta) ou incineração, cinzas vulcânicas, escórias de alto forno, metacaulinos, ou mesmo argilas ricas em caulinita e/ou montmorilonita (SOUZA, 2010).

De um ponto de vista prático, a implementação desta tecnologia não exige sistemas complicados de fabrico ou de controle, embora requeira a adequação dos meios usualmente utilizados na fabricação do concreto e tenham de respeitar-se determinados requisitos de mistura, compactação e cura próprios deste tipo de materiais. Também é indispensável o conhecimento prévio da composição química média dos resíduos utilizados, porque a composição e taxa do ativador tem de ser ensaiada em função dessa mesma composição (SOUZA, 2012).

4. METODOLOGIA

A lama vermelha utilizada neste trabalho provém de uma empresa produtora de alumínio localizada na cidade de Ouro Preto, interior do estado de Minas Gerais.

A empresa é responsável pela produção de aproximadamente 19% dos produtos à base de alumínio laminado e é o maior produtor da Europa e América do Sul, e o segundo maior da América do Norte e da Ásia (ADITYA BIRLA GROUP, 2017).

4.1. Coleta de amostras e estudo inicial

Todos os experimentos e ensaios foram realizados no laboratório de Materiais de Construção – Grupo RECICLOS - localizado no Campus Morro do Cruzeiro da Universidade Federal de Ouro Preto.

A lama disponibilizada pela empresa foi entregue em três mini toneis e apresentava um aspecto pastoso, além de conter grande volume de solução na mistura (Figuras 15 e 16).



FIGURA 15 - LAMA VERMELHA IN NATURA. FONTE: AUTOR.



FIGURA 16 - CONSISTÊNCIA PASTOSA DA LAMA VERMELHA. FONTE: AUTOR.

Como forma de iniciar a pesquisa e conhecer melhor o material que foi disponibilizado e os reagentes presentes na lama vermelha, decidiu-se moldar corpos de prova cilíndricos no estado in natura e submetê-los à estufa por 7 dias a 60°. Tal procedimento permitiria uma análise inicial do comportamento físico e mecânico da amostra, bem como uma percepção dos teores de NaOH presentes na mistura (Figura 17). Deve-se ressaltar que o material não foi estabilizado quimicamente em nenhuma etapa deste trabalho.

A temperatura da estufa de 60°C foi inferior à temperatura escolhida por VASSALO (2013) em sua pesquisa, que foi de $85 \pm 3^\circ\text{C}$. Segundo DUXSON et al. (2007, apud VASSALO, 2113) há estudos que justificam que a transição da estrutura amorfa para cristalina do geopolímero pode ocorrer em temperaturas a partir de 70°C.



FIGURA 17 - CORPOS DE PROVA NO ESTADO IN NATURA. FONTE: AUTOR.

4.2. Análise de pH

Para que a análise do pH fosse feita sem possíveis interferências no resultado, parte da amostra foi seca em estufa à 100° C por 24h. Após a retirada do material da estufa, realizou-se a moagem da lama seca no moinho de bolas do laboratório.

Para a determinação do pH da LV, a mesma foi dissolvida em uma solução neutra de calibragem do phmetro de bancada da marca Hanna – modelo HI 2212 (Figura 18). Os reagentes utilizados tiveram sua pureza certificada, afim de não comprometer os resultados das análises.



FIGURA 18 - PHMETRO UTILIZADO - HANNA HI 2212. FONTE: AUTOR.

4.3. Análise de umidade

Foram feitas três medições de umidade do material de estudo, denominadas U1, U2 e U3, respectivamente. Os valores de umidade foram escolhidos de forma aleatória, tendo como referência o valor de umidade para a lama no estado in natura.

A primeira medição foi realizada no dia 06 de julho de 2017, aproximadamente 1 mês após o recebimento da LV. Sabe-se que neste íterim a lama sofreu diminuição de umidade em relação ao seu estado in natura, pois estava disposta em bandejas abertas sem qualquer tipo de fechamento. Apenas dois minis tonéis foram abertos para este procedimento.

Tal disposição do material foi escolhida devido ao grande volume de solução presente na mistura. Caso fosse necessário que uma grande quantidade

de material fosse seca em estufa, o alto teor de umidade existente poderia comprometer o funcionamento do equipamento.

Para as duas últimas análises foi utilizado o material disposto no terceiro tonel, que permaneceu em sistema fechado desde o fornecimento da LV pela empresa até as análises U2 e U3. Dessa forma, manteve-se a umidade no estado in natura da amostra para a análise U2 e, para U3, adicionou-se 150g de água destilada à mistura colocada nos moldes, obtendo-se resultados de umidade superiores à U1 e U2.

O ensaio para a determinação do teor de umidade da amostra foi executado de acordo com a ABNT NBR 9939/1987. Conforme a norma, as amostras são pesadas em seu estado seco ao ar e também secas em estufa a 105°C. O teor de umidade é calculado através da Equação 6 a seguir.

EQUAÇÃO 6 - TEOR DE UMIDADE

$$U = \left(\frac{P_u - P_s}{P_s} \right) * 100 (\%)$$

Sendo

U = teor de umidade

P_u = peso úmido

P_s = peso seco

4.4. Granulometria a laser

A granulometria do material foi obtida através do granulometro a laser da marca Bettersize 2000 (Figura 19). O equipamento consiste na medição da variação angular na intensidade da luz difundida à medida que um feixe de laser interage com as partículas dispersas da amostra.

Para este procedimento foi utilizado uma pequena fração da amostra seca e moída mencionada anteriormente neste trabalho. O ensaio foi realizado pelo técnico responsável do laboratório, pois se trata de um equipamento delicado que requer certa habilidade para manuseio.



FIGURA 19 - GRANULÔMETRO BETTERSIZ 2000. FONTE: DIRECT INDUSTRY

4.5. Fluorescência de Raios-X

Espectrometria de fluorescência de raios-X é um método analítico para determinação da composição química (multi-elemento em simultâneo) em todos os tipos de materiais. Os materiais podem ser analisados no estado maciço, líquido, em pó (pastilhas prensadas ou pérolas fundidas) ou outras formas (IPN, 2017).

Os elementos que podem ser analisados vão do Flúor ao Urânio e a gama de concentrações varia de 100% a níveis de sub-ppm. Elementos com elevado número atômico apresentam melhores níveis de detecção de elementos de baixo valor atômico (IPN, 2017).

Para a preparação das amostras para análise de fluorescência de raios-X, parte do material foi previamente seco em estufa por 24h e moído até uma granulometria inferior a 150 microns.

4.6. Difração de Raios-X

A análise por difração de raios-X permite a identificação mineral através da caracterização de sua estrutura cristalina. Entende-se por difração o desvio na propagação retilínea de uma onda, quando um obstáculo se interpõe ao seu trajeto. Para esta caracterização, o material utilizado nas amostras também foi previamente seco em estufa por 24h, moído até uma granulometria passante na peneira de 150 microns e homogeneizado com 10% em massa de fluorita..

A difração de raios-X pelos cristais resulta de um processo em que os raios-X são espalhados pelos elétrons dos átomos do cristal, sem mudanças de comprimento de onda. Um feixe difratado é produzido por espalhamento apenas

quando algumas condições geométricas, expressas pela lei de Bragg são satisfeitas (CPMTC, 2017). A expressão matemática da lei de Bragg é:

EQUAÇÃO 7 - LEI DE BRAGG

$$n\lambda = 2d \sin\theta$$

Sendo

n: um número inteiro

λ : comprimento de onda,

d: distância entre os planos paralelos sucessivos na estrutura cristalina

θ : ângulo de incidência e difração de um feixe de raios X relativamente a um dado plano atômico.

O resultado deste tipo de análise é apresentado sob a forma de um gráfico denominado difratograma, cujas variáveis são o ângulo 2θ versus a intensidade dos picos difratados (eixo vertical). Os picos do difratograma são produzidos quando, para um dado valor de θ , um dado plano atômico possui distância interplanar (d) que satisfaz a lei de Bragg. As alturas dos picos são proporcionais às intensidades dos efeitos da difração.

Cada estrutura cristalina produz um padrão de difração característico. Portanto, para interpretação dos resultados, recorre-se a um banco de dados, e faz-se a comparação com os padrões produzidos por estruturas conhecidas e previamente analisadas.

4.7. Resistência à tração na flexão

O ensaio de resistência à tração na flexão foi realizado (Figura 21), realizado segundo especificações da NBR 13279:2005, para três corpos de prova de cada umidade estudada. Foram posicionados nos dispositivos de apoio do equipamento de ensaio que estão distantes entre si $(120,0 \pm 05)$ mm e a carga foi aplicada de forma centralizada entre os apoios. Aplicou-se então uma carga na velocidade de (50 ± 10) N/s até a ruptura do corpo de prova. A resistência à tração na flexão é calculada de acordo com a Equação 8 a seguir.

EQUAÇÃO 8 - RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO

$$R_f = \frac{1,5F_f \times L}{60^3}$$

Sendo

R_f = resistência à tração na flexão, em MPa;

F_f = carga aplicada verticalmente no centro do EPC em N;

L = distância entre os suportes, em mm.



FIGURA 20 - ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO. FONTE: AUTOR.

4.8. Resistência à compressão

Para a análise de resistência à compressão, foram utilizados os três corpos de prova prismáticos com dimensões de 4x4x16 cm anteriormente utilizados para ensaio de tração na flexão (Figura 21). Todos os moldes foram submetidos à estufa a 100°C por 24h e a 7 dias de cura. Durante o tempo em estufa, uma placa de vidro foi colocada sobre os moldes para reduzir a chance de perda de umidade dentro do equipamento.

O ensaio mecânico de resistência à compressão foi baseado na norma ABNT NBR 13279:2005 com uma taxa de carregamento de 456Ns⁻¹. O equipamento utilizado foi a prensa EMIC modelo DL 20000, como mostrado na Figura 20 a seguir.

A resistência à compressão foi determinada individualmente para cada corpo de prova e expressa pela média de suas repetições. Ao colocar o corpo de prova na prensa deve-se posicioná-lo de modo que o seu centro de gravidade

coincida com o eixo de carga dos pratos da prensa para que não ocorra o efeito da torção.

Consideram-se as amostras com resistências mecânicas de compressão uniaxial superior a 2 Mpa como critério de aprovação devido ao tipo de aplicação dos materiais geopoliméricos. Com este valor de tensão pode-se manusear as peças sem problema de quebra (NAGEM, 2013).



FIGURA 21 - PRENSA EMIC DL 20000 FONTE: AUTOR



FIGURA 22 - MODELO DE CORPOS DE PROVA PRODUZIDOS PARA CADA UMIDADE ESTUDADA. FONTE: AUTOR

A resistência à compressão é obtida pela Equação 9 a seguir

EQUAÇÃO 9 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

$$R_c = \frac{P}{A} \times p$$

Sendo

R_c = resistência à compressão do concreto, em Mpa;

P = carga de ruptura, em N;

A = área do carregamento, em mm^2

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Estudo inicial

As amostras que foram inicialmente analisadas e dispostas por 24h à 60°C apresentaram fragilidade após sua retirada dos moldes e quebraram facilmente com o manuseio. Os corpos de prova estavam levemente amolecidos e mudavam de forma sob leve compressão com as mãos. Também apresentaram muitos espaços vazios devido à dificuldade de moldagem.

Após desmolde e exposição ao ar, notou-se o aparecimento e crescimento de eflorescências nos corpos de prova, processo este que se intensificou com o passar dos dias. Tal ocorrência deve-se ao fato de que a temperatura da estufa de 60°C não foi suficiente para reagir toda a solução de NaOH presente dentro da mistura, conforme enunciado anteriormente por DUXSON et al. (2007, apud VASSALO, 2013). Assim, o restante da solução veio a reagir de dentro do corpo de prova para fora, formando cristais de cor esbranquiçada por toda a sua superfície.

As Figuras 20 (a e b), 21 (a e b) e 22 (a e b) a seguir apresentam a evolução do crescimento dos cristais com o passar dos dias nos três corpos de prova cilíndricos estudados inicialmente.



(a)

(b)

FIGURA 23 – CP'S APÓS DESMOLDE - 28/05/2017 FONTE: AUTOR.



(a)

(b)

FIGURA 24 - CP'S APÓS DOIS DIAS DE DESMOLDE - 30/05/2017 FONTE: AUTOR

(a)

(b)

FIGURA 25 – CP'S APOS 16 DIAS DE DESMOLDE – 14/07/2017 FONTE: AUTOR

5.2. pH da Lama Vermelha

A amostra moída da LV apresentou um pH de 11,14, valor este bem próximo ao limite estipulado pela NBR ABNT 10004:2004 – Classificação de resíduos sólidos. De acordo com esta normatização, os resíduos que apresentarem pH inferior ou igual a 2, ou, superior ou igual a 12,5 podem ser considerados como resíduos corrosivos.

Para MANFROI (2009), o valor de pH encontrado para a lama vermelha estudada também não ultrapassou o limite de 12,5 estipulado pela norma. Segundo Silva Filho (2007 apud NAGEM, 2013, p.48), devido aos tratamentos com soda caustica, as lamas vermelhas apresentam um elevado pH, com limites variando de 9 a 13.

5.3. Teores de Umidade

Para as diferentes análises feitas obtiveram-se os valores de umidades expressas na Tabela 6 e na Figura 25 abaixo.

TABELA 6 - VALORES DE UMIDADE DAS ANÁLISES

Amostras	Umidade (%)
U1	36,8
U2	49,4
U3	64,3

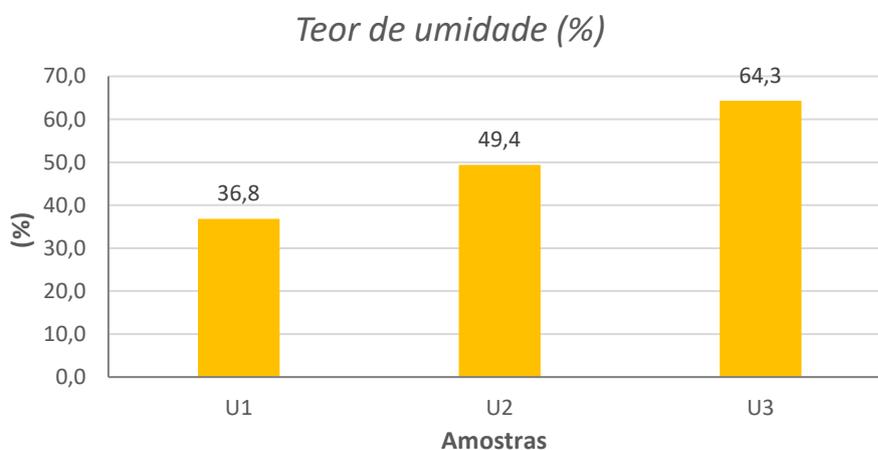


FIGURA 26 - COMPARATIVO ENTRE O TEOR DE UMIDADE DAS AMOSTRAS

Pelo gráfico comparativo pode-se notar que as umidades encontradas estão de acordo com o esperado e mencionado anteriormente. A amostra U3 apresentou umidade de 64,3% devido ao acréscimo de água destilada no processo de moldagem dos corpos de prova. Já a queda no teor de umidade de U1 (34,8%) está relacionada ao período em que a amostra ficou em recipiente aberto e exposto ao ar. U2, umidade in natura, apresentou um teor intermediário, conforme previsto.

Vale ressaltar que durante o processo de moldagem dos corpos de prova, as umidades superiores apresentaram maior trabalhabilidade e melhor acomodação ao molde. No entanto, durante os golpes com soquete, parte do material se aderiu à ferramenta e deformava a camada de lama anteriormente acomodadas ao molde.

Após o desmolde de todas as amostras, pode-se observar que os corpos de prova referentes à umidade superiores apresentaram visualmente um maior

índice de vazios e deslocamentos de material por toda a superfície, como demonstrado nas Figuras 27,28 e 29 a seguir. Notou-se também em todas as amostras analisadas que houve retração volumétrica após os 7 dias de cura.



FIGURA 27 – RETRAÇÃO (a), VAZIOS E DESPLACAMENTOS (b) - UMIDADE U1. FONTE: AUTOR



FIGURA 28 - RETRAÇÃO (A), VAZIOS E DESPLACAMENTOS (B) - UMIDADE U2. FONTE: AUTOR



FIGURA 29 - RETRAÇÃO (A), VAZIOS E DESPLACAMENTOS (B) - UMIDADE U3. FONTE: AUTOR

5.4. Análise granulométrica

A distribuição granulométrica da lama vermelha está apresentada na Tabela 7 e na Figura 30 a seguir, onde ID significa identificação da amostra, D₁₀, D₂₅, D₇₅ e D₉₀ significam a porcentagem retida da amostra na faixa granulométrica.

Quanto mais fino o material, maior será a reatividade das espécies (sodalita, gibbsita, silicatos amorfos) para formação do geopolímeros, porque maior será a sua área superficial. Todavia existem minerais que são inertes nas condições de trabalho, levando a um empacotamento e densificação da matriz geopolimérica (NAGEM, 2013).

TABELA 7 - GRANULOMETRIA DA AMOSTRA DE LV

ID	Amostras (μm)
D10	1.105
D25	3.696
D50	12.36
D75	30.82
D90	73.08

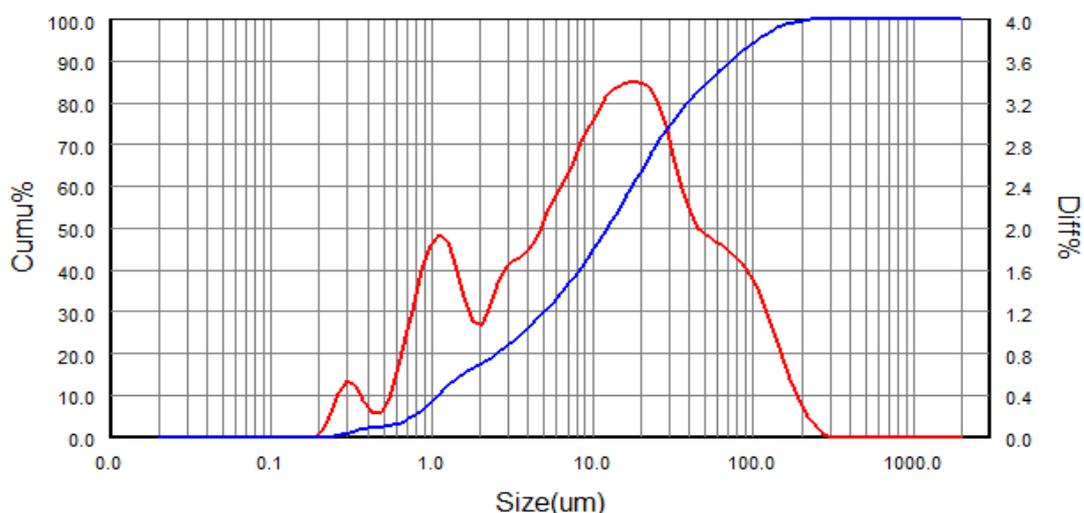


FIGURA 30 - CURVA GRANULOMÉTRICA DA AMOSTRA DE LV

De acordo com Villar (2002, apud MANFROI, 2009, p. 28) a granulometria da lama vermelha pode variar de região para região, pois está estritamente relacionada com a mineralogia da rocha de origem, ao processo de extração, processamento e deposição (adição de floculantes).

O material analisado neste trabalho apresentou granulometria extremamente fina com 90% das partículas com diâmetro inferior à 73,08 μm e 50% com diâmetro inferior à 12,36 μm. A caracterização granulométrica a laser

realizada por Leonardou et al. (2008, apud MANFROI, 2009, p. 28) para uma lama vermelha proveniente da Grécia, demonstrou que o material também era muito fino, com 100% das partículas com diâmetro inferior à 28 μm e 50% com diâmetro inferior a 2,4 μm .

5.5. Fluorescência de Raios-X

A Tabela 8 abaixo apresenta as análises químicas da lama vermelha moída e seca a 100°C obtidas por espectrometria de fluorescência de raios-X.

TABELA 8 - TEORES DE ÓXIDOS OBTIDOS NA ANÁLISE QUÍMICA

Óxidos	Teores em %
Fe ₂ O ₃	48,18
Al ₂ O ₃	31,25
SiO ₂	7,46
Na ₂ O	5,02
TiO ₂	3,86
CaO	2,27
P ₂ O ₅	0,81
SO ₃	0,42
ZrO ₂	0,15
V ₂ O ₅	0,14
Cl	0,13
Cr ₂ O ₃	0,10

Os principais óxidos da lama vermelha seca são a alumina (Al₂O₃), ferro (Fe₂O₃), sílica (SiO₂) e sódio (Na₂O). Os três primeiros constituintes são resultantes da composição química da bauxita e eles representam 87% da constituição da lama vermelha seca.

Já a presença de Na₂O na amostra pode ser proveniente da adição de hidróxido de sódio durante a etapa da digestão do processo Bayer. Incluindo Na₂O, o percentual mencionado sobe para 91%. A composição química da lama vermelha também é dependente da geologia da bauxita (MANFROI, 2009).

Na pesquisa de Silva Filho et al. (2007) encontra-se um resumo com a composição química da lama vermelha avaliada por vários pesquisadores ao redor do mundo e todos as análises obtiveram resultados muito semelhantes às encontradas neste trabalho, com predominância de alumina (Al₂O₃), ferro (Fe₂O₃), sílica (SiO₂) e sódio (Na₂O).

5.6. Difração de Raio X

A Figura 31 apresenta a análise mineralógica da lama vermelha moída e seca à 100°C.

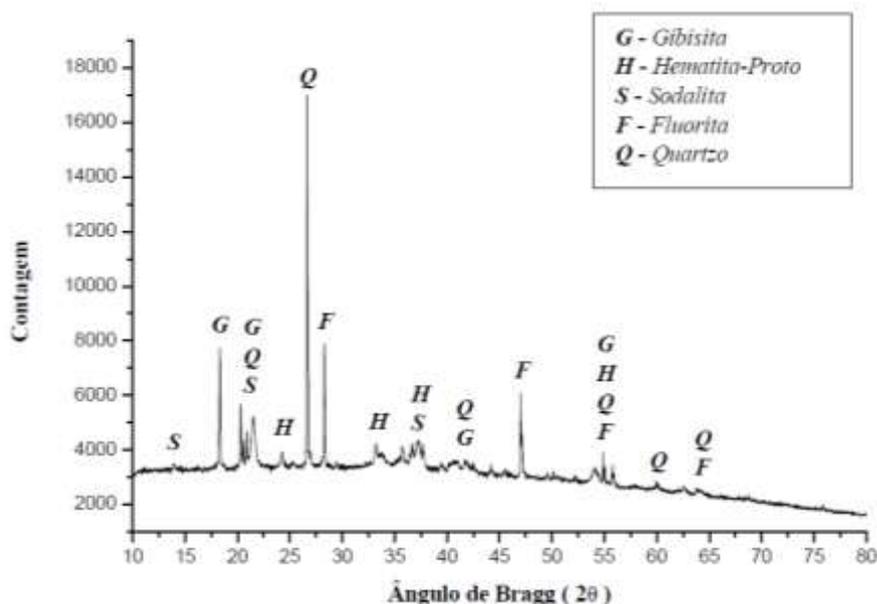


FIGURA 31 - ANÁLISE MINERALÓGICA DA LAMA VERMELHA.

As fases detectadas na lama vermelha seca foram a gibbsita ($\gamma\text{-Al}(\text{OH})_3$), hematita (Fe_2O_3), sodalita ($\text{Na}_8(\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24})\text{Cl}_2$), fluorita (CaF_2) e quartzo. Das fases cristalinas que contribuem de forma direta para a geopolímerização tem-se a gibbsita e a sodalita, pois são fontes de aluminato e silicato. Já a hematita é inerte nas condições de processamento do geopolímeros (NAGEM, 2013).

Hildebrando et al (2006, apud MANFROI, 2009, p. 33) classificou os minerais presentes na lama vermelha da região norte do Brasil em duas categorias. Primeiro aqueles provenientes do próprio bauxito, tais como: a gibbsita, devido ao bauxito ser de origem gibbsítico; observando-se ainda a presença de hematita, goetita, anatásio, quartzo, e uma leve presença do argilomineral caulinita. Em uma segunda categoria, a presença de fases minerais formadas durante o processo Bayer, sendo estas zeólitas de sódio, tais como a sodalita e a cancrenita.

Na pesquisa de NAGEM (2013), o autor detectou além das fases cristalinas encontradas neste estudo, a anatásio, calcita e goethita.

5.7. Resistência à tração na flexão

Os valores de resistência à tração na flexão dos corpos de prova rompidos na idade de 7 dias são representados por meio do valor médio obtido para os 3 corpos de prova prismáticos de cada umidade estudada. A Tabela 9 e a Figura 32 a seguir resumem e apresentam as médias das resistências à tração na flexão das três amostras de cada umidade.

TABELA 9 – MÉDIA DAS RESISTÊNCIAS À TRAÇÃO NA FLEXÃO DAS UMIDADES.

Amostras	Resistência à Tração na Flexão (KPa)
U1	740,1
U2	542,3
U3	210,1

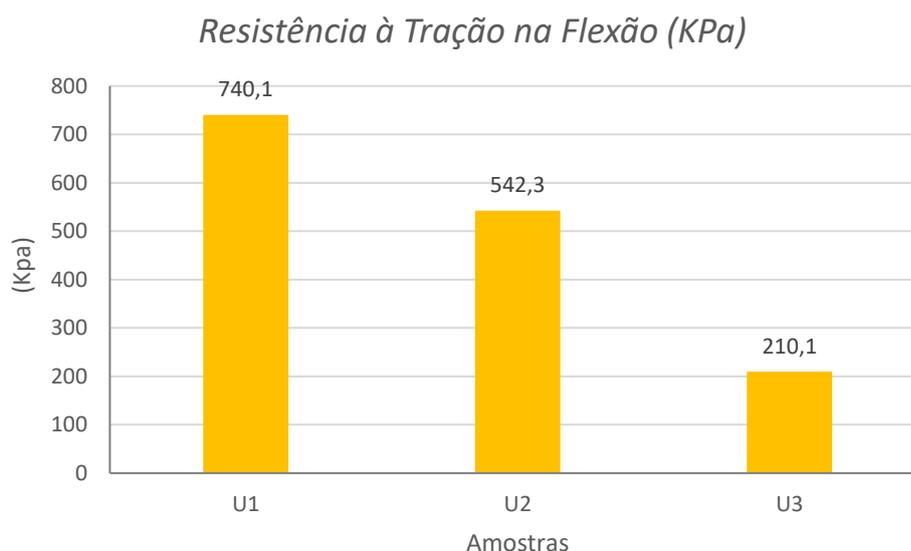


FIGURA 32 - RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO

Os resultados de resistência obtidos por SANTOS (2015), para uma argamassa de revestimento produzida com cimento Portland CII – F 32 e com traço de dosagem 1:1:6 (cimento: cal: areia), foram de aproximadamente 80 KPa para 7 dias de cura dos corpos de prova. Em comparação com os valores encontrados neste trabalho, pode-se dizer que para todas as umidades analisadas, os corpos de prova de lama vermelha apresentaram resistências muito superiores aos de uma argamassa de revestimento convencional com idade de 7 dias.

5.8. Resistência à compressão

Os valores de resistência à compressão dos corpos de prova rompidos na idade de 7 dias são representados por meio do valor médio obtido para os 3 corpos de prova prismáticos de cada umidade estudada. A Tabela 10 e a Figura 33 a seguir resumem e apresentam as médias das resistências à compressão das três amostras de cada umidade.

TABELA 10 - MÉDIA DAS RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO DAS UMIDADES.

Amostras	Resistência à Compressão (MPa)
U1	4,41
U2	3,44
U3	1,97

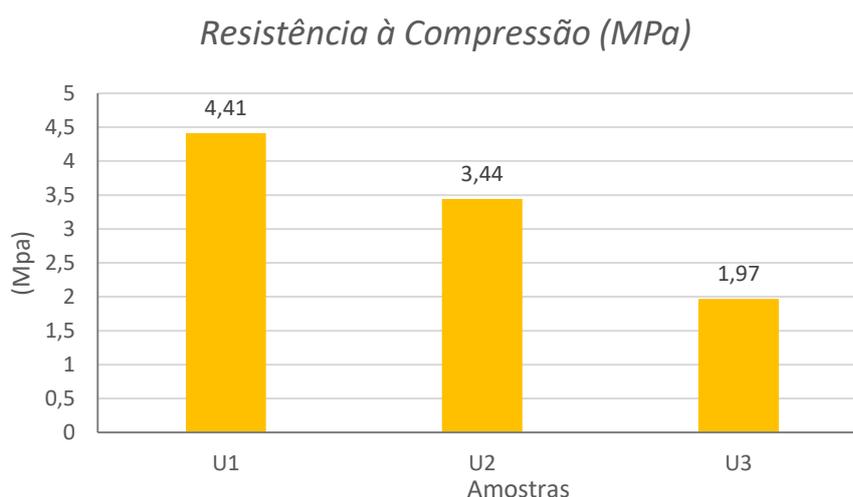


FIGURA 33 - RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Pode-se verificar que as amostras com menor teor de umidade apresentaram maiores resistências à compressão, sendo que, na umidade in natura U2, o corpo de prova de lama vermelha alcançou resistência de 3,44 MPa apenas com 7 dias e sem nenhum tratamento térmico.

Para SANTOS (2015), a resistência à compressão para uma argamassa de revestimento produzida com cimento Portland CII – F 32 e com traço de dosagem 1:1:6 (cimento: cal: areia) foi aproximadamente de 1,5 MPa para uma idade de 7 dias. Já as resistências à compressão provenientes da lama vermelha apresentaram melhores resultados, alcançando 4,41 MPa para U1, também em 7 dias de cura.

Segundo a ABNT NBR 15270-1:2005, blocos cerâmicos utilizados para a vedação devem atender a uma resistência mínima de 1,5 MPa para blocos usados com furos na horizontal e a 3,0 MPa para sua utilização com furos na vertical. Comparando-se com os resultados obtidos neste trabalho, pode-se afirmar que os corpos de prova fabricados com a lama vermelha para as umidades U1 e U2 apresentaram valores de resistência superiores aos estabelecidos por norma para blocos cerâmicos de vedação. Convém lembrar que o processo queima na fabricação de blocos cerâmicos exigem temperaturas superiores a 1000°C para ganho de resistência e redução de permeabilidade.

6. CONCLUSÃO

Neste trabalho foram analisados os processos de geopolímerização para potenciais aplicações do resíduo lama vermelha como aglomerante na construção civil. Os corpos de prova inicialmente estudados à temperatura de 60°C apresentaram eflorescências e quebra durante manuseio, evidenciando que, para a temperatura analisada, o processo de geopolímerização não foi eficaz.

Em comparação com outras pesquisas, a lama vermelha deste trabalho apresentou pH dentro dos valores previsíveis e abaixo dos valores normativos para classificação de resíduos corrosivos. As umidades estudadas apresentaram influência no processo de moldagem dos corpos de prova e nos resultados finais, sendo que, para maiores teores de umidade houve maior retração e deslocamento.

A curva granulométrica resultante assemelha-se aos resultados obtidos por outros pesquisadores e demonstra que o material é constituído de partículas muito finas. Da mesma forma, no ensaio de fluorescência de raios-X a lama apresentou uma composição química previsível, apesar da constituição química variar de acordo com a rocha de origem. Para a difração de raios-x, as fases cristalinas encontradas, como a sodalita e gibbsita, contribuem de forma direta para o processo de geopolímerização estudado.

De modo geral, as resistências obtidas pelas amostras com menores teores de umidade apresentaram melhor comportamento mecânico, visualmente uma menor retração volumétrica e resultaram em corpos de prova de melhor aparência. A lama vermelha no estado in natura apresentou resultados satisfatórios, evidenciando que, mesmo não tendo sido realizado um tratamento

térmico ou algum processo de estabilização química, o rejeito possui propriedades que mostram a possibilidade de seu uso.

A síntese de geopolímeros a partir do resíduo de bauxita, proveniente da região de Ouro Preto – MG, realmente é possível. Com os resultados obteve-se materiais com propriedades de resistência mecânica já compatíveis para aplicação no setor da construção civil, uma vez que apresentaram resistências superiores às mínimas estipuladas por norma para blocos cerâmicos comuns e superiores às encontradas para argamassas de revestimento convencionais.

Dentre algumas vantagens apresentadas pela geopolímerização, podemos destacar que o reaproveitamento destes resíduos contribuiria para a diminuição das lagoas de deposição de lama vermelha, reduzindo os impactos ambientais gerados e os potenciais acidentes decorrentes de um rompimento destes locais de armazenagem.

A possibilidade de aplicar tais materiais na construção civil também se mostra muito vantajosa, uma vez que esse setor apresenta uma grande capacidade de consumo por matérias já consolidados no mercado e também por materiais com novas tecnologias, que envolvam processos de produção mais sustentáveis e apresentem melhores propriedades.

7. TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros, pode-se introduzir:

- Tratamento térmico;
- Estabilização química do material;
- Adição de materiais de enchimento e/ou suplementares.

8. REFERÊNCIAS

- ABAL – Associação Brasileira do Alumínio. <http://www.abal.org.br>. Acessado em dezembro de 2016.
- ABAL; CNI. Encontro da Indústria para a sustentabilidade. **A Sustentabilidade da indústria brasileira do alumínio.** Disponível em <http://www.abal.org.br/downloads/abal-rio20.pdf>. Acessado em dezembro de 2016.
- ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland. Disponível em <http://www.abcp.org.br/>. Acessado em dezembro de 2016.
- ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland. **Boletim Técnico: Guia Básico de utilização do Cimento Portland.** Disponível em http://www.abcp.org.br/cms/wp-content/uploads/2016/05/BT106_2003.pdf. Acessado em dezembro de 2016.
- ADITYA BIRLA GROUP- **Uma Corporação Global de primeira linha.** Disponível em <http://www.adityabirla.com/portuguese/about-us/overview>. Acessado em junho de 2017.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10004:2004 – **Resíduos sólidos – Classificação.**
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 9939:1987 – **Agregados: Determinação do teor de umidade total, por secagem, em agregado graúdo.**
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 13279:2005 – **Argamassa para assentamento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão.**
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15270-1:2005 – **Componentes cerâmicos. Parte 1: Blocos cerâmicos para alvenaria de vedação – Terminologia de requisitos.**
- ANTUNES, M.L.P. **Estudo de formação e caracterização de hidróxidos de alumínio por métodos óptico-eletrônicos.** 144f. Tese (Doutorado em Ciências) - Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.
- BARROS, T. R. **Comparação do potencial da lama vermelha tratada termicamente a 400°C, 500°C, 600°C e 800°C na adsorção do corante têxtil BLUE 19 EM PH 4.** Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Ambiental da Unesp, 2013.
- BITENCOURT, C. S.; TEIDER, B. H.; GALLO, J. B.; PANDOLFELLI, V. C. **A geopolimerização como técnica para a aplicação do resíduo de bauxita.** Disponível em <http://www.scielo.br/pdf/ce/v58n345/05.pdf>. Acessado em dezembro de 2016.
- BRUNORI, C.; CREMISINI, C.; MASSANISSO, P., PINTO, V., TORRICELLI, L. Reuse of a treated red mud bauxite waste: studies on environmental compatibility. **Journal of Hazardous Materials**, v. 117, pp. 55-63, 2005.
- CARDOSO, J. G. R., CARVALHO, P. S. L., FONSECA, P. S. M., SILVA, M. M., ROCIO, M. A. R. BNDES – Banco Nacional do Desenvolvimento. **A indústria do alumínio: estrutura e tendências.** Disponível em http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/bnset/set3302.pdf. Acessado em dezembro de 2016.

- CBA - Companhia Brasileira do Alumínio. Disponível em: <http://www.cia-brasileira-aluminio.com.br/pt/default.php?acao=nao>. Acessado em dezembro de 2016.
- CETEM – Centro de Tecnologia Mineral. Disponível em <http://www.cetem.gov.br>. Acessado em dezembro de 2016.
- CONSTANTINO, Vera R. L; ARAKI, Koiti; SILVA, Denise O.; OLIVEIRA, Wanda de. Preparação de compostos de alumínio a partir da bauxita: considerações sobre alguns aspectos envolvidos em um experimento didático. **Química Nova**, v. 25, n. 3, pp. 490-498, 2002.
- CPMTC – Centro de Pesquisa Prof. Manoel Teixeira da Costa. UFMG. Disponível em <http://www.cpmtc-igc-ufmg.org/laboratorios2.htm>. Acessado em agosto de 2017.
- DAVIDOVITS, J. **Geopolymer Chemistry and Applications**. 4 eds. Cap 1. 2015.
- DONAIRE, D., **Gestão ambiental na empresa**, São Paulo: Atlas, 1995.
- EPA – Environmental Protect Agency. **Profile of the Textile Industry**. Washington, September, 1997.
- EPA – Environmental Protecyc Agency, Electronic code of federal regulations. Title 40, Part 261, Sect 4 (b) (7) (ii) (c), <http://ecfr.gpoaccess.gov>. Acessado em outubro de 2005.
- FLÔRES, J. C.C., LIMA, H. M. **Fechamento de Mina: aspectos técnicos, jurídicos e socioambientais**. Editora UFOP: Centro Universitário Morro do Cruzeiro, Ouro Preto – MG. 2012. 316p.
- GROTHEIM, K., WELCH, B. J. **Aluminum smelter technology, Aluminium**.Verlog, cap 1, cap 8 e cap 10, 1988.
- HALIM, C. E.; AMAL, R; BEYDOUN, D.; SCOTT, J. A.; LOW, G. Implications of the structure of cementitious wastes containing Pb(II), Cd(II), As(V), and Cr(VI) on the leaching of metals. **Cement and Concrete Research**, v. 34, pp. 1093–1102, 2004.
- HENRIQUES, A. B., PORTO, M. F. S. A insustentável leveza do alumínio: impactos socioambientais da inserção do Brasil no mercado do alumínio primário. **Ciência saúde coletiva**. vol.18 no.11 Rio de Janeiro Nov. 2013.
- HILDEBRANDO, E. A. Aplicação de Rejeito do processo Bayer (lama vermelha) como matéria-prima na indústria de cerâmica estrutural. Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química – UFPA, 1998.
- HIND, R. A., BHARGAVA, S. K., GROCOTT, 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.
- HYDRO – A Hydro no Brasil. Disponível em <http://www.hydro.com/pt/A-Hydro-no-Brasil>. Acessado em dezembro de 2016.
- IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração. Disponível em <http://www.ibram.org.br>. Acessado em dezembro de 2016.

- IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração. Informações e análises da economia mineral brasileira. 7ed., 2012. Disponível em <http://www.ibram.org.br>. Acessado em dezembro de 2016.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Conhecendo o Brasil**. Disponível em <http://www.ibge.gov.br>. Acessado em dezembro de 2016.
- IPN – Instituto Pedro Nunes. Meios e Serviços. Disponível em <https://www.ipn.pt/laboratorio/LEDMAT/ensaio/19>. Acessado em agosto de 2017.
- JAMAICAN BAUXITE CASE, <http://www1.american.edu./ted/bauxite.htm>. Acessado em dezembro de 2016.
- KIRKPATRICK, D.B., Red mud product development, **The Minerals, Metals & Materials Society**, 1996.
- KRIVENKO, P. **Alkaline Cements**. First International Conference on Alkaline Cements and Concretes, K.S.T.U., pp. 12-45. 1994.
- MANFROI, E. P. CHEFIAF, M. **Avaliação da Lama Vermelha como material pozolânico em substituição ao cimento para produção de argamassas**. Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina – Florianópolis, 2009.
- MASSARENTE, M., SERRANO, A., MACHADO, L., HARA., L., FRAZÃO, V. Alumínio no Brasil: transformações nos últimos 15 anos. **Bain & Company, Inc**. Disponível http://www.bain.com/offices/saopaulo/pt/Images/ALUMINIO%20BRASIL_PORT.pdf. Acessado em dezembro de 2016.
- MAURY, M. B.; BLUMENSCHIEIN, R. N. **produção de cimento: Impactos à saúde e ao meio ambiente**. Sustentabilidade em debate. Disponível em http://repositorio.unb.br/bitstream/10482/12110/1/ARTIGO_ProducaoCimentoImpacto.pdf. Acessado em dezembro de 2016.
- McCONCHIE, D., CLARK, M., DAVIES-McCONCHIE, F., “**New strategies for the management of bauxite refinery residues (red mud)**”, In: Proceedings of the 6th international alumina quality workshop, Brisbane, Australia, pp. 327-332, 2002.
- NAGEM, N. F., MANSUR, H. S. **Geopolímero a partir de resíduos oriundos da indústria de alumínio para reutilização de coprocessamento**. Abril de 2013. Tese de doutorado apresentada o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte – MG, 2013.
- NGUYEN, Q. D., BOGER, D. V., Application of rheology to solving tailings disposal problems, **International Journal of Mineral Processing**, n. 54, pp. 217-233, 1998.
- NUNN, R. F., Advances in red mud dewatering and disposal technologies, The Minerals, Metals & Materials Society, 1998.
- PRADHAN, J; DAS, S.N; DAS, J; RAO, S.B; THAKUR, R.S. **Characterization of Indian red muds and recovery of their metals value**. Light Metals, p.87-92, 1996.
- PINHEIRO, J. C. F. Departamento Nacional de Produção Mineral. **A importância econômica da mineração no Brasil**. Apresentação RENAI. Agosto de 2011.
- PINTO, A. T. **Introdução ao estudo dos geopolímeros**. Universidade Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, 2006.

- REESE, K. M., CUNDIFF, W. H. "**In Aluminum production the first stage is Alumina**", Industrial and Engineering Chemistry. v. 47. n. 9, pp. 1672-1680, 1955.
- SANTOS, D. H. **Ecomassa - argamassas mistas produzidas com esteril de mineração**. Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto – MG, 2015.
- 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. Online ISSN 1517-7076.
- SILVA FILHO, E. B.; ALVES M. C. M.; DA MOTTA, M.; OLIVEIRA E.H.C.; JUNIOR, W. B. **Estudo sobre a utilização da lama vermelha para a remoção de corantes em efluentes têxteis**. Departamento de Engenharia Civil e de Engenharia Química, Universidade Federal de Pernambuco, Cidade Universitária, 50740-521 Recife – PE, Brasil, 2008.
- SOUZA, J. A. S. **Estudo e avaliação do uso de resíduos do processo Bayer como matéria-prima na produção de agregados sintéticos para a construção civil**. Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia, ITEC, da Universidade Federal do Pará. Belém – PA, 2010.
- SOUZA, R. D. Z. **Estudo da Influência do ativador alcalino nas propriedades mecânicas do geopolímero**. Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de graduação em Engenharia de Materiais da Universidade do Vale do Paraíba, 2012.
- SOUZA SANTOS, P. **Ciência e Tecnologia de Argilas – vol.1**. São Paulo: Ed. E. Blucher, 1989.
- STEPHAN, D.; MALLMANN, R.; KNÖFEL D.; HÄRDTL R. High intakes of Cr, Ni, and Zn in clinker - Part II: Influence on the hydration properties. **Cement and Concrete Research**, v. 29, pp. 1959–1967, 1999.
- TEIXEIRA, N. S.; LIMA, M. H. R. **A indústria do alumínio primário no Brasil: perspectivas de relações comerciais com a China**. Departamento de Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, RJ, 2003.
- TEIXEIRA PINTO, A. **Novos sistemas ligantes obtidos por ativação alcalina (geopolimerização)**. Revista Construção Magazine. Disponível em http://www.geopolymer.com.br/pdf/novos_materiais.pdf. Acessado em dezembro de 2016.
- VALE. **Sobre a vale**. Disponível em <http://www.vale.com/brasil>. Acessado em dezembro de 2016.
- VASSALO, E. A. S.; **Obtenção de geopolímero a partir de metacaulim ativado**. Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Minas Gerais – MG, 2013.
- VILLAR, Lúcio F. de S. **Estudo do adensamento e ressecamento de resíduos de mineração e processamento de bauxita**. Tese de Doutorado em Engenharia Civil apresentada ao programa de Pós-Graduação da Pontifca Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC. Rio de Janeiro, RJ. 2002.

WAO – World Aluminium Organization. Disponível em <http://www.world-aluminium.org>.
Acessado em maio de 2010.