

CARACTERIZAÇÃO DA LAMA VERMELHA DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DO ALUMÍNIO PARA USO NA CONSTRUÇÃO CIVIL

Breno Fuchs Vilela (IC) e Prof^a, Dr^a. Roberta Nunes Attili Franzin (Orientadora)

Apoio: PIBIC Mackenzie

RESUMO

Em função do relevante impacto ambiental causado pela indústria da construção civil e das dificuldades encontradas para o armazenamento seguro de rejeitos de mineração, vários estudos têm sido realizados a fim de se buscar alternativas viáveis do uso de rejeitos na fabricação de materiais de construção. O presente trabalho teve como objetivo avaliar as características físicas e químicas da lama vermelha proveniente do processo de produção do alumínio e verificar a possibilidade de seu uso na composição de materiais cerâmicos. Para a caracterização da lama foram realizados ensaios de granulometria, teor de umidade, fluorescência de raios X, termogravimetria (TG) e análise térmica diferencial (DTA). Foram preparadas composições cerâmicas sem a incorporação do rejeito (controle) e com a incorporação de 20%, 40% e 60% em massa de lama vermelha. Corpos de prova prismáticos foram conformados por prensagem e submetidos a ensaios de massa específica aparente, retração linear de secagem, queima ($T_{\text{máx}}=1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ com taxa de $2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$), retração linear de queima, massa específica aparente após a queima, absorção de água, porosidade aparente e tensão de ruptura à flexão. Embora a adição do rejeito não tenha aumentado a resistência mecânica do material cerâmico em relação ao grupo de controle, a composição com 20% de lama apresentou os melhores resultados para a tensão de ruptura (5,42 MPa) e resistência à flexão (3,05 MPa), indicando a viabilidade de seu uso para a produção de tijolos de alvenaria.

Palavras-chave: Lama Vermelha. Cerâmica. Sustentabilidade.

ABSTRACT

Due to the relevant environmental impact caused by the construction industry and the difficulties encountered in the safe storage of mining waste, several studies have been carried out to seek viable alternatives for the use of waste in construction materials. The present work aimed to evaluate the physical and chemical characteristics of the red mud from the aluminum production process and to verify the possibility of its use in the composition of ceramic materials. For the characterization of the mud, particle size, moisture content, X-ray fluorescence, thermogravimetry (TG) and differential thermal analysis (DTA) tests were carried out. Ceramic compositions were prepared without the incorporation of the tailings (control) and with the incorporation of 20%, 40% and 60% by mass of red mud. Prismatic specimens were formed by pressing and subjected to tests of apparent specific mass, linear drying retraction, firing ($T_{\text{max}} = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ with a rate of $2\text{ }^{\circ}\text{C} / \text{min}$), linear firing retraction, apparent specific mass

after firing, absorption water, apparent porosity, and flexural tensile strength. Although the addition of the tailings did not increase the mechanical resistance of the ceramic material in relation to the control group, the composition with 20% of mud presented the best results for the breaking stress (5.42 MPa) and flexural strength (3.05 MPa), indicating the feasibility of its use to produce masonry bricks.

Keywords: Red Mud. Ceramics. Sustainability.

1. INTRODUÇÃO

A construção civil e as atividades da mineração são dois focos de grande impacto ambiental. Em ambos os casos muitos resíduos são gerados, além da grande emissão de CO₂. O conceito de reciclagem é muito comum nos debates sobre a redução dos impactos ambientais negativos causados por resíduos de materiais fundamentais para o desenvolvimento humano. Com essa preocupação constante, o tema se torna alvo de estudos em diferentes áreas do conhecimento humano.

Hoje as empresas trabalham com a prática de planejamento baseado em cenários. Essa ação admirativa leva em consideração variáveis externas para buscar a máxima eficiência em seu processo produtivo e menor volume de resíduos gerados pela sua produção. Todavia, a máxima eficiência de processos produtivos ainda ocasiona a constituição de muitos rejeitos se tornando uma grande problemática para o meio ambiente e para as próprias empresas, uma vez que o gerador tem responsabilidade com o resíduo gerado (SHINOMIYA, 2015).

Atualmente o Brasil vem encontrando grandes problemas de estocagem dos volumes de rejeitos produzidos pela área de mineração. De acordo com Freitas (2019?) o Brasil é o primeiro colocado no mundo, na extração do nióbio, segundo produtor mundial de ferro e o terceiro produtor mundial de bauxita e manganês. A industrialização e a mineração incessante desses materiais ocasionam um volume enorme de rejeitos, que demanda grandes espaços de armazenamento. Usualmente esse armazenamento é feito com a construção de barragens ou pilhas, que são métodos de estocagem pouco seguros.

A necessidade de reutilização de resíduos causado pela extração de minerais, de um modo geral, vem se tornando cada vez mais comum no mundo contemporâneo, uma vez que os recursos naturais são escassos e existe a necessidade de uma requalificação dos resíduos desses respectivos materiais. Não só isso, é importante frisar que as políticas ambientais estão cada vez mais rigorosas e focadas em diminuir impactos ambientais negativos.

Esse infortúnio, apesar de presente há muitos anos, ganhou visibilidade mundial nas últimas décadas, com mais ímpeto no Brasil, haja vista que o país sofreu, nos anos de 2015 e 2019, duas tragédias de grande impacto ambiental, econômico e social com o rompimento das barragens de rejeitos da mineração do ferro, em Minas Gerais (MG), ocasionando mortes, além da contaminação da fauna e flora, com sérios riscos de eliminação da biodiversidade. Esses fatos pungentes para a sociedade mostram a necessidade de métodos eficazes para o direcionamento desse material, considerado inconveniente, para formas sustentáveis e lucrativas de reuso.

A quantidade de rejeito armazenado pelas mineradoras em barragens ou mesmo no empilhamento a seco, assim como a intensa exploração de recursos naturais usados na

construção civil são problemas recorrentes, sendo necessário, e de fundamental importância, buscar soluções alternativas para minimizar o impacto ambiental produzido pela atividade da mineração e por esta indústria. Particularmente no Brasil, pesquisas para o reaproveitamento do rejeito decorrente da extração do minério de ferro na construção civil têm sido realizadas na última década, no entanto, no país, são produzidos muitos outros minerais. Neste contexto, verifica-se a necessidade de se caracterizar rejeitos decorrentes da extração de outros minerais, além do ferro, a fim de verificar as viabilidades de uso como matéria-prima para a construção civil e em obras de infraestrutura.

Apesar de haver algumas pesquisas com relação à caracterização física e química da lama vermelha, rejeito gerado na produção do alumínio primário, bem como seu uso na produção de materiais de construção e obras de infraestrutura, os estudos ainda são insuficientes, de forma que pesquisas adicionais são necessárias, inclusive para que possam subsidiar parâmetros para a normatização do uso do rejeito em materiais de construção.

A lama vermelha, resíduo gerado a partir do refino na bauxita para a produção da alumina pelo processo Bayer, pode causar sérios danos ambientais em função da sua alcalinidade elevada e da quantidade de metais pesados na sua composição (SHINOMIYA, 2015). A quantidade de lama produzida nesse processo é muito alta, podendo chegar ao dobro da quantidade de alumina produzida, de acordo com Antunes, Conceição e Navarro (2011). Os problemas causados pela disposição inadequada da lama vermelha são muitos. Podemos citar, além da periculosidade da contenção do rejeito em barragens, e necessidade de grandes áreas de armazenamento, a possibilidade da lixiviação de seus componentes e, conseqüentemente, a contaminação do solo, rios e águas subterrâneas.

Considerando a demanda crescente dos recursos minerais e o fato da bauxita ocupar a terceira posição de recursos naturais em volume produzido no Brasil, com cerca de 37 milhões de toneladas anuais (ABAL, 2017), o aumento do volume dos rejeitos, incluindo a lama vermelha, é inevitável. Assim, o desenvolvimento de tecnologias que busquem a reutilização da lama pode trazer benefícios econômicos às mineradoras, na medida que este rejeito pode vir a ser comercializado e, portanto, representar lucro para as empresas. Seguramente, quando o rejeito for considerado um ativo, as empresas terão maior preocupação com a sua disposição.

Considerando as questões apontadas, esta pesquisa buscou contribuir com informações para avaliar o uso do rejeito do processo de produção do alumínio primário pelo método Bayer, como uma alternativa viável para a produção de materiais usados na construção civil, particularmente na produção de cerâmica vermelha. Para isso, lama vermelha proveniente da região de Alumínio (SP) foi caracterizada química e fisicamente e

incorporada, em diferentes teores, na produção de material cerâmico, cujo comportamento físico e mecânico também foi estudado.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

A bauxita é o minério primário da cadeia produtiva do alumínio. A produção do alumínio inicia-se com a exploração da bauxita, seguida do refinamento do minério pelo processo Bayer para a obtenção da alumina (Al_2O_3) e do processo de redução eletrolítica Hall-Herault da alumina para a obtenção do alumínio primário. Em meio a esses processos, temos a lama vermelha, resíduo que é oriundo do processo de produção de alumínio pelo processo de Bayer.

No processo Bayer, criado e patenteado em 1888 por Karl Josef Bayer, a bauxita (o minério mais importante de alumínio, visto que contém cerca de 40-60% de alumínio) é lavada em uma solução quente (175°C) de hidróxido de sódio (NaOH), responsável pela dissolução do alumínio presente, formando o íon $\text{Al}(\text{OH})_4^-$. Nesta fase, denominada digestão, as impurezas (outros componentes da bauxita) não se dissolvem, permanecendo em fase sólida. Este rejeito é conhecido como “lama vermelha” e é composto, também, por aluminato de sódio que é muito solúvel em água. Os materiais lama vermelha e aluminato de sódio são separados por etapas de espessamento, seguidas de filtração. Com os resultados da separação, o $\text{Al}(\text{OH})_4^-$, presente na solução, é precipitado na forma de hidróxido de alumínio $\text{Al}(\text{OH})_3$, por meio de adição de solução ácida. O $\text{Al}(\text{OH})_3$ precipitado passa por uma etapa de separação por filtração, para que, após uma etapa de desumidificação, possa ser levado para a calcinação. Na calcinação o $\text{Al}(\text{OH})_3$ é aquecido a aproximadamente a 1000°C para desidratar e formar cristais de alumina puros (FORTUNA *et al.*, 2012).

Com esse processo são geradas, no mundo, cerca de 82 milhões de toneladas de lama vermelha, sendo 10,6 milhões de toneladas somente no Brasil (RIBEIRO, 2010).

Para as diversas aplicações desse resíduo é importante conhecer suas características físicas e químicas para evidenciar suas potencialidades. Há na literatura alguns estudos sobre a caracterização física e química da lama vermelha, no entanto, essas características podem variar dependendo da procedência da amostra.

Antunes, Conceição e Navarro (2011) estudaram as características físicas, químicas e mineralógicas da lama vermelha proveniente da cidade de Alumínio – SP. Os resultados obtidos pelo estudo abriram possibilidades de aplicação da lama vermelha, visto que ficou concluído que a elevação de temperatura do material gera maiores quantidades de óxidos de ferro, fato que simplifica a sua aplicação como coagulante, catalisador ou como reagente Fenton.

Com objetivos similares aos de Antunes, Conceição e Navarro (2011), os estudos realizados por Tinoco (2017) avaliaram o comportamento geomecânico do rejeito gerado pelo beneficiamento do minério bauxita. As amostras ensaiadas demonstram bom comportamento mecânico, em condições de umidade ótima, para uso em obras de terra.

Um estudo feito por Manfroi (2009) avaliou as características potenciais da lama vermelha como material pozolânico, dando possibilidade para a substituição desse material pelo cimento na produção da argamassa. Esse trabalho deu resultados promissores que comprovavam certa atividade pozolânica na lama vermelha. Antes disso, Melcarne (2007) já havia estudado alternativas tecnológicas de usos dos resíduos gerados no processo do alumínio primário, sendo elas: utilização como matéria prima para aterro, utilização na indústria de material de construção, tratamento de água e efluentes contaminantes, melhoramento de solos agrícolas e recuperação dos principais compostos metálicos.

Vangelatos, Angelopoulos e Boufonous (2009) fizeram um estudo de parte do rejeito da produção do alumínio como matéria prima para a produção de cimento Portland comum. Keragia (2010) relata um projeto piloto bem-sucedido que demonstra o potencial de reutilização do resíduo de bauxita na construção de aterros.

Mais recentemente, Babisk (2015) avaliou o aproveitamento do resíduo de lama vermelha, proveniente do processo Bayer na indústria de beneficiamento de alumínio, no desenvolvimento de cerâmicas. Babisk (2015) avaliou o uso de lama vermelha na produção de materiais cerâmicos compostos por argila vermelha e amarela. Além dos estudos de caracterização das argilas e da lama, foram feitos ensaios de retração linear, absorção de água e resistência mecânica em peças cerâmicas produzidas com diferentes teores de lama e temperaturas de calcinação. Apesar do estudo mostrar que, em princípio, a incorporação da lama não melhora significativamente as propriedades físicas e mecânicas da cerâmica, aponta para a viabilidade de uso em produtos específicos, que atendam as normas técnicas. O estudo mostra, ainda, que os resultados dependem fortemente das temperaturas de calcinação do material.

Shinonya (2015) realizou um estudo visando uma caracterização do lama vermelha para um posterior planejamento de possíveis cenários de aplicação do resíduo, com o objetivo de diminuir a grande quantidade da matéria-prima armazenada anualmente. Como conclusão do trabalho, ele apresentou possibilidade de aplicação da lama vermelha no processo de produção da cerâmica, construção de estradas e aplicação no processo de produção de cerâmica vermelha por extrusão.

Pesquisas como estas estão cada vez mais comuns nos meios de desenvolvimento tecnológico e estudos focados na preservação do meio ambiente.

3. METODOLOGIA

O presente trabalho foi desenvolvido integralmente por meio de pesquisa experimental.

A lama vermelha (LV) estudada, proveniente da região de Alumínio, interior de São Paulo, foi fornecida pela Associação Brasileira do Alumínio (ABAL).

Para o material como recebido, na forma drenada, foram feitos ensaios de granulometria e teor de umidade. O ensaio de granulometria foi realizado para avaliar as características granulométricas do material, além de promover a homogeneização da amostra para as etapas de caracterização. A análise granulométrica foi realizada pelo método de peneiramento, através de um agitador de peneiras Bertel, por um período de vibração de 15 minutos. O ensaio do teor de umidade foi feito com um analisador de umidade da marca GEHAKA.

Para a caracterização da LV, também foram feitos ensaios de densidade aparente, fluorescência de raios X, termogravimetria (TG) e análise térmica diferencial (DTA). Em todos os ensaios, inclusive no de umidade, foram utilizados os grãos passantes nas peneiras Tyler Nº 80, Nº 100 e o fundo, isto é, grãos menores que 149 μm .

A densidade aparente da lama foi calculada através da razão entre sua massa e o seu volume. Os dados de massa e volume foram obtidos com o auxílio de uma balança digital com resolução de 0,01 g e proveta.

O ensaio de fluorescência de raio X teve como base a norma ABNT NBR 16137 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2016) e permitiu identificar a composição química do material, isto é, os elementos químicos presentes, bem como suas quantidades.

A análise térmica foi realizada pelo método de termogravimetria (TG), que permite avaliar possíveis modificações químicas e estruturais do material durante o processo de variação da temperatura. Além do método TG, foi usada a técnica de análise térmica diferencial (DTA), que permite analisar os fenômenos térmicos (absorção ou liberação de calor) desenvolvidos na amostra durante o processo de variação de temperatura, que não podem ser claramente distinguidos na curva TG.

Baseado nas sugestões expostas no trabalho de Shinomiya (2015), juntamente com os resultados obtidos por Antunes, Conceição e Navarro (2011) e Basisk (2015), optou-se por incorporar a lama vermelha no processo de produção de cerâmica.

Para a produção da cerâmica, utilizou-se argila vermelha. Foram produzidos corpos de prova sem nenhum teor de lama vermelha (grupo de controle) e corpos de prova com os

teores de 20%, 40% e 60% de lama, em massa, substituindo parcialmente a argila (grupo experimental). Os teores de substituição citados foram definidos com base no estudo de Guimarães (2017).

Para cada composição dos grupos de controle e experimental, foram produzidos oito corpos de prova (CPs) prismáticos, com dimensões aproximadas de 150mm x 75mm x 6,5mm (Figura 1). Foi utilizado o processo de prensagem para a conformação da cerâmica vermelha. O procedimento consiste na compactação e moldagem de uma massa granular no interior de uma matriz rígida ou flexível (REED, 1995 *apud* GUIMARÃES, 2017).

Figura 1. Corpos de prova



Fonte: acervo Pessoal (2020).

As placas de cerâmicas, obtidas pelo método de prensagem, foram submetidas aos ensaios de massa específica aparente, retração linear de secagem, queima, retração linear de queima, massa específica aparente após a queima, absorção de água, porosidade aparente e tensão de ruptura à flexão.

Logo após a moldagem, e antes dos ensaios, os corpos de provas (CPs), foram expostos a uma secagem em estufa, por 24 horas, com temperatura de 110°C. A secagem é fundamental para a submissão do CP no ciclo de queima, visto que o corpo recém-moldado perde a maior parte da sua água livre e obtém resistência mecânica. É sabido que após a moldagem, o corpo cerâmico conserva de 5% a 35% de água e, ao queimar uma peça com teor excessivo de água, corre-se o risco de aparecimento de trincas (LUCAS, 2001).

A massa específica aparente (MEA) dos corpos de provas úmidos (após moldagem), secos e queimados foi determinada de acordo com o especificado pela norma ASTM C373-72 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 1997) que se utiliza do método dimensional (relação entre massa e volume). As massas foram medidas em balança digital com resolução de 0,01 g e as dimensões foram coletadas por meio de um paquímetro digital

com resolução de 0,01 mm. Os resultados analisados, para cada composição, foram obtidos através da média aritmética dos resultados dos oito corpos de provas.

A retração linear de secagem (RLs) foi determinada através das medidas do comprimento da amostra após a conformação, e do comprimento da amostra após a secagem a 110 °C por meio da Equação 1 (WOLFF, 2008). As medidas de comprimento foram feitas através de um paquímetro digital, com precisão de 0,01 mm.

$$RLs(\%) = \frac{(Lu-Ls)}{Lu} \times 100 \quad (1)$$

em que:

RLs: retração linear de secagem (%);

Lu: comprimento do corpo de prova após a conformação (mm);

Ls: comprimento do corpo de prova após a secagem em estufa (mm).

O ciclo de queima é uma das principais etapas do processo de fabricação da cerâmica e tem como objetivo fornecer condições ideais para que a transformação física e química da estrutura da composição comporte-se do modo esperado. Para o presente estudo, foi utilizado um forno para queima rápida, da marca Fornitec, com temperatura máxima de trabalho de 1200 °C. Os corpos de provas foram submetidos a um aumento de temperatura, desde a temperatura ambiente até 1000 °C, com taxa constante de 2 °C/min.

A retração linear na queima (RLq) foi determinada de modo semelhante a retração linear de secagem, por meio da Equação 2:

$$RLq(\%) = \frac{(Ls-Lq)}{Ls} \times 100 \quad (2)$$

em que:

RLq: retração linear de queima (%);

Ls: comprimento do corpo de prova após a secagem em estufa (mm);

Lq: comprimento do corpo de prova após a queima (mm).

Para a análise da massa específica aparente, após a queima, foi utilizado o mesmo método com o qual se determinou a massa específica aparente (MEA).

A análise da absorção de água foi feita de acordo com a norma ABNT NBR 13818 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997), utilizando do princípio de Arquimedes em imersão de água.

Os corpos de provas foram secos em estufa, em temperatura aproximada de 110 °C. Sucessivamente foram resfriados em temperatura ambiente e por meio de uma balança de

precisão de 0,01 g foi determinada a massa (M_1) de cada corpo de prova. Os corpos de prova, de cada uma das quatro composições, foram imersos verticalmente em um recipiente com água destilada, com aproximadamente 10 cm de água acima deles. A água foi aquecida até seu estado de ebulição e o nível de água foi mantido constante durante todo o procedimento. Após a retirada dos corpos de prova da imersão, eles foram expostos a temperatura ambiente para que entrassem em equilíbrio e enxugados com um pano levemente úmido. Após esse processo, foram medidas as massas úmidas (M_2) de cada CP. Os valores da absorção de água foram obtidos pela Equação 3:

$$AA\% = \frac{(M_2 - M_1)}{M_1} \times 100 \quad (3)$$

em que:

AA: absorção de água, expressa em % de água absorvida;

M_1 : massa do CP após a secagem (g);

M_2 : massa do CP úmido (g).

Já a porosidade aparente (PA) foi determinada pela relação do volume de poros abertos e o volume total do corpo de prova utilizando-se a Equação 4. Para a medição das massas imersas foi realizado uma pesagem hidrostática com balança digital com precisão de 0,01 g.

$$PA\% = \frac{(M_u - M_s)}{(M_u - M_i)} \times 100 \quad (4)$$

em que:

PA: Porosidade aparente (%);

M_s : massa seca (g);

M_u : massa úmida (g);

M_i : massa imersa (g).

Os resultados de resistência mecânica foram realizados em uma Máquina Universal de Ensaio da marca Zwinck Roel. Para isso, os oito corpos de prova, de cada composição, foram submetidos a um ensaio de tensão de ruptura à flexão (TRF) com carregamento a três pontos. Os valores de módulo de flexão, tensão de flexão a 0,2% de deformação plástica, tensão de flexão na ruptura e resistência a flexão foram obtidos através da média aritmética dos valores obtidos para os oito corpos de prova de cada composição.

Vale ressaltar que as análises de difração de raios X da lama vermelha e índice de plasticidade, previstos na fase de projeto, não foram realizados em virtude do fechamento das instalações laboratoriais, devido à pandemia de COVID-19.

4. RESULTADO E DISCUSSÃO

Os resultados referentes as caracterizações químicas e físicas da lama vermelha (LV), assim como os resultados dos ensaios obtidos para a cerâmica produzida com a lama, pelo método de prensagem, são apresentados a seguir.

O teor de umidade para a amostra de lama vermelha sem nenhum tipo de tratamento é apresentado na Tabela 1. Este resultado é semelhante ao obtido por Melcarne (2007), que aponta como alternativa tecnológica, o uso do resíduo no processo de produção de cerâmica. O teor de umidade da lama vermelha também está dentro das especificações da ABNT NBR 15310 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009) para a produção de cerâmica pelo método de prensagem.

Tabela 1. Teor de umidade da amostra de lama vermelha sem tratamento

Massa inicial da amostra (g)	2,460±0,001
Massa final da amostra (g)	2,116±0,001
Umidade (%)	14,0

Fonte: Os autores (2021).

A massa específica aparente seca foi de $d = (1,21 \pm 0,01) \times 10^3 \text{kg/m}^3$. Vale ressaltar que essa grandeza pode ser fortemente dependente do local de exploração da bauxita.

A composição química da lama vermelha, determinada por fluorescência de raios X, é apresentada na Tabela 2. Como é possível observar, a amostra é composta, predominantemente, por óxido de ferro (Fe_2O_3), dióxido de silício (SiO_2) e óxido de alumínio (Al_2O_3). Outros elementos presentes em percentuais significativos são óxido de cálcio (CaO), óxido de sódio (Na_2O) e dióxido de titânio (TiO_2). Via de regra, o rejeito de bauxita retém todo o ferro, titânio e sílica presentes na bauxita, além do alumínio remanescente do processo de refino. (SILVA FILHO *et al.*, 2007 *apud* Babisk, 2015).

Tabela 2. Composição Química da Lama Vermelha

Elemento						
Concentração (Wt%)						
Fe_2O_3	SiO_2	Al_2O_3	CaO	Na_2O	TiO_2	P_2O_5
32,677	23,466	22,873	7,583	7,059	3,689	1,025
*elementos com teores percentuais individuais menores que 0,8%: MgO , SO_3 , Cl , Mn_2O_3 e SrO						

Fonte: Os autores (2021).

A composição química da amostra e as concentrações dos elementos químicos presentes são bem semelhantes aquelas encontradas por Antunes, Conceição e Navarro

(2011), uma vez que os autores analisaram lama vermelha procedente do mesmo local do material estudado neste trabalho. Estes elementos também estão presentes na lama analisada por vários pesquisadores em diferentes países (BABISK, 2015), muito embora as concentrações dos elementos químicos, nestes casos, sejam diferentes, uma vez que este fator também é dependente das características mineralógicas locais.

A Tabela 3 mostra os resultados obtidos no ensaio de granulometria de acordo com a norma ABNT NBR NM 248 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003). A lama apresentou maior parcela de massa passante na peneira Tyler 28.

Tabela 3. Análise granulométrica da lama vermelha

Nº	Peneira (Tyler)	Abertura (mm)	Massa Retida ($\pm 0,01$ g)	Percentual Retido (%)
1	8	2,380	289,38	28,85
2	9	2,000	65,73	6,55
3	28	0,590	330,05	32,90
4	48	0,297	170,09	16,96
5	80	0,177	109,77	10,94
6	100	0,149	26,88	2,68
7	-	Fundo	11,14	1,11

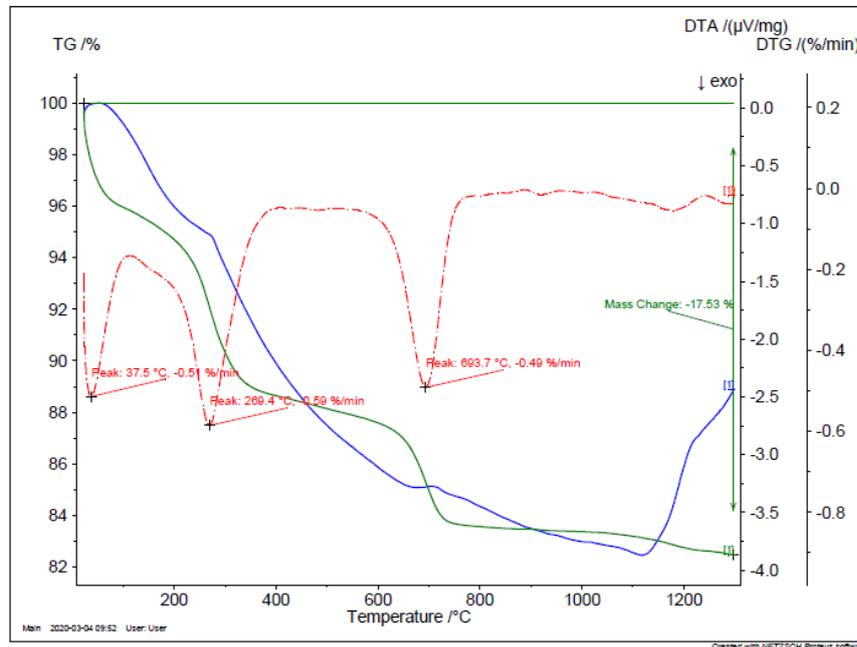
Fonte: Os autores (2021).

Conforme Villar (2002), as características granulométricas da lama vermelha estão diretamente relacionadas a mineralogia da rocha de origem, ao processo de extração, deposição (adição de floclantes) e processamento. Deste modo, como estas características estão condicionadas as variantes citadas, é improvável estabelecer uma curva granulométrica padrão para este tipo de material.

De acordo com Tinoco (2017), é de se esperar que a lama vermelha apresente baixa condutividade hidráulica e plasticidade, visto que possui um teor alto de material fino.

Os resultados obtidos pelo ensaio de termogravimetria (TG) e análise térmica diferencial (DTA) estão apresentados no Gráfico 1.

Gráfico 1. Curvas TG e DTA para a amostra de LV obtidas em atmosfera de nitrogênio com razão de aquecimento de 10°C/min



Fonte: Os autores (2020).

A curva verde corresponde a análise de TG da lama vermelha, a curva azul representa a análise de TG do material de referência e a curva vermelha representa a análise DTA da lama. É possível verificar que, na faixa de temperatura entre a temperatura ambiente e aproximadamente 100 °C, há uma perda de massa da ordem de 4%, correspondente a perda de umidade do material. A partir de 100 °C até aproximadamente 1300 °C houve perda de cerca de 13,53% de massa, que pode estar associada a decomposição de elementos químicos e transições de fase. A curva DTA mostra picos nas temperaturas 269,4 °C e 693,7 °C associados à decomposição e/ou transições de fase e as áreas relativas aos picos correspondem às perdas de massa.

Para uma análise mais precisa, seria importante realizar ensaios de difração de raios X da lama, antes e após diferentes tratamentos térmicos, a fim de associar os resultados obtidos por TG e DTA com informações estruturais e composição química do material.

Os resultados de TG e DTA encontrados neste trabalho, estão de acordo com os estudos realizados por Antunes, Conceição e Navarro (2011), que também realizaram análise por difração de raios X da lama vermelha antes e após tratamento térmico em diferentes temperaturas. De acordo com seus estudos, há perda de massa entre 50 °C e 150 °C devido a perda de umidade do material, entre 200 e 400 °C por decomposição de elementos químicos, tais como gipsita, bohemita e goethita e a 600 °C por decomposição da calcita. Na faixa de temperatura entre 700 °C e 800 °C os autores observam a formação de uma fase cristalina do ferro (hematita) e para temperaturas superiores, perda de cristalinidade do quartzo.

Os valores médios das massas específicas aparentes (MEA) determinados para os corpos de prova (CP) nas formas úmida e seca para cada composição da cerâmica, com diferentes teores de substituição da lama vermelha, são apresentados na Tabela 4. Também são apresentados, na respectiva tabela, os valores obtidos para as massas específicas aparentes após a queima (MEAq) dos corpos de prova, para cada composição.

Os corpos de prova formados com a composição denominada 1, correspondem ao grupo de controle, para o qual nenhum teor de lama vermelha foi adicionado. Para as composições 2, 3 e 4 houve a substituição de 20%, 40% e 60%, em massa, da argila pela lama vermelha (LV), respectivamente.

Tabela 4. Massa específica aparente dos corpos de prova

Composição	MEA (g/cm ³)		MEAq (g/cm ³)
	CP úmido	CP seco	
1 (controle)	1,84±0,05	1,68±0,04	1,58±0,05
2 (20% de LV)	1,73±0,12	1,72±0,15	1,71±0,14
3 (40% de LV)	1,74±0,10	1,63±0,05	1,59±0,14
4 (60% de LV)	1,91±0,10	1,75±0,14	1,64±0,13

Fonte: Os autores (2021).

Pode-se visualizar na Tabela 4 que, mesmo considerando o desvio-padrão, não se estabelece uma correlação das massas específicas aparentes das composições estudadas. Essa conclusão coincide com os resultados obtidos pelo estudo realizado por Guimarães (2017).

Juntamente com a resistência mecânica, a massa específica aparente a seco é uma das propriedades mais importantes da peça cerâmica compactada (COELHO, 1991 *apud* GUIMARÃES 2017). Comparando os resultados de MEA com os de MEAq, é possível concluir que não existe uma mudança significativa entre a massa específica aparente após a secagem em estufa e a massa específica aparente após a queima. No entanto, existe uma redução gradativa entre os valores após a secagem e após a queima. É esperado que ocorra uma perda de massa durante as etapas dos ensaios devido à eliminação de água de constituição e da matéria orgânica presente na amostra. (DUTRA, 2007).

Ressalte-se que os procedimentos que antecedem à etapa de queima, principalmente durante a preparação da composição e da conformação da peça, podem interferir diretamente em todas as propriedades finais da cerâmica, incluindo na MEAq (DUTRA, 2007).

A Tabela 5 mostra os valores médios da retração linear de secagem (RIs) e retração linear de queima (RIq) para os corpos de prova de cada composição e os respectivos desvios-padrão.

De modo geral, é possível observar que a retração linear de secagem está diretamente relacionada aos diferentes teores de lama vermelha utilizados, embora os resultados não mostrem um comportamento linear da retração de secagem com o aumento do teor de lama. A composição 3 (40% de LV) está mais próxima da composição de controle e a composição 2 (20% de LV) foi a que apresentou menor retração. Comparando os resultados obtidos na Tabela 5 com os resultados de massa específica aparente após a secagem e após a queima, apresentados na Tabela 4, fica claro que a eliminação de água de conformação é responsável pela maior retração linear dos corpos de prova.

Tabela 5. Retração linear de secagem (Rls) e de queima (Rlq) dos corpos de prova

Composição	Rls (%)	Rlq (%)
1 (controle)	1,22±0,10	2,43±0,14
2 (20% de LV)	0,32±0,20	3,43±0,23
3 (40% de LV)	1,48±0,20	4,65±0,40
4 (60% de LV)	0,93±0,20	2,81±0,55

Fonte: Os autores (2021).

Ressalta-se que a composição 3 apresentou menor variação de MEA após a secagem e maior retração linear de secagem.

A retração linear de queima é uma das principais propriedades para a determinação das dimensões finais da cerâmica e para a garantia da qualidade. Espera-se que os valores de retração linear na queima não variem significativamente. É possível notar, no entanto, que a incorporação da lama vermelha resultou em um aumento da retração linear dos corpos cerâmicos queimados, em relação ao grupo de controle, sendo que a composição 4 apresentou o resultado de RLq mais parecido com esta composição.

Os valores médios de absorção de água (AA%) e seus respectivos desvios-padrão são apresentados na Tabela 6. A absorção de água corresponde ao aumento de massa do corpo de prova devido a água absorvida, quando imerso. Uma menor infiltração de água na peça cerâmica determina, por exemplo, a maior durabilidade e resistência ao ambiente ao qual o material é exposto (BABISK, 2015).

Tabela 6. Absorção de água (AA)

Composição	AA(%)
1 (controle)	21,5±1,2
2 (20% de LV)	17,3±2,9
3 (40% de LV)	17,9±2,9
4 (60% de LV)	20,9±1,8

Fonte: Os autores (2021).

De acordo com os resultados obtidos por Guimarães (2017), a taxa de aquecimento da queima não influencia de forma significativa a absorção de água dos corpos de provas.

Todavia, a absorção de água diminui com o aumento da temperatura de queima, independentemente da taxa de aquecimento.

Um dos fatores que exerce forte influência na AA é o empacotamento dos corpos de provas. Um baixo grau de empacotamento a seco, juntamente com a elevada perda de massa durante a queima e o baixo teor de óxidos de fundentes, podem incrementar esta propriedade, visto que o comportamento da absorção de água está relacionado diretamente à microestrutura e determina o nível de porosidade das peças cerâmicas (GUIMARÃES, 2017).

A Tabela 7 mostra os resultados referentes a porosidade aparente. Os resultados apresentados correspondem à média aritmética dos resultados obtidos para os corpos de prova de cada lote e seu desvio-padrão.

Tabela 7. Porosidade aparente, em percentual (PA)

Composição	Porosidade aparente (PA%)
1 (controle)	36,9±1,3
2 (20% de LV)	33,0±4,4
3 (40% de LV)	32,8±2,1
4 (60% de LV)	35,6±4,7

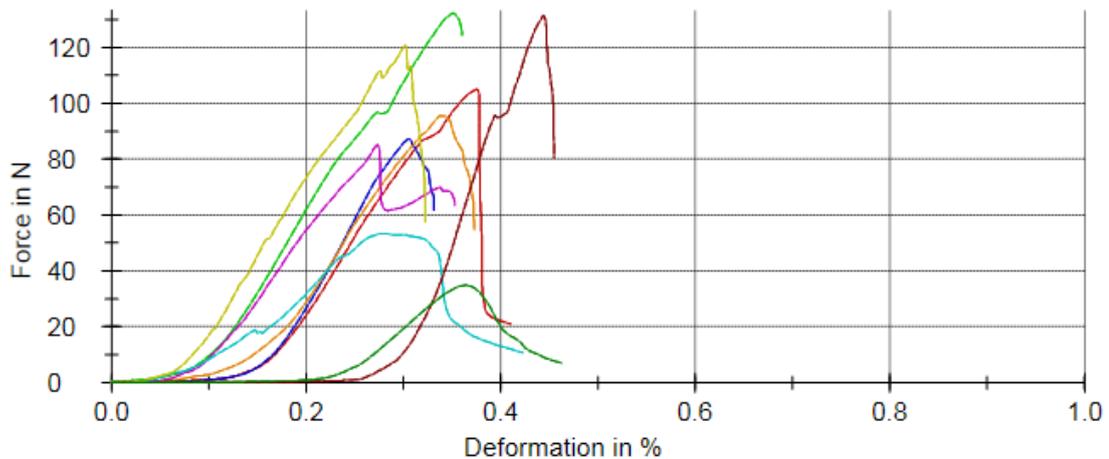
Fonte: Os autores (2021).

É possível concluir, considerando os desvios-padrão, que o teor de lama vermelha substituído em cada composição não influenciou significativamente a porosidade aparente (PA) dos corpos de prova. Embora não exista uma correlação clara entre os resultados de porosidade aparente e absorção de água (AA), observa-se que as composições 1 e 4, assim como as composições 2 e 3, tiveram valores de AA e PA próximos.

Os valores encontrados para a PA são semelhantes ao valor (35,1±0,6)% encontrado por Guimarães (2017), para cerâmicas sem a adição de lama vermelha, mas obtidas nas mesmas condições de queima daquelas produzidas neste estudo (2 °C/min, T_{máx} =1000 °C).

O Gráfico 2 ilustra os resultados referentes ao ensaio de tensão na ruptura a flexão dos corpos de prova com a composição de 20% de LV. No gráfico, cada uma das curvas representa a medida para cada um dos corpos de prova do lote de amostras com 20% de substituição, em massa, da argila pela lama. A mesma análise foi feita para o grupo controle e para os grupos com 40% e 60% de lama vermelha.

Gráfico 2. Tensão na ruptura a flexão (20%LV)



Fonte: Os autores (2021).

Os resultados obtidos a partir dos parâmetros extraídos deste tipo de gráfico são apresentados na tabela 8. São eles: o módulo de flexão (E_f), tensão de flexão a 0,2% de deformação plástica ($\sigma_{0,02}$), tensão na ruptura (σ_{fM}) e resistência à flexão (σ_{fB}).

Tabela 8. Tensão de ruptura a flexão

Composição	E_f MPa	$\sigma_{0,02}$ MPa	σ_{fM} MPa	σ_{fB} MPa
1 (controle)	37,1	0,0415	8,77	7,380
2 (20% de LV)	546,0	0,3000	5,42	3,050
3 (40% de LV)	315,0	1,0700	2,15	0,619
4 (60% de LV)	50,2	0,2040	1,14	0,246

Fonte: Os autores (2021).

Para o módulo de flexão e tensão de flexão a 0,2% de deformação plástica não é possível notar um padrão nos resultados obtidos. Contudo, os valores de tensão na ruptura e resistência à flexão apresentam uma diminuição diretamente relacionada ao aumento do teor em massa da lama vermelha (LV).

De acordo com o estudo realizado por Santos (1989), que mostra resistências mínimas de diferentes produtos finais derivados da cerâmica, tais como: tijolos de alvenaria (2MPa), tijolos furados (5,5MPa), e telhas (6,5MPa), pode-se concluir que as composições 2 e 3 possuem características de resistência adequadas para aplicação em tijolos de alvenaria cerâmicos. No entanto, avaliando todas as características estudadas, conclui-se que a composição com 20% de LV (composição 2) seria a mais apropriada para a produção deste material.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo avaliar o comportamento físico e químico da lama vermelha, proveniente do processo de beneficiamento da bauxita, da cidade de Alumínio, para fins de uso na produção de materiais cerâmicos.

Os resultados obtidos para a caracterização da lama estão, em sua maioria, coerentes com os resultados encontrados na literatura, porém vale ressaltar que as propriedades estudadas podem ser fortemente influenciadas pelas condições mineralógicas do local de extração do minério e das condições de seu beneficiamento.

Dentre os ensaios realizados para os corpos de prova cerâmicos, sem e com diferentes teores de lama vermelha, destacamos os resultados da massa específica aparente, absorção de água, retração linear de queima e tensão de ruptura a flexão, para a conclusão deste estudo.

Foi possível verificar que a massa específica aparente para as composições 2 e 4 (20% de LV e 60% de LV, respectivamente) aumentou, em relação ao grupo controle. Com relação absorção de água, as composições 2 e 3 (20% de LV e 40% de LV) apresentaram as menores taxas, inclusive menores, que a apresentada pelo grupo controle. A adição da LV não diminuiu a retração linear de queima (Rlq) para as composições estudadas, tendo a composição 4 (60% de LV), apresentado o melhor resultado dentre os corpos de prova com a lama. Apesar disso, o resultado obtido para a composição 2 (20% de LV), não exclui a possibilidade de seu uso como material de construção. Com relação a resistência mecânica, observa-se claramente que a adição da LV não aumentou a resistência dos corpos de prova. No entanto, dentre as composições com LV estudadas, a composição com 20% de lama apresentou o melhor resultado para tensão na ruptura (σ_{fM}) e resistência à flexão (σ_{fB}).

Assim, com base na análise de todos os resultados, indica-se a composição com 20% de lama vermelha para a fabricação de tijolos de alvenaria.

Baseado nos resultados obtidos neste trabalho e em estudos de outros autores, foi possível observar que a queima é uma das etapas de maior influência nas propriedades estudadas. Desta forma, recomenda-se para estudos futuros, a influência de diferentes temperaturas de queima e taxas de aquecimento na cerâmica composta com 20% de massa de lama vermelha, além de estudos do comportamento físico e mecânico de tijolos de alvenaria produzidos com este material.

6. REFERÊNCIAS

ABAL - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. **Bauxita no Brasil Mineração Responsável e Competitividade**. Abril 2017.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15310**: Componentes cerâmicos — Telhas — Terminologia, requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2009. 53 p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16137**: Ensaio não destrutivo - Identificação de materiais por teste por pontos, espectrometria por fluorescência de raios X e espectrometria por emissão óptica. Rio de Janeiro, 2016. 5 p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13818**: Placas cerâmicas para revestimento - Especificação e métodos de ensaios. Rio de Janeiro, 1997. 78 p.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.

ANTUNES, M.L.P.; CONCEIÇÃO F.T.; NAVARRO G.R.B. **Caracterização da lama vermelha brasileira (resíduo do refino da bauxita) e avaliação de suas propriedades para futuras aplicações**. In: 3rd International Workshop Advances in Cleaner Production. São Paulo, Brasil, 2011.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C373-72**. Standard test methods for determination of water absorption and associated properties by vacuum method for pressed ceramic tiles and glass tiles and boil method for extruded ceramic tiles and non-tile fired ceramic whiteware products. Pensilvânia, 1997.

BABISK, Michelle Pereira. **Incorporação de lama vermelha em cerâmica vermelha**. 2015. 216 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia e Ciência de Materiais, Universidade Estadual do Norte Fluminense - UENF, Campos dos Goytacazes, 2015.

DUTRA, R. P. S., **Efeito da velocidade de aquecimento nas propriedades de produtos da cerâmica estrutural**. 2007. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia e Ciência dos Materiais, UFRN, Natal, 2007.

FORTUNA, Jaqueline; BIASI, Luís Henrique de; MARQUES, Jéssica Alves; MARTINS, Juliana Conti. **Processo Bayer de obtenção de alumina como ferramenta para o ensino de conceitos de estequiometria**. 2012. 10 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Departamento de Engenharia Química, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Criciúma, 2012.

FREITAS, Eduardo de. **"Principais áreas produtoras de minério no Brasil"**; *Brasil Escola* [2019?]. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/brasil/principais-areas-produtoras-minerio.htm>. Acesso em 19 mar. 2019.

GUIMARÃES, Carlos Alberto de Oliveira. **Avaliação do ciclo de queima nas propriedades tecnológicas de cerâmica vermelha**. 2017. 114 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia e Ciência de Materiais, Universidade Estadual do Norte Fluminense - UENF, Campos dos Goytacazes, 2017.

IBRAM – INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Relatório Anual de Atividades – julho 2017 a junho 2018**.

KEHAGIA, F. **A successful pilot project demonstrating the re-use potential of bauxite residue in embankment construction.** Conservation and Recycling. 54, 417-421, 2010.

LUCAS, J. Carvalho. **Anomalias em Revestimentos Cerâmicos Colados.** ITCM -28, Lisboa L.N.E.C., 2001.

MANFROI, Eliz Paula. **Avaliação da lama vermelha como material pozolânico em substituição ao cimento para produção de argamassas.** 2009. 152 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

MELCARNE, Monica Maria Cavalcante de Albuquerque. **Alternativas tecnológicas de uso dos resíduos gerados no processo de produção do alumínio primário.** 2007. 131 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Gestão Ambiental, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São Paulo, 2007.

MIRANDA, Marta Aparecida Sawaya. Ministério Público do Estado de Minas Gerais. **Relatório Técnico.** Minas Gerais, 2016.

RIBEIRO, Daniel Vêras. **Influência da adição de lama vermelha nas propriedades e na corrosibilidade do concreto armado.** 2010. 260 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2010.

SANTOS, P.S. **Ciência e tecnologia das argilas, 2ª Ed.,** São Paulo, Edgard Blucher, 1989. v.1, 405p.

SHINOMIYA, Léo Daiki. **Planejamento de cenário para uso de resíduos industriais: aplicação para lama vermelha.** 2015. 196 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia e Ciência de Materiais, Ita, São José dos Campos, 2015.

TINOCO, Carla Palominio. **Caracterização geomecânica de um rejeito de mineração de bauxita.** 2017. 147 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geociência, Instituto de Geociência, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

VANGELATOS, I., ANGELOPOULOS, G.N., BOUFONOUS, D. **Utilization of ferroalumina as raw material in the production of ordinary Portland Cement.** Journal of Hazardous Materials. 168, 473-478, 2009.

VILAR, Lúcio F. de S. **Estudo do adensamento e ressecamento de resíduos de mineração e processamento de bauxita.** 2002. 50 f. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia Civil, Pontifca Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

WOLFF, E., **O Uso do Lodo de Estação de Tratamento de Água e Resíduos da Indústria de Celulose (Dregs, Grits, e Lama de Cal) na Produção de Cerâmica Vermelha.** 2008. 188f. Tese (Doutorado) – Curso de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, Belo Horizonte-MG, 2008.

Contatos:

Breno Fuchs Vilela – brenofuchs@gmail.com

Profª. Drª. Roberta Nunes Attili Franzin (Orientadora) – roberta.franzin@mackenzie.br