ESTUDO DA LAMA VERMELHA COMO FÍLER EM MATRIZES CIMENTÍCIAS

Maxwell K. Degen [(1)]; Thiago C. Cardoso [(2)]; Rayara P. Costa[(3)]; Ângela B. Masuero[(4)]; Denise C. C. Dal Molin[(5)]

(1) Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) – maxdegen@hotmail.com; (2) Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) – thiagocostacardoso@gmail.com; (3) Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) – rayarapintocosta@gmail.com; (4) Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) – angela.masuero@ufrgs.br; (5) Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) – dmolin@ufrgs.br

RESUMO

A lama vermelha é um resíduo resultante do beneficiamento da bauxita para produção da alumina pelo processo Bayer. Ela é constituída por sólidos insolúveis (óxidos) em solução de soda cáustica. A cor avermelhada é resultante da elevada quantidade de ferro presente neste resíduo. A produção mundial de lama vermelha gira em torno de 90 milhões de toneladas todo ano. A disposição e descarte inadequado desse material geram riscos ao meio ambiente e à sociedade. Assim, é importante estudos para o reaproveitamento desse resíduo em outros setores da economia. Como a construção civil é um setor da economia brasileira que demanda grande consumo de materiais cimentícios, o presente estudo buscou analisar a viabilidade da utilização da lama vermelha em uma matriz cimentícia. O material foi utilizado como fíler em substituição ao cimento nas proporções de 5%, 10% e 15% em massa para a produção de concreto. Foram realizados ensaios para avaliar as propriedades físicas e mecânicas do concreto confeccionado incluindo resistência à compressão simples, resistência à tração por compressão diametral e absorção por capilaridade. Também se executou ensaios de durabilidade para identificar a possível presença de expansibilidade e reação álcali-agregado decorrendo da utilização da lama vermelha na matriz cimentícia em argamassa. Os resultados mostraram que a utilização da lama vermelha como substituto parcial do cimento promove o aumento da resistência mecânica, mas seu uso pode gerar reações expansivas.

Palavras-chave: lama vermelha, concreto, fíler, resíduo.

STUDY OF RED MUD AS A FILLER IN CEMENT MATRIX

ABSTRACT

Red mud is a residue from the processing of bauxite for the production of alumina by the Bayer process. It consists of insoluble solids (oxides) in caustic soda solution. The reddish color is the result of the high amount of iron present in this residue. According to some authors, the world production of red mud turns around 90 million tons every year. The inappropriate storage and discard of this material creates risks to the environment and society. Thus, it is important studies for the reuse of this residue in other sectors of the economy. As the civil construction is a Brazilian economy sector that demands large consumption of cementitious materials, the present study sought to analyze the viability of the use of red mud in a cement matrix. The material was used as a filler to replace the cement in the proportions of 5%, 10% and 15% in concrete. It was carried out studies to evaluate the physical and mechanical properties of the concrete produced including simple compression test, diametral compression and capillary absorption. It was also carried out tests of durability to identify the possible presence of expansibility and alkali-aggregate reaction resulted from the use of the red mud in cementitious mortar matrix The results showed that the use of red mud as partial replacement of the cement promotes the increase of the mechanical resistance, but its use can generate expansive reactions.

Key-words: red mud, concrete, filler, residue.

1 INTRODUÇÃO

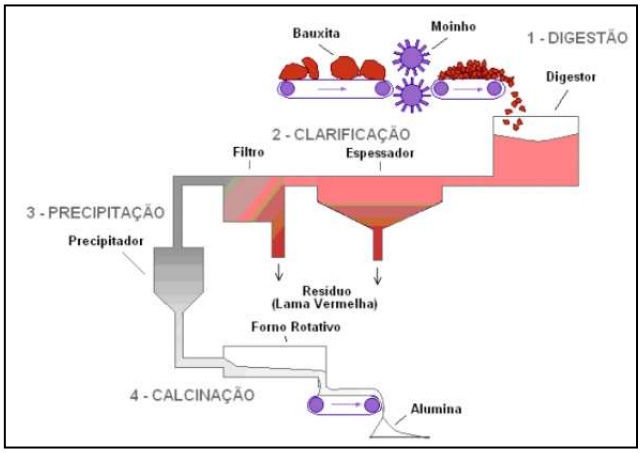
1.1. Processo de geração

A lama vermelha é um resíduo, proveniente do processo Bayer no qual a bauxita é submetida a um processo químico e eletrolítico para produção alumina (óxido de alumínio). A alumina é empregada na produção do alumínio primário. Esse processo é utilizado nas plantas de produção de alumina desde 1893 e foi desenvolvido por Josef Bayer [1,2]. Inicialmente desenvolvido para a indústria têxtil, que emprega a alumina como fixador para o tingimento do algodão, ela passou a ser utilizado na produção da alumina substituindo o processo Le Chatelier pela redução dos custos de produção [1].

O fundamento do processo Bayer consiste na separação da alumina de outros componentes como óxido de ferro, titânio e cálcio. Assim, a bauxita é aquecida sob condições de altas temperaturas e pressão em soda cáustica para formar uma solução de aluminato de sódio deixando um resíduo insolúvel chamado de lama vermelha. Esse resíduo é composto de óxidos e alumina não dissolvida. A cor avermelhada é resultado do elevado teor de ferro presente na bauxita. O aluminato de sódio é filtrado e os cristais de hidróxido de alumínio precipitam. Este último pode ser vendido desta maneira ou calcinado para formar o óxido de alumínio (alumina)[2]. O foco principal das refinarias é a máxima recuperação da soda cáustica presente na lama vermelha para reutilizar novamente no seu processo de extração da alumina da bauxita.

O processo Bayer é composto de quatro etapas ilustradas na Figura 1, quais sejam: digestão, clarificação, precipitação e calcinação.

Figura 1: Fluxograma e Esquema do processo Bayer (Fonte: WAO (2003) apud Silva Filho et al. (2007))[1].



A primeira etapa do processo Bayer consiste na moagem da bauxita, seguido pelo processo de digestão da mesma em uma solução de hidróxido de sódio sob determinadas temperaturas e pressão. A ideia é que o alumínio presente na rocha se dissolva e forme uma solução verde. Na próxima etapa chamada de clarificação, realiza-se a separação entre a fase sólida constituída de resíduo insolúvel (lama vermelha) e a fase líquida

constituída pela solução. Esta etapa é ainda subdivida em espessamento e filtração. No espessamento ocorre a decantação do material para aumentar o teor de sólidos e recuperar parte do hidróxido de sódio a ser reutilizado novamente no processo. Posteriormente, tem-se a etapa de precipitação com o resfriamento da fase líquida e precipitação da alumina cristalizada. Finalmente, acontece a fase final do processo Bayer, onde ocorre a calcinação da alumina a uma temperatura de aproximadamente 1000ºC. Durante a etapa de clarificação é produzido o resíduo de bauxita, também conhecido como lama vermelha, que é constituído principalmente por óxidos insolúveis [1].

1.2. Quantidade produzida

O alumínio é o segundo metal mais produzido no mundo com uma produção anual estimada de 45 milhões de toneladas em 2011[2,3]. O consumo per capta do metal atinge 37 kg nos EUA, 31 kg no Japão, 19 kg na Europa Ocidental e 3,9 kg no Brasil [3]. O metal alumínio não ocorre naturalmente, mas o elemento alumínio está presente em várias rochas e minerais. Para obter o metal, o elemento alumínio precisar ser extraído e passar por um processo químico e eletrolítico [2]. O principal material que origina o alumínio metal é o oxido de alumínio ou também chamada alumina. Segundo ABAL (2017), o Brasil figura na décima primeira posição na produção de alumínio primário antecedido pela China, Rússia, Canadá, Emirados Árabes, Índia, Austrália, Noruega, Bahrein e Estados Unidos. Segundo essa mesma organização o Brasil ocupa a terceira posição como produtor mundial de bauxita e alumina, sendo antecedido pela Austrália e China. As reservas mundiais de bauxita totalizam 28 bilhões de toneladas dos quais 2,6 bilhões de toneladas de bauxita estão no Brasil[4]. Aproximadamente, 92% da produção mundial de bauxita é utilizada na produção de alumina enquanto que o restante é destinado à indústria de produtos refratários e químicos[3]. A produção mundial de alumina no ano 2008 foi de 60 milhões de toneladas[3].

Em nível das federações, o Pará é responsável por 93,1 % da produção nacional de bauxita[4]. A segunda e terceira posição são ocupadas por Maranhão e São Paulo, respectivamente. Tem-se que 5 toneladas de bauxita processadas com 0,14 toneladas de soda cáustica na etapa de digestão do processo Bayer produzem 2 toneladas de alumina, que quando submetidas ao processo de redução, produzem 1 tonelada de alumínio[3].

Quanto à lama vermelha, ela é um resíduo sólido oriundo da produção da alumina pelo processo Bayer sob o qual é submetido a bauxita. A alumina é utilizada para produzir alumínio primário[5]. Sabe-se que mais de 95% da alumina produzida mundialmente é derivada do processo Bayer e que as propriedades químicas e físicas da lama vermelha resultante deste processo são influenciadas tanto pelo processo de cada unidade produtora como pela natureza da bauxita[2].

Segundo alguns autores a produção mundial de lama vermelha gira em torno de 90 milhões de toneladas todo ano[5]. Enquanto outros acreditam que os 120 anos de extração de alumina da bauxita já gerou um saldo de

2,7 bilhões de lama vermelha o qual cresce aproximadamente 120 milhões de toneladas por ano[6]. A quantidade de lama vermelha oriunda do processo Bayer de refinamento da alumina pode variar de 0,3 a 2,5 toneladas por tonelada de alumina ou de 0,7 a 2 toneladas de resíduo por tonelada de alumina produzida[2].

Quanto à produção de lama vermelha no Brasil, estima-se que são produzidos anualmente 10,8 milhões de toneladas considerando a capacidade produtiva das empresas atuantes no setor em 2012. Mas este valor pode variar entre 3,24 e 27 milhões de toneladas[7].

1.3. Impactos ambientais

A forma de descarte e armazenamento da lama vermelha em cada unidade de produção de alumina depende de fatores como a disponibilidade de terra, a proximidade com o mar, clima, logística, natureza do resíduo e legislação local[2]. Inicialmente, o descarte desse material era realizado no próprio local de operação ou em plantas próximas. Entretanto, com o desenvolvimento da indústria e aprimoramento das tecnologias e aumento da preocupação com os impactos ambientais, as empresas passaram a melhorar suas técnicas de gerenciamento desse resíduo de modo a minimizar a contaminação e facilitar a recuperação dessas áreas após o fim de vida útil.

Entre as técnicas utilizadas para o descarte desse resíduo existem o lançamento do mesmo no mar por meio de tubulações que ligam a costa até o fundo do oceano (esse método está praticamente extinto) e o depósito em lagunas que podem ser depressões, minas antigas e vales represados. Algumas dessas lagunas recebem tratamento para evitar a infiltração do resíduo em águas subterrâneas. Durante um período a lagoa seria preenchida (com uma pasta fluida diluída com 15-20% de sólidos), os sólidos se consolidariam e a área poderia ser reabilitada. Outra técnica também empregada é o descarte a seco onde o resíduo é aspirado ou filtrado a alta pressão para formar um bolo semi-seco com quantidade de sólidos maior que 65%[2,3].

A principal metodologia utilizada atualmente é conter o resíduo dentro de áreas de descartes para posterior reabilitação. Após atingir a sua capacidade limite de armazenamento, a ideia é que o local seja utilizado para propósitos industriais, civis ou rearborizado para garantir a fusão com o ecossistema circundante[6]. Todavia, a capacidade das áreas de armazenagem dura em média entre 4 a 7 anos, e a reabilitação da área se processa lentamente[1].

Pode-se ainda realizar a neutralização da lama vermelha para reduzir a sua alcalinidade para um estado menos perigoso (redução do pH de 11-13 para em torno de 8). Assim, reduz-se o impacto ambiental gerado pelo armazenamento do material após o encerramento dessa atividade uma vez que o sódio é adsorvido, os minerais tampão são neutralizados e os metais tóxicos tornam-se insolúveis a esse pH. Entretanto, são processos caros e são adotados por poucas indústrias[5].

O método de descarte da lama vermelha quando efetuado de maneira inadequado pode causar a contaminação da água de superfície e subterrânea por hidróxido de sódio, ferro, alumínio e outra agentes químicos e resultar em impacto visual pelo vento carregar o pó do resíduo[1]. A lama vermelha quando não tratada possui um pH elevado entre 11-13 o que torna impossível o crescimento das plantas. Assim, a problemática ambiental atrelada ao descarte da lama vermelha se refere principalmente ao seu elevado pH, ao risco de infiltração alcalina na água subterrânea, problemas de segurança com o seu armazenamento, emissões de pó atmosférico alcalino, grande área de terra necessária para o descarte e a presença de quantidades menores de metais pesados e o risco de infiltração de nuclídeos radioativos na água subterrânea[5].

Quanto à classificação da lama vermelha como resíduo perigoso, não existe um consenso na literatura. A lama vermelha não é considerada resíduo perigoso pela United States Environmental Protection Agency (EPA). Para esta organização esse resíduo entra em uma categoria de vinte resíduos de processamento mineral que estão qualificados para a exclusão do regulamento federal sobre resíduos perigosos[8]. Já alguns autores, a consideram um material relativamente tóxico por apresentar elevados teores de hidróxido de sódio[9]. Mercury et al. (2010) classificaram a lama vermelha, segundo a NBR 10.004/2004 da Associação brasileira de normas técnicas (ABNT), como resíduo Classe I – perigoso por possuir alta corrosividade e reatividade[10,11]. A divergência quanto à classificação da lama vermelha como resíduo perigoso é resultado das diversas metodologias de avaliação e da variação da sua composição química o qual depende da bauxita e do processo de refinamento empregado em cada unidade de produção da alumina[12].

1.4. Caracterização química, física e ambiental

As características mineralógicas da bauxita e os reagentes químicos usados na etapa de beneficiamento exercem forte influência sobre a composição química da lama vermelha, sendo que existem consideráveis diferenças na proporção dos compostos químicos em função da origem desse resíduo, conforme observado na Tabela 1. Além disso, é notória a amplitude da faixa de atividade pozolânica para a lama vermelha, representada pelo somatório dos teores de SiO_2, Fe_2O_3 e Al_2O_3, variando de 36% a 76%, o que confere ao resíduo um baixo potencial como adição mineral pozolânica, sobretudo, devido ao baixo teor de SiO_2 (em geral, inferior a 20%). Durante o processo Bayer, são empregados produtos químicos alcalinos, com alto teor de Na_2O e K_2O, que refletem no pH do resíduo in natura e na estabilidade de fases minerais, tornando-as susceptíveis às reações expansivas.

Tabela 1: Composição química da lama vermelha obtida pelo processo Bayer (Fonte: autor (2018)).

Compostos químicos		Quantidade (%)				
		Ribeiro *et al.* (2010)	Liu *et al.* (2011)	Ribeiro *et al.* (2013)	Senff *et al.* (2014)	Bayat *et al.* (2018)
		ALCOA - MG (Brasil)	Shandong Alumina (China)	ALCOA - MG (Brasil)	ALCOA (Espanha)	Jajarm Alumina (Irã)
Óxido de silício	SiO_2	14,34	18,0	19,70	5,54	13,26
Trióxido de ferro	Fe_2O_3	19,85	12,38	27,30	51,80	20,54
Óxido de alumínio	Al_2O_3	19,87	6,31	27,30	18,80	15,41
Óxido de cálcio	CaO	4,61	35,09	6,33	3,27	19,87
Óxido de magnésio	MgO	-	1,13	0,47	-	1,50
Óxido de sódio	Na_2O	7,35	2,71	6,84	6,84	5,87
Óxido de potássio	K_2O	1,87	0,45	2,57	0,08	0,73
Óxido de titânio	P2O5	2,66	3,32	3,65	11,2	4,97
Óxido de manganês	MnO	0,21	-	0,29	0,04	-
Sulfato	SO_3	-	0,54	-	0,23	0,54
Cloro	Cl	-	-	-	0,02	-
Outros		1,01	2,00	2,29	2,02	0,99
Perda ao fogo		27,20	-	-	0,16	16,32

A Tabela 2 sintetiza as principais fases minerais da lama vermelha obtidas pela técnica de difratometria de raios X. O tipo e as condições do tratamento aplicado ao resíduo exercem forte influência nas fases minerais, sendo a influência da calcinação o principal tema de pesquisa uma vez que não existe consenso na literatura acerca da temperatura ótima para calcinação nem sobre os potenciais benefícios desse tratamento nas propriedades mecânicas de materiais cimentícios. Pera et al.[13] recomendam que o resíduo seja calcinado a temperatura entre 600 °C e 800°C pois esse tratamento melhoraria o seu potencial pozolânico, chamando o resíduo de "pigmento pozolânico". Resultado similar foi obtido por Liu et al. [14] em que eles detectaram que na faixa de temperatura entre 600 e 700°C ocorre o maior pico de Ca_2SiO_4, composto que ao se hidratar resulta na formação de silicatos de cálcio. Em contrapartida, outros autores [15, 16] não observaram diferenças significativas nos resultados de ensaios referentes às propriedades mecânicas e de durabilidade para o resíduo incorporado à matriz cimentícia nas condições seca/desaglomerada e calcinada.

Tabela 2: Principais fases minerais encontradas na lama vermelha (Fonte: Redmudorg (2015)).

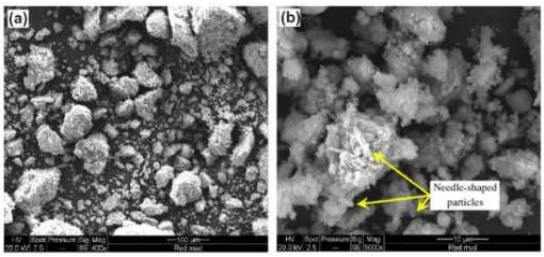
	Principais fases minerais associadas à lama vermelha						
Componentes químicos	Hematita	Goethita	Gibbsita	Boehmita	Diaspore	Calcita	Cálcio aluminato hidratado
	Fe_2O_3	Al_xOOH	$Al(OH)_3$	AlO(OH)	AlO(OH)	$CaCO_3$	$CaO.Al_2O3.H_2O$
	Quartzo	Rutila	Anatase	Caulinita	Sodalita	Alumino silicato	Cancrinita
	SiO_2	TiO_2	TiO_2	$Al_2O_3.SiO2.H_2O$	$Na_8(Al_6SiO_6.C_{24})Cl_2$	$Al_2O_3.SiO_2$	$NaAlSiO_4.6CaCO_3$

A caracterização física de diferentes lamas vermelha é reunida na Tabela 3, onde se destacam o elevado pH e módulo de finura do resíduo. Embora o diâmetro médio dependa do tipo de tratamento ao qual é sujeito, em geral, ele é inferior ao do cimento, viabilizando seu emprego como filler na matriz cimentícia. Conforme a Figura 2, o emprego do resíduo em situação seca e peneirada (#200) potencializa a densificação da matriz cimentícia em função da nucleação de produtos de hidratação decorrente de sua elevada área superficial.

Tabela 3: Caracterização física da lama vermelha obtido pelo processo Bayer (Fonte: autor (2018)).

Caracterização física	Estudos realizados				
	Ribeiro *et al* (2010)	Liu *et al.* (2011)	Senff *et al.* (2014)	Zhang *et al.* (2018)	Bayat *et al.* (2018)
Massa específica	2,90	2,90	-	2,95	-
Módulo de finura (m²/g)	20,27	20,9	20	35,419	1,18
% passante na peneira 45 µm	67,85	-	-	-	4,1
Diâmetro médio (nm)	8,0	-	78,0	3,702	-
pH’	12,95	-	-	10,0	10,3

Figura 2: Microscopia eletrônica de varredura por elétrons secundários: (a). Material in natura; (b) Material passante na peneira # 200. Fonte: He et al b. (2016).



Quanto à perspectiva ambiental, o resíduo possui na composição química diversos metais pesados, tais como titânio, manganês, ferro, zinco e alumínio. Todavia, diversos estudos [17, 18, 19] apontam que os mesmos não são

solubilizados ou lixiviados em água. Entre esses estudos, a Tabela 4 apresenta os resultados obtidos e os limites recomendados para uma lama vermelha proveniente da Índia. Nela, somente o teor de alumínio encontra-se superior ao previsto pela ISO 10500 [20].

Tabela 4: Concentração de metais pesados lixiviados na água de duas fontes do resíduo de lama vermelha passante na peneira 75 µm na Índia e os limites máximos recomendados (Fonte: Adaptado de Alam et al. (2013)).

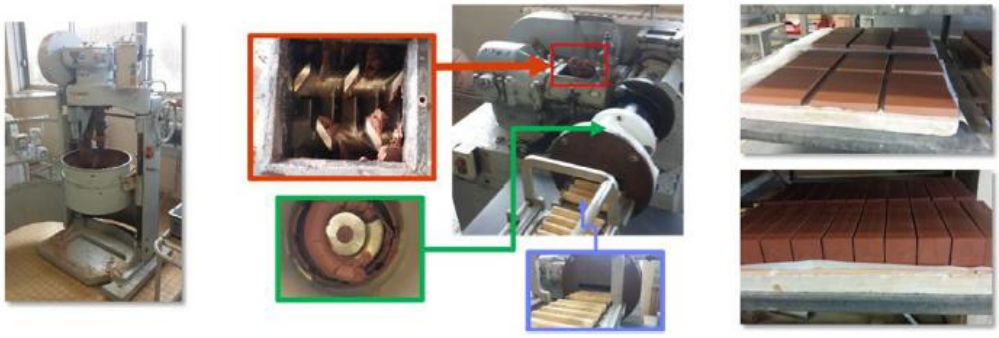
Metais pesados	Concentrações (mg/l)			
	Fonte1	Fonte 2	Limite aceitável	Observações
Cu	0,011	0,011	2,0	Limites aceitáveis por pessoa para a qualidade da água para consumo humano pela Organização Mundial da Saúde.
Fe	3,359	1,832	1,0-3,0	
Zn	0,021	0,023	0,01-0,05	
Ni	0,002	0,018	0,070	
Ca	0,793	0,364	75,000	Limites aceitáveis por pessoa pela ISO 10500: 2012
Mg	2,197	2,217	30,000	
Al	12,750	6,55	0,030	

1.5. Restrições e potencialidades de uso na indústria da Construção Civil

O emprego irrestrito do resíduo na construção civil demanda grande cautela uma vez que ele possui elevado teor de MgO, CaO e Fe_2O_3, compostos químicos sujeitos a expansibilidade, e de álcalis, que favorecem o desenvolvimento de eflorescências e a ocorrência das reações álcali-agregado e álcali-sílica. Todavia, o número de estudos que tratam dos riscos potenciais do uso desse resíduo se mostra ainda bastante aquém, o que motivou a realização deste estudo e a definição do programa experimental.

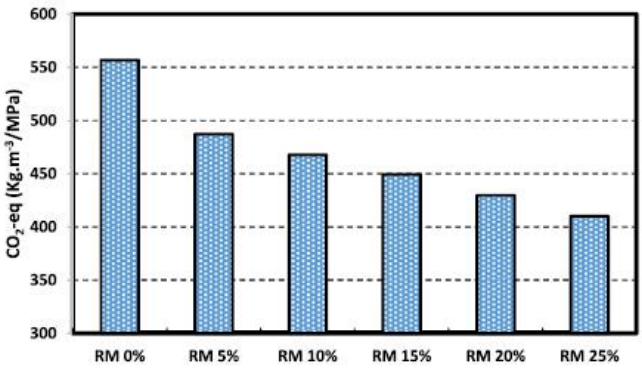
Para materiais cerâmicos, Scribot et al. [21] recomendaram que a substituição das matérias primas pelo resíduo fosse inferior a 20% em massa devido ao risco de ocorrência de eflorescências. Eles destacam que com pequenas alterações no sistema produtivo seria possível viabilizar a sua utilização em escala industrial (Figura 3).

Figura 3: Aplicação em materiais cerâmicos (Fonte: Scribot et al. (2013)).



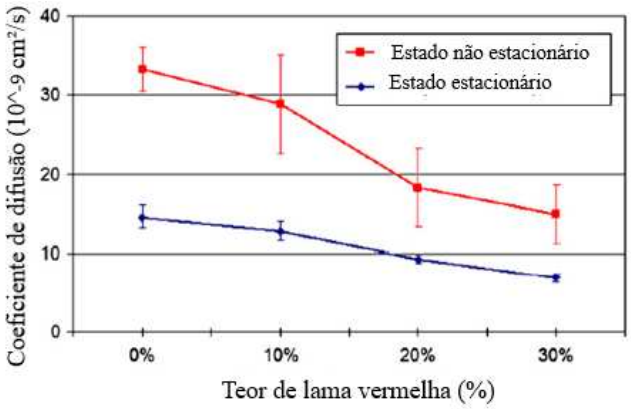
Para materiais cimentícios, Nikbin et al. [22] destaca o potencial de redução na emissão de CO_2 pela substituição do cimento pelo resíduo conforme apresentado na Figura 4. Todavia, existe um limite para essa substituição, pois a redução de cimento se reflete na diminuição do teor de portlandita, tornando a matriz cimentícia mais sujeita à carbonatação. [23]. Em geral, o teor limite se situa entre 15 e 40% na literatura [24, 25, 26, 27]. Além da redução do pH, a sua composição química favorece a ocorrência de reações de expansibilidade, assunto muito pouco tratado na literatura. Ribeiro et al. [28] utilizaram a lama vermelha como adição ao cimento e observaram que, ao contrário do que se esperava, foram obtidas reações de expansibilidade, para argamassas com até 30% de teor de lama vermelha, inferiores aos das argamassas de referência.

Figura 4: Emissão de CO2 em função do teor de lama vermelha (RM) (Fonte: Nikbin et al. (2013)).



Em certas situações, a composição da lama vermelha pode contribuir na durabilidade da matriz cimentícia. Ribeiro et al. [23] observaram que o alto teor de aluminatos presente no resíduo favorece a fixação de cloretos por meio da redução do coeficiente de difusividade desse íon (Figura 5), sendo interessante a sua utilização em ambientes marinhos. Outros pesquisadores também exploraram o potencial da utilização do resíduo na produção de cimentos álcali-ativados, geopolímeros e concretos coloridos [13, 29, 30].

Figura 5: Influência da adição de lama vermelha no coeficiente de difusão de cloretos (Fonte: adaptado Ribeiro et al. (2013))[17].



1.6. Objetivo

O objetivo deste artigo é avaliar o potencial de utilização da lama vermelha nos teores de 5%, 10% e 15% em massa como substituto do cimento em concreto Esse estudo, além de possibilitar melhor compreensão da utilização da lama vermelha em matrizes cimentícias, pretende contribuir para o esforço global de proporcionar uma destinação alternativa para a mesma reduzindo os problemas ambientais relativos à sua disposição no meio ambiente.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Caracterização dos materiais

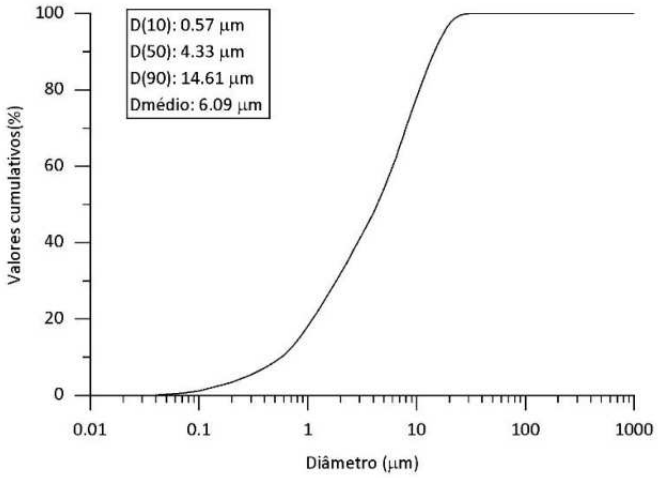
2.1.1 Lama Vermelha

A lama vermelha utilizada neste trabalho é proveniente de uma lagoa de rejeito localizada em São Luís no estado do Maranhão. A composição química pode ser observadas na Tabela 5, sendo que o resíduo empregado é majoritariamente composto por Fe_2O_3 (32,51%), Al_2O_3 (29,53%) e SiO_2 (17,1%) e possui sua distribuição granulométrica indicada na Figura 6, com d(10) 0,57 µm, d(50) 4,33 µm, d(90) 14,61 µm e dmédio de 6,09 µm. O ensaio de BET mostrou uma área superficial de 24,09 m²/g.

Tabela 5: Composição química da lama vermelha (Fonte: Autores) .

Óxidos	Fe_2O_3	Al_2O_3	SiO_2	Na_2O	ZrO_2	SO_3	CaO	K_2O	Cl	V_2O_5	MgO	P_2O_5	MnO	SrO	Y_2O_3
Teor (%)	32,51	29,56	17,1	16,64	0,66	0,4	2,05	0,1	0,36	0,3	0,13	0,1	0,04	0,02	0,021

Figura 6: Distribuição granulométrica da lama vermelha (Fonte: Autores).



2.1.2 Cimento

Para a confecção dos concretos foi utilizado o Cimento CP V ARI, para que seja possível verificar a real influência da lama vermelha em suas propriedades, visto que se trata de um cimento com baixo teor de adições.

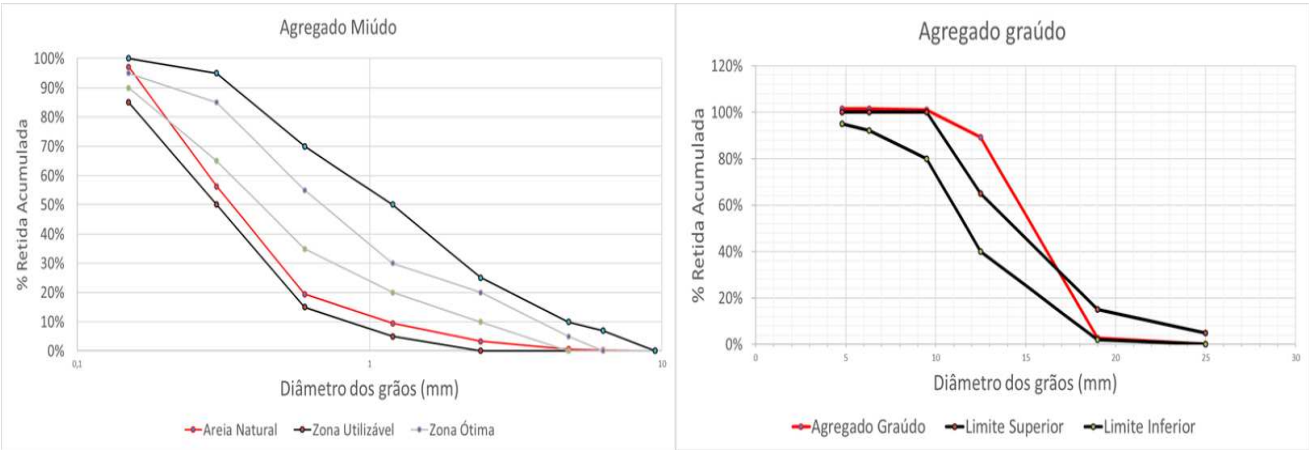
2.1.3 Agregado Miúdo

Como agregado miúdo foi utilizada a areia quartzosa natural extraída de rio com massa específica de 2,62g/cm³, massa unitária de 1,59g/cm³. A distribuição granulométrica pode ser observada na Figura 7. A areia possui módulo de finura de 1,72 e teor de material pulverulento de 3,9%.

2.1.4 Agregado Graúdo

O agregado graúdo utilizado foi brita 1, de origem basáltica, com massa específica de 2,94g/cm³ e massa unitária de 1,63 g/cm³. A distribuição granulométrica do agregado graúdo pode ser observada na Figura 7.

Figura 7: Distribuição granulométrica dos agregados (Fonte: Autores (2018)).



2.2 Traço de concreto

A dosagem dos concretos seguiu o método de dosagem EPUSP/IPT [31]. Os traços unitários utilizados para a preparação dos concretos estão apresentados na Tabela 6. Foi adotado o teor de argamassa de 53% e utilizou-se aditivo superplastificante, com teor fixado em 0,5%, para conseguir trabalhabilidade da mistura e melhorar a dispersão do resíduo visto que ele é muito fino.

A lama vermelha foi utilizada como um substituto parcial do cimento em teores de 5%, 10% e 15% em relação a massa de cimento.

Tabela 6: Dosagem dos materiais para a produção do concreto (Fonte: Autores (2018)).

Tipo	Cimento	Agregado Miúdo	Agregado Graúdo	Lama Vermelha	Água/Aglomerante	Teor de aditivo (%)	Abatimento (mm)
REF	1,00	2,71	3,29	0,00	0,45	0,5	130
S5	0,95	2,71	3,29	0,05	0,45	0,5	100
S10	0,90	2,71	3,29	0,10	0,45	0,5	80
S15	0,85	2,71	3,29	0,15	0,45	0,5	50

2.3 Ensaio de expansibilidade

A utilização da lama vermelha pode gerar expansão em matrizes cimentícias devido a presença de CaO, MgO, Fe_2O_3 e os altos teores de álcalis em sua composição química que podem desencadear em reação álcali-agregado.

Assim sendo, a expansibilidade foi medida através do método de ensaio de Le Chatelier, à quente e a frio, segundo a NBR 11582 [32] e o efeito da reação álcali-agregado foi determinado pela expansão em barras de argamassa pelo método acelerado conforme o procedimento da NBR 15577-4 [33].

2.4 Ensaios no concreto endurecido

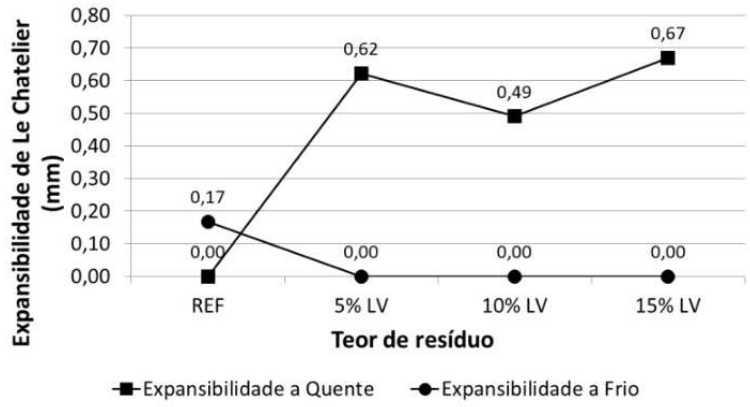
Após a moldagem, os corpos de prova foram submetidos à cura em câmara úmida, com temperatura (23 ± 2ºC) e umidade (95 ± 2%) controladas até o momento do ensaio. Os concretos foram ensaiados em relação à resistência à compressão axial seguindo o procedimento da NBR 5739 [34], nas idades de 14 e 28 dias. Também foi avaliado a resistência à tração por compressão diametral, segundo a NBR 7222 [35], na idade de 28 dias.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Expansibilidade de Le Chatelier em pastas

Na Figura 8, é possível observar os resultados do ensaio de expansibilidade a quente e a frio. No ensaio a quente, que avalia a expansibilidade devido a presença de MgO livre, observou-se um aumento da expansibilidade com a incorporação da lama vermelha. Já no ensaio a frio, que mede a expansibilidade devido a presença de CaO, observou-se que houve a redução da expansibilidade possivelmente pela redução do teor de óxido de cálcio na mistura devido a substituição do cimento pela lama vermelha.

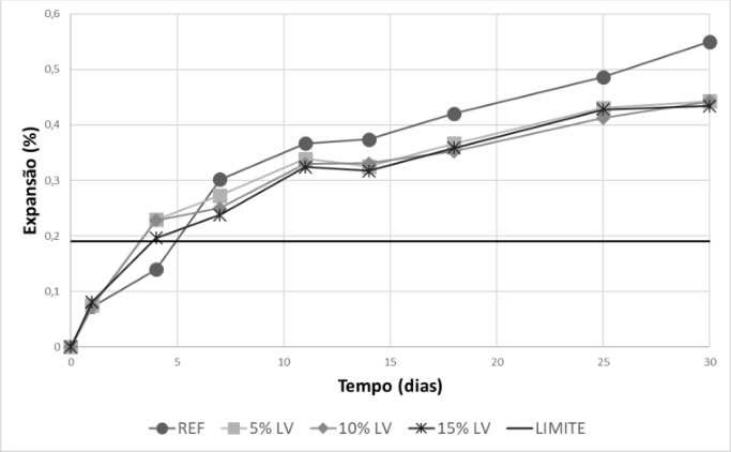
Figura 8: Expansibilidade de Le Chatelier (Fonte: Autores (2018)).



3.2 Expansibilidade em barras de argamassa

Os resultados do ensaio de expansibilidade em barras de argamassa para verificar a possível expansão pela ação dos álcalis presentes na lama vermelha podem ser observados na Figura 9 sendo 0,55% para o concreto de referencia, 0,44% para o concreto com 5% e 10% de lama vermelha e de 0,43% para o concreto com 15%. A utilização da lama vermelha em todos os teores proporcionou uma expansão aos 30 dias de ensaio menor do que a argamassa de referência podendo então observar que sua utilização pode trazer benefícios. De forma geral, o comportamento de todas as barras apresentou nível de expansão bem superior ao que recomenda a NBR 15577-1 [36] para ser considerado inócuo. As argamassas apresentaram expansão entre 0,4% e 0,6% e podem ser classificadas como potencialmente reativas de grau 2, portanto sua utilização deve ser feita com parcimônia.

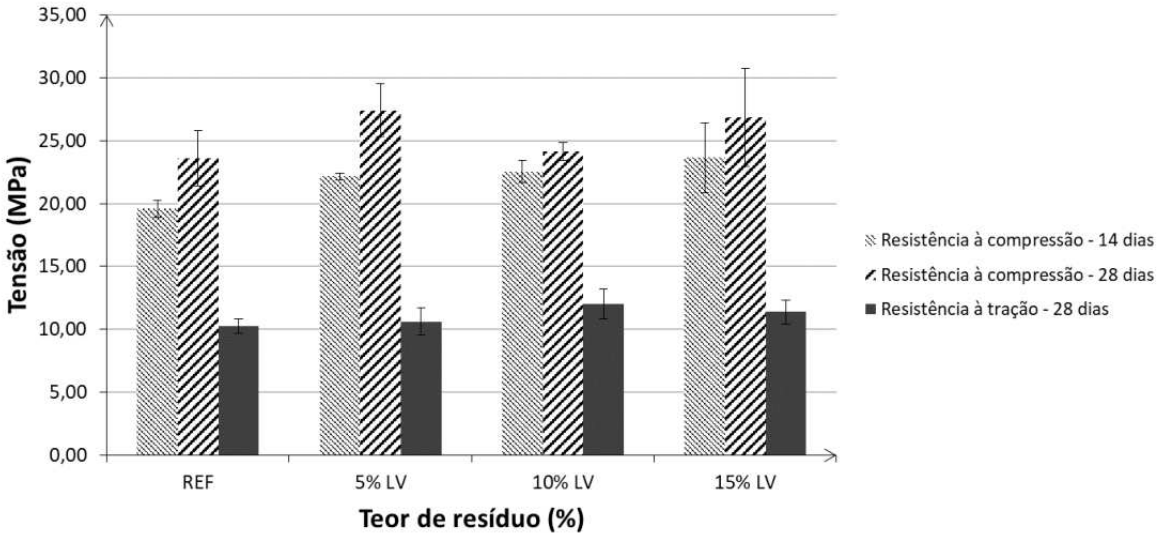
Figura 9: Expansibilidade em barras de argamassa (Fonte: Autores (2018)).



3.3 Resistência mecânica

Os concretos produzidos com lama vermelha foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão axial nas idades de 14 e 28 dias e de resistência à tração por compressão diametral também aos 28 dias. Os resultados estão apresentados na Figura 10. Foi observado um aumento na resistência à compressão de 16%, 2% e 14% para os percentuais de substituição de 5%, 10 e 15% respectivamente. Tal comportamento deve-se ao preenchimento de poros pela lama vermelha, que atua na densificação da matriz, além de suas partículas agirem como ponto de nucleação devido a sua elevada finura. Já para a resistência à tração por compressão diametral foram observados aumentos de resistência na ordem de 4%, 17% e 11% para os teores de substituição de 5%, 10% e 15%, respectivamente. Este pequeno aumento pode estar relacionado ao aumento da resistência à compressão. Analisando estatisticamente a um nível de confiabilidade de 95% observou se que não houve diferença significativa entre os grupos.

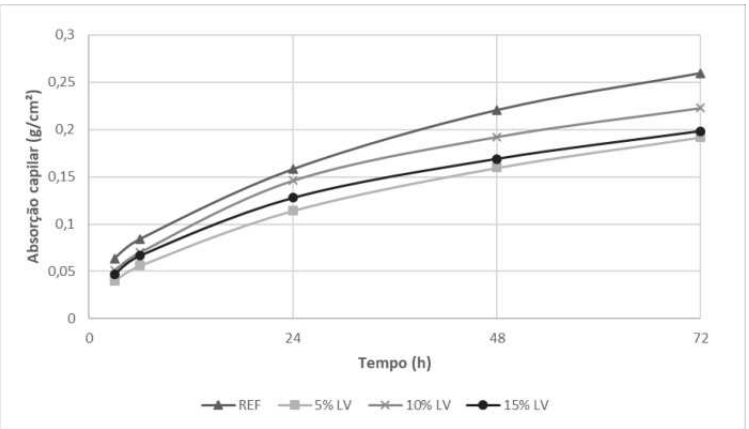
Figura 10: Resistência à compressão axial e resistência à tração por compressão diametral (Fonte: Autores (2018)).



3.4 Absorção por capilaridade

Após os 28 dias de cura, os corpos de prova foram retirados da câmara úmida, secos em estufa até constância de massa e então submetidos ao ensaio de absorção por capilaridade, os resultados podem ser observados na Figura 11. Os concretos com lama vermelha apresentaram respectivamente redução de 37%, 18% e 30% na absorção, após 72h de ensaio, quando comparados ao concreto de referência. Devido a lama vermelha ser muito fina ela atua preenchendo os poros e densificando a matriz, este resultado corrobora com os obtidos nos ensaios de resistência à compressão e tração, que indicaram o aumento da resistência.

Figura 11: Absorção por capilaridade (Fonte: Autores (2018)).



4 CONCLUSÕES

A lama vermelha é responsável por um grande dano ambiental, tanto em seu armazenamento como em possíveis desastres ambientais, sua utilização na construção civil é uma boa forma de dar um destino adequado além de poder encapsular o material em uma matriz cimentícia. A utilização da lama vermelha como substituta parcial do cimento em até 15% se mostrou eficiente, uma vez que apresentou ganho de resistência de 14% em relação ao concreto de referência e apresentou absorção de água 30% menor, além disso proporcionou menor consumo de cimento no concreto. Quanto à expansibilidade, as pastas produzidas com a lama vermelha apresentaram expansão superior a pasta de referência na avaliação a quente. Já na avaliação frio a expansão foi maior nas pastas contendo a lama vermelha. O uso lama vermelha deve ser feita com parcimônia visto que devido a sua composição química ela pode provocar reações expansivas em determinadas circunstâncias.

5 AGRADECIMENTOS

Agradecimento à Universidade Federal do Rio Grande do Sul pela estrutura física e ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão pela doação da Lama vermelha utilizada neste estudo.

6 BIBLIOGRAFIA

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

(2) Aluminium World. "Bauxite Residue Management: Best Pratice". European Aluminium, 2015.

(3) CORRÊA, M.; RAIMUNDO A. "Alumínio". DNPM, 2008. pp. 179-197.

(4) Departamento Nacional de Produção Mineral. "Sumário Mineral". DNPM, 2016. Brasília. ISSN 0101-2053.

(5) SUCHARITA PATEL, B.K. P. "Current Status of an Industrial Waste: Red Mud an Overview". IJLTEMAS, vol. 4, pp. 1-16, 2015. ISSN 2278 - 2540.

(6) POWER, G.; GRÄFE, M. E; KLAUBER, C. "Bauxite residue issues: Current management, disposal and storage practices". Hydrometallurgy, vol. 108, pp. 33–45, 2011.

(7) PEREIRA BABISK, M.; CAMPOS D. G. Incorporação de Lama Vermelha em cerâmica vermelha. Tese de D.s.c, Universidade Estadual do Norte Fluminense. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2015.

(8) Hazardous Waste. EPA, https://www.epa.gov/hw/special-wastes. Acessado em setembro de 2018.

(9) GROCOTT, S. C.; HIND, A. R.; BHARGAVA, S. K. "The surface chemistry of Bayer process solids: a review". Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, vol. 146, pp. 359–374, 1999.

(10) RIVAS MERCURY, J.M., ET AL. "Estudo do comportamento térmico e propriedades físico-mecânicas da lama vermelha". Revista Matéria, vol. 15, pp. 445 – 460, 2010.

(11) ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. "NBR 10004. Resíduos Sólidos – Classificação". Rio de Janeiro, 2004.

(12) MANFROI, E. P. Avaliação da Lama vermelha como material pozolânico em substituição ao cimento para produção de argamassas. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

(13) PERA, J., BOUZAMA, R., AMBROISE, J. P., "Development of a pozzolanic pigment from red mud", Cement and Concrete Research, v. 27, n.10, pp. 1513-1522, 1997.

(14) LIU, R., POON, C., "Utilization of red mud derived from bauxite in self-compacting concrete", Journal of Cleaner Production, v. 112, pp. 384-391, 2016.

(15) BAYAT, A., HASSANI, A., YOUSEFI, A. A., "Effects of red mud on the properties of fresh and hardened alkali-activated slag paste and mortar", Construction and Building Materials, v. 167, pp. 775-790, Feb. 2018.

(16) DE MEDEIROS, M. A., "Efeito da substituição parcial do cimento Portland por resíduo de bauxita na resistência mecânica dos concretos", Monografia, Departamento de Construção Civil, Instituto Federal de ciência, Tecnologia e educação do Maranhão, IFMA, 2015.

(17) RIBEIRO, D. V., SILVA, A. M. S., LABRINCHA, J. A., MORELLI, M. R., "Rheological properties and hydration behavior of Portland cement mortars containing calcined red mud", Canadian Journal of Civil Engineer, v. 40, pp. 557-566, Apr. 2013.

(18) HE, J., JIE, Y., ZHANG, J., YU, Y., ZHANG, G., "Synthesis and characterization of red mud and rice husk ash-based geopolymer composites", Cement and Concrete Research, v. 37, pp. 108-118, 2013.

(19) HYEOK-JUNG, K., KANG, S., CHOE, G., "Effect of Red Mud Content on Strength and Efflorescence in Pavement using Alkali- Activated Slag Cement", International Journal of Concrete Structures and Materials, v. 90, pp. 137-143, Feb. 2018.

(20) ISO 10500. Drinking Water Specifications, Bureau of Indian Standard, 2012.

(21) SCRIBOT, C., MAHERZI, W., BENZERZOUR, M., MAMINDY-PAJANY, Y., ABRIAK, N. E., "A laboratory-scale experimental investigation on the rese of a modified red mud in ceramic materials production", Construction and Building Materials, v. 163, pp. 21-31, Dec. 2017.

(22) NIKBIN, I. M., ALIAGHAZADEH, M., CHARKHTAB, S., FATHOLLAHPOUR, A., "Environmental impacts and mechanical properties of lightweight concrete containing bauxite residue (red mud)", Journal of Cleaner Production, v. 172, pp. 2683-2694, Nov. 2017.

(23) RIBEIRO, D. V., LABRINCHA, J. A., MORELLI, M. R., "Effect of the addition of red mud on the corrosion parameters of reinforced concrete", Cement and Concrete Research, v. 42, pp. 124-133, Sept. 2012.

(24) SENFF, L., MODOLO, R. C. E., SANTOS SILVA, A., FERREIRA, V. M., HOTZA, D., LABRINCHA, J. A., "Influence of red mud addition on rheological behavior and hardened properties of mortars", Construction and Building Materials, v. 65, pp. 84-91, Apr. 2014.

(25) TANG, W. C., WANG, Z., LIU, Y., CUI, H. Z., "Influence of red mud on fresh and hardened properties of self-compacting concrete", Construction and Building Materials, v. 178, pp. 288-300, May. 2018.

(26) RIBEIRO, D. V., LABRINCHA, J. A., MORELLI, M. R., "Potential Use of Natural Red Mud as Pozzolan for Portland Cement", Construction and Building Materials, v. 14, pp. 60-66, Dec. 2010.

(27) NIKBIN, I. M., ALIAGHAZADEH, M., CHARKHTAB, S., FATHOLLAHPOUR, A., "Environmental impacts and mechanical properties of lightweight concrete containing bauxite residue (red mud)", Journal of Cleaner Production, v. 172, pp. 2683-2694, Nov. 2017.

(28) RIBEIRO, D. V., SILVA, A. M. S., LABRINCHA, J. A., MORELLI, M. R., "Estudo das reações álcalis-sílica associadas ao uso da lama vermelha em argamassas colantes e de revestimento", Cerâmica, v. 58, pp. 90-98, 2012.

(29) HE, J., ZHANG, J., YU, Y., ZHANG, G., "The strength and microstructure of two geopolymers derived from metakaolin and red mud-fly ash admixture: A comparative study", Construction and Building Materials, v. 30, pp. 80-91, 2012.

(30) KRIVENKO, P., KOVALCHUK, O., PASKO, A., CROYMANS, T., HULT, M., LUTTER, G., VANDEVENNE, N., SCHREURS, S., SCHROEYERS, W., "Development of an alkali activated cements and concrete mixture design with high volumes of red mud", Construction and Building Materials, v. 151, pp. 819-826, Jun. 2017.

(31) HELENE, P., TERZIAN, P. Manual de Dosagem e Controle do Concreto. 1 ed. São Paulo: PINI, 1992. 349 p.

(32) ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. "NBR 11582. Cimento Portland — Determinação da expansibilidade de Le Chatelier". Rio de Janeiro, 2016.

(33) ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. "NBR 15577-4. Agregados — Reatividade álcali-agregado Parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado". Rio de Janeiro, 2018.

(34) ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. "NBR 5739. Concreto — Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos". Rio de Janeiro, 2018.

(35) ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. "NBR 7222. Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos". Rio de Janeiro, 2011.

(36) ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. "NBR 15577-1. Agregados — Reatividade álcali-agregado. Parte 1: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto". Rio de Janeiro, 2018.

(37) ZHANG, J., LIU, S., YAO, Z., WU, S., JIANG, H., LIANG, M. QIAO, Y., "Environmental aspects and pavement of red mud waste as the replacement of mineral filler in asphalt mixture", Construction and Building Materials, v. 180, pp. 605-613, May. 2018.

(38) LIU, X., ZHANG, N., SUN, H., ZHANG, J., LI, L., "Structural investigation relating to the cementitious activity of bauxite residue – Red mud", Cement and Concrete Research, v. 41, pp. 847-853, Apr. 2011.