

Análise do uso de rejeito de bauxita como adição pozolânica para cimento Portland

Leandro Henrique Costa Barros^{a*} , Alcebiades Negrão Macedo^a

^aPrograma de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Rua Augusto Corrêa 1, Guamá, Belém, 66075-110, Pará, Brasil

*e-mail: eng.civilleandrobarros@gmail.com

Resumo:

As atividades de mineração de bauxita (desde a fase de extração até o beneficiamento) geram um grande volume de resíduos, que representa um sério problema para as fontes geradoras, dada a dificuldade encontrada para uma destinação final ambientalmente adequada e com custos reduzidos. Neste sentido, as empresas de mineração têm buscado investir em estudos que apontem uma alternativa para a realização da logística reversa deste subproduto. Até então, a maioria das pesquisas desenvolvidas estava voltada para o emprego deste material na produção de agregados sintéticos, existindo um grande leque de opções que foram pouco exploradas. Desta forma, o objetivo deste trabalho é avaliar a possibilidade de utilização do resíduo proveniente do beneficiamento da bauxita para a produção de adição pozolânica para cimento Portland. Para tanto, o resíduo de bauxita foi testado em três diferentes condições de estudo (o resíduo in natura, e o que foi calcinado a temperaturas de 600 e 700 °C). Foram produzidos corpos de prova com composições de argamassa de cimento Portland com a substituição de 14% do cimento CPV pelo resíduo de bauxita, os quais foram submetidos aos ensaios de absorção por capilaridade, resistência à compressão e análise microestrutural (MEV). Os resultados indicaram que o resíduo calcinado apresenta propriedades pozolânicas que melhoram o desempenho mecânico das argamassas analisadas em até 26,31%.

Palavras-chave: Resíduo de bauxita; adição pozolânica; argamassa de cimento Portland.

1. INTRODUÇÃO:

Historicamente, o setor da construção civil tem contribuído consideravelmente para o desenvolvimento econômico dos países. Todavia, a expansão deste segmento traz consigo alguns problemas do ponto de vista da sustentabilidade, haja vista o grande consumo de matérias-primas naturais, bem como a geração de grandes volumes de resíduos sólidos, advindos das diversas etapas construtivas de uma obra.

Um dos insumos mais consumidos na construção civil é o cimento Portland, produto que serve de base para a execução de quase todos os processos construtivos de uma edificação, desde a fase de fundação até a fase de acabamento. Entretanto, a cadeia produtiva deste material também tem provocado impactos ambientais negativos devido, principalmente, à emissão de dióxido de carbono (CO₂) para a atmosfera, advindo da etapa de sinterização do clínquer (principal componente do cimento) [1].

Neste sentido, diversos estudos têm sido desenvolvidos com o intuito de apontar uma solução sustentável para a produção do cimento. Por conseguinte, as adições minerais têm se apresentado

como um produto com excelentes qualidades para este fim [2]. Dentre as opções disponíveis para a produção de adições minerais, estão os resíduos provenientes da indústria siderúrgica e de mineração. [3] afirma que empresas que atuam no setor do extrativismo mineral têm buscado investir em pesquisas que indiquem alternativas viáveis para o reaproveitamento dos subprodutos gerados em seus processos produtivos, de forma a propiciar maior eficiência ao sistema, bem como maior economia nos custos inerentes à destinação final dos subprodutos gerados.

Neste contexto, o resíduo proveniente do beneficiamento da bauxita tem sido apontado como um excelente material para ser empregado na produção do clínquer, dadas as suas características físico-químicas como o alto teor de ferro, que favorece as reações no estado sólido, de forma a obter um composto a temperaturas mais baixas, acelerando as reações de clinquerização, com a formação de aluminatos e silicatos de ferro e cálcio, o que melhora a qualidade do cimento e produz uma significativa economia no processo [4].

Segundo [5], 98% da produção de bauxita no Brasil é destinada às refinarias de alumina, enquanto o restante se dirige à indústria de produtos refratários e químicos. As maiores reservas desse minério, o equivalente a 95%, localizam-se no estado do Pará. Existem, espalhadas pelo planeta, 85 plantas de produção de alumina, com um rendimento em termos de geração de rejeito de bauxita de cerca de 1,2 t de resíduo/t de alumina produzida. Segundo [6], a geração anual de rejeito de bauxita equivale a 169 milhões de toneladas em todo o mundo, com cerca de 2,5 bilhões de toneladas armazenada. Desta forma, torna-se essencial que haja alternativas para a realização da logística reversa deste subproduto, haja vista que os custos para a construção de barragens para o seu armazenamento são muito onerosos para a empresa produtora, além do que, o armazenamento deste rejeito nestas estruturas pode representar um risco ambiental para as áreas de entorno.

Apesar de alguns autores já terem apontado que o resíduo de bauxita apresenta propriedades pozolânicas, após a calcinação em temperaturas de 600 °C [7, 8, 9]. Atualmente, a grande parte dos estudos desenvolvidos está direcionada para o emprego deste material na produção de agregados sintéticos, existindo poucas pesquisas que têm se dedicado a avaliar o uso deste material para a produção de adições pozolânicas, empregadas no cimento Portland. Portanto, o presente trabalho visa contribuir para preencher a lacuna existente neste campo de pesquisa. Desta forma, o objetivo deste trabalho é avaliar a possibilidade de utilização do resíduo proveniente do beneficiamento da bauxita para a produção de adição pozolânica para cimento Portland.

2. MATERIAIS E MÉTODOS:

2.1. Materiais:

2.1.1. Resíduo de bauxita:

O rejeito mineral utilizado nesta pesquisa é oriundo da exploração de bauxita da região Sudeste do estado do Pará, Brasil. A amostra foi retirada da barragem, que se localiza no Platô Miltônia em Paragominas, PA, Brasil. O rejeito é proveniente do beneficiamento da bauxita para a produção de alumina, processo denominado Bayer, cujas etapas se dividem em: preparação das matérias-primas, digestão, clarificação/filtração e precipitação do hidrato, calcinação e conversão da alumina.

Após a coleta do resíduo de bauxita, este material passou por diferentes processos de beneficiamento em laboratório, originando três situações de estudo, conforme Tab.1, o resíduo calcinado em duas diferentes temperaturas e o resíduo que foi submetido ao processo de moagem.

Tabela 1. Nomenclatura utilizada para o resíduo

Nomenclatura	Tipo de resíduo
In natura	Resíduo moído por 1 h
RLLB 600 °C	Resíduo calcinado a 600 °C
RLLB 700 °C	Resíduo calcinado a 700 °C

As temperaturas empregadas para a sinterização (600 e 700 °C), bem como o tempo de permanência na mufla (3 horas), foram escolhidas baseadas no trabalho de [10]. Já a moagem foi em [11]. Neste

sentido, o rejeito foi moído a seco em um moinho de bolas EMIC (305 mm de diâmetro e 305 mm de comprimento de 21 L), com velocidade de 12 rpm. A carga moedora foi composta por 5 kg de bolas (volume de ocupação das bolas de 5 L) para cada 1 kg de material, sendo dividida em 2/3 de bolas pequenas e 1/3 de bolas grandes, e o tempo de moagem foi de 1 h.

2.1.2. Cimento:

Nas matrizes cimentícias avaliadas foi utilizado o cimento CPV ARI Portland de alta resistência inicial, cuja composição apresenta maior quantidade de clínquer, o que possibilita a realização de análises mais precisas quanto ao comportamento do rejeito de bauxita como adição no cimento Portland. Para a determinação do índice de atividade pozolânica (IAP) do rejeito, foi utilizado o cimento Portland composto com filler, CPIIF, com classe de resistência 32, conforme prescrito pela [12]. A massa específica de ambos os cimentos foi determinada conforme específica a norma [13] e os resultados estão descritos na Tab.2.

Tabela 2. Massa específica para os cimentos CPV e CPIIF conforme [13]

Cimento	Massa específica(g/cm ³)
CPIIF32	3,06
CPV ARI	2,97

2.1.3. Areia normatizada:

A areia utilizada foi a descrita pela [14], a qual segundo a referida norma é um material natural, padronizado, constituído principalmente de grãos de quartzo arredondados a subarredondados, beneficiado e fornecido pelo Instituto de Pesquisa Tecnológicas do Estado de São Paulo, IPT, e que satisfaz as condições especificadas para parâmetros físico-químicos enumerados na Tab.3 e fração granulométrica listada na Tab.4.

Tabela 3. Requisitos físicos e químicos da areia utilizada [14]

Propriedade	Requisito	Método de ensaio	Amostra ou fração de controle
Teor de sílica	≥ 95%, em massa	ABNT NBR 13956-2 ou ABNT NBR 14656 ^a	Amostra composta
Granulometria	Ver Tab.4	ABNT NM 248	Por fração
Umidade	≤ 0,2%, em massa	ABNT NBR 7214	Amostra composta
Matéria orgânica	≤ 100 ppm	ABNT NBR NM 49 ^b	Amostra composta

^a O método gravimétrico estabelecido pela ABNT NBR 13756-2 deve ser considerado como de referência; ^b na realização do ensaio da areia normal, utilizar apenas 1 cm³ da solução-padrão de ácido tânico a 2%, em vez de 3 cm³, como previsto na ABNT NBR NM 49.

Tabela 4. Denominação das frações granulométricas [14] (% massa)

Denominação da fração	Material retido entre as peneiras de abertura nominal
16	2,4 mm e 1,2 mm
30	1,2 mm e 0,6 mm
50	0,6 mm e 0,3 mm
100	0,3 mm e 0,15 mm

2.1.4. Aditivo:

Para facilitar a obtenção da consistência desejada nas argamassas produzidas foi utilizado um aditivo superplastificante sintético (MC PowerFlow 3100) baseado em polímeros policarboxilatos, com

densidade de $1,08 \pm 0,02$ kg/L e pH de $5,0 \pm 1$, obedecendo à dosagem informada pelo fabricante de 0,3 a 2% sobre a massa do aglomerante.

2.2. Métodos:

Após o processo de beneficiamento em laboratório (calcinação e moagem), o rejeito foi submetido aos ensaios de granulometria a laser; massa específica, segundo a [13]; difração de raios X; fluorescência de raios X; índice de atividade pozolânica com cimento [12] e índice de atividade pozolânica com a cal [15].

Para o ensaio de granulometria a laser as amostras foram dispersas em água destilada e misturadas em um agitador mecânico, por 20 min. Após isso, parte dessa mistura foi separada e dispersa em um banho ultrassônico, e por fim, analisada em equipamento CILAS 1064 para determinação da composição granulométrica, com laser de 820 nm e intervalo de leitura de 0,04 a 500 μ m.

A caracterização mineralógica do rejeito foi obtida por difração de raios X (DRX), pelo método do pó. Foi utilizado difratômetro PANalytical X'Pert Pro MPD (PW 3040/60), com goniômetro θ/θ (PW3050/60) e com tubo de raios X cerâmico de anodo de Cu ($K_{\alpha 1} = 1,540598$ Å) (PW3373/00), foco fino longo, 2200 W, 60 kV e filtro K_{β} de Níquel. O detector utilizado foi do tipo RTMS, X'Celerator. A coleta dos difratogramas foi realizada com passo angular de $0,02^{\circ}$ e o tempo por passo 0.5 s, com intervalo de leitura de 0,5 a 2,5 Å. A aquisição dos dados foi feita com o software X'Pert Data Collector, versão 2.1a, e o tratamento dos dados com o software X'Pert HighScore versão 2.1b, também da PANalytical.

O ensaio de fluorescência de raios X foi executado com pastilhas prensadas, confeccionadas pela mistura e homogeneização na proporção de 3 g do aglutinante para 9 g de amostra previamente seca. Essas pastilhas foram prensadas com uma força de 15 t. As medidas de fluorescência de raios X (FRX) foram realizadas em um espectrômetro Rigaku ZSX Primus IV, equipado com tubo de Rh.

Após os ensaios de caracterização, foram elaboradas 3 diferentes composições de argamassa com rejeito de bauxita nas proporções de 1:3:0,48, com substituição de 14% do cimento Portland do tipo CPV por RB in natura; RLLB 600 °C e RLLB 700 °C, as quais tiveram seus resultados de desempenho comparados com os da argamassa de referência (produzida com cimento CPV). As nomenclaturas empregadas e os traços utilizados estão descritos na Tab.5. O intuito nesta fase foi indicar qual o melhor tipo de rejeito para ser utilizado em substituição a 14% do clínquer, para a produção de um cimento pozolânico.

Tabela 5. Nomenclaturas utilizadas para as argamassas

Nomenclatura	% tipo de cimento			% de resíduo	
	CPV	CPIIF32	RB in natura	RLLB 600 °C	RLLB 700 °C
ARG-REF	0	100	0	0	0
ARG-RBIN	84	0	14	0	0
ARG-RB600 °C	84	0	0	14	0
ARG-RB700 °C	84	0	0	0	14

Após a produção dos corpos de prova, correspondentes a cada uma das composições, foi executado o ensaio de resistência à compressão aos 7, 14 e 28 dias de cura, conforme a prescrição da [16]; absorção de água por capilaridade [17] e microscopia eletrônica de varredura (MEV), para verificação do desempenho físico-mecânico e microestrutural, respectivamente, das amostras analisadas. Para essa última análise foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura Tescan Vega 3 XMU, com emissor de hexaboreto de lantânio, e sistema duplo de microanálise de energia dispersiva de elétrons (EDS) Oxford.

Foram elaboradas 3 diferentes composições de argamassa com rejeito de bauxita nas proporções de 1:3:0,48, com substituição de 14% do cimento do Portland do tipo CPV por RB in natura, RLLB 600 °C e RLLB 700 °C. Os resultados de desempenho foram comparados com os da argamassa de referência (produzida com cimento CPV). Esse percentual de substituição é baseado no cimento tipo CP II-Z, conforme a norma NBR 16697:2018 que estabelece um percentual de 6 a 14% de teor de pozolana em relação à massa de cimento.

Após a produção dos corpos de prova, correspondentes a cada uma das composições, foi executado o ensaio de resistência à compressão aos 7, 14 e 28 dias de cura, conforme a prescrição da NBR 13279:2005, bem como ensaio de absorção de água por capilaridade segundo a NBR 9779:2012 e microscopia eletrônica de varredura.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO:

3.1. Fluorescência de raios X

A Tab.6 apresenta os resultados de FRX das amostras analisadas.

Tabela 6. Análise química das amostras por fluorescência de raios X

Amostras	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	TiO ₂
RB in natura	44,7	28,0	16,2	2,37
RLLB 600 °C	45,8	28,7	16,7	2,32
RLLB 700 °C	51,9	29,7	16,8	2,27

Ao analisar os valores apresentados na Tab.6, observa-se que o resíduo apresenta um considerável teor de alumina, sílica e óxido de ferro, o que está de acordo com a literatura existente sobre o assunto. Segundo [18], tais óxidos, em maior concentração, têm contribuição importante nas reações de estado sólido e favorecem a formação da fase vítrea e da mulita nos compostos cimentícios, tendo uma relação direta com a resistência mecânica das estruturas formadas.

Ademais, foi verificado que nas três amostras analisadas o valor do somatório dos teores de SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃ são maiores que 70%, atendendo, portanto, às especificações da [19] para que o material seja classificado como adição pozolânica da classe N. Observa-se que a concentração destes óxidos aumenta de forma proporcional ao aumento da temperatura de calcinação empregada, sendo que a amostra RLLB 700 °C foi a que apresentou o melhor desempenho, com um somatório de 98,4%. Tais resultados excedem o que foi obtido em trabalhos similares como o de [9], que encontraram um percentual de 73,11% nas amostras de resíduo de bauxita que foram analisadas.

3.2. Massa específica:

Na Tab.7 podem ser observados os resultados para a massa específica do cimento CPV e das amostras de resíduo de bauxita em suas três formas de estudo (RB in natura, RLLB 600 °C e RLLB 700 °C).

Tabela 7. Massa específica do cimento CPV e das amostras RB in natura, RLLB 600 °C e RLLB 700 °C

Amostras	Valor da massa específica (g/cm ³)
RB in natura	2,62
RLLB 600 °C	2,66
RLLB 700 °C	2,71
Cimento CPV	2,95

Em relação aos valores apresentados na Tab.7, constatou-se que ocorreu um pequeno aumento na massa específica do resíduo de bauxita que passou pelo processo de calcinação, de forma que quanto maior a temperatura empregada, mais elevada se tornou essa grandeza. Os números encontrados também não diferem muito do valor da massa específica do cimento de referência. Todos os resultados estão dentro da faixa especificada pela [13] para a massa específica dos cimentos comercializados no Brasil.

Ademais, ao comparar os resultados obtidos com trabalhos semelhantes, observa-se que estes estão dentro da faixa especificada por autores como [20], que observou um aumento na massa específica do resíduo do tratamento de água, diretamente proporcional à temperatura de calcinação empregada no material. Por outro lado, a amostra RB in natura, da presente pesquisa, obteve um resultado inferior ao encontrado por [9], que utilizou o resíduo também em sua forma in natura.

3.3. Granulometria a laser:

Os gráficos das Fig.1 ilustram a distribuição granulométrica do resíduo RB in natura, RLLB 600 °C e RLLB 700 °C, respectivamente. Para fins comparativos, os resultados foram agrupados a partir dos gráficos de frequência acumulada nos intervalos de diâmetro esférico equivalente (D.E.E.) de $0,04 \leq \phi \leq 0,1$, $0,1 \leq \phi \leq 1$, $1 \leq \phi \leq 10$, e $10 \leq \phi \leq 100$ μm . Com isso, observou-se que a amostra RLLB 700 °C foi a que apresentou o menor tamanho de partículas, por ter obtido maior concentração de partículas no intervalo de $10 \leq \phi \leq 100$ μm . Todavia, não houve uma grande discrepância de resultados em relação às demais amostras. Pelos valores obtidos, os resíduos calcinados podem ser considerados, segundo [10], como uma suspensão formada por partículas ultrafinas.

De acordo com a [19], para ser considerado pozzolânico é necessário que o material apresente um máximo de 34% de partículas retidas na peneira de malha 45 μm no ensaio de granulometria. Sendo assim, verifica-se que todas as amostras se enquadrariam no que preconiza a referida norma.

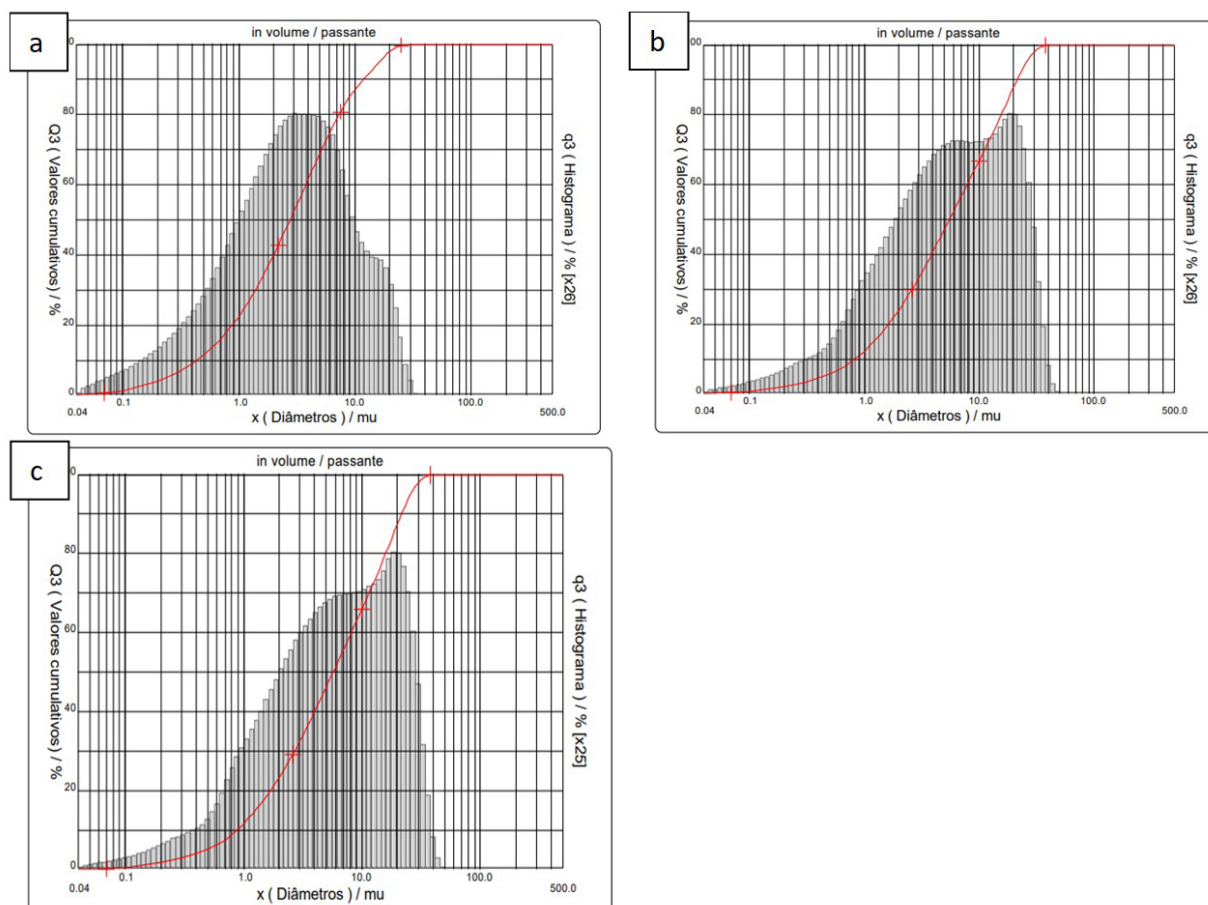


Figura 1. Distribuição granulométrica: (a) resíduo RB in natura; (b) resíduo RLLB 600 °C; e (c) resíduo RLLB 700 °C

3.4. Difração de raios X

A Fig.2 apresenta a análise mineralógica das amostras de resíduo de bauxita (RB in natura, RLLB 600 °C e RLLB 700 °C, respectivamente). No resíduo in natura (Fig.2(a)) foram detectados picos de zeólita, gibsitita, goethita, hematita, anatásio, quartzo e calcita. Estes resultados estão de acordo com o que foi verificado por [9] no resíduo de bauxita que foi calcinado a 600 °C, fato este que indica a presença de comportamento pozzolânico.

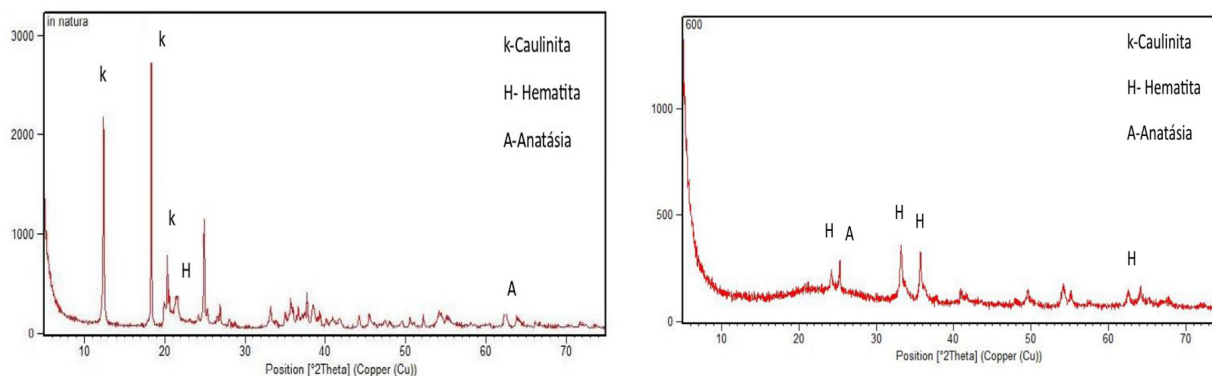


Figura 2. Difratoograma de raios X da amostra: (a) RB in natura; (b) RLLB 600 °C; e (c) RLLB 700 °C

De acordo com [20], o resíduo de bauxita, em seu estado in natura, é composto por uma mistura de minerais de hidróxido (gibbsite, boemita e diásporo), além de impurezas como (caulinita, hematita, goethita, quartzo e anatásio). Todavia, ao passar pelo processo de calcinação, a partir da temperatura de 500 °C, o resíduo passa a apresentar o fenômeno da desidroxilação, ocorrendo a alteração da coordenação do alumínio que dá lugar ao metacaulim. Neste sentido, percebe-se que os resultados aferidos para as amostras que foram calcinadas a 600 e 700 °C no presente trabalho estão de acordo com o que foi observado pelos referidos autores. A partir de 600 °C verifica-se que a caulinita desaparece, dando origem a uma fase amorfa, com a presença de hematita e anatásio de pouca intensidade.

3.5. Índice de atividade pozolânica com cimento e cal:

Os gráficos da Fig.3 apresentam os resultados do ensaio de atividade pozolânica com cimento e cal, respectivamente. No primeiro caso (Fig.3(a)), observa-se que houve um aumento progressivo na resistência à compressão das argamassas produzidas com resíduo de caulim calcinado. Ambas as amostras RLLB 600 °C e RLLB 700 °C alcançaram os 90% da resistência mecânica da argamassa de referência, conforme é especificado na [12]. Desta forma, constatou-se que quando o resíduo de bauxita calcinado a temperaturas de 600 e 700 °C apresenta propriedades de material pozolânico, sendo possível o seu uso como adição mineral para o cimento Portland. Por outro lado, o resíduo in natura, neste ensaio, não conseguiu atender ao critério especificado pela referida NBR para ser classificado como adição pozolânica.

Os resultados obtidos para o resíduo calcinado diferem do que foi encontrado por [9], cujo resultado da pesquisa indicou que a amostra calcinada a 600 °C obteve 85,98% de resistência mecânica em relação à argamassa de referência, não atendendo, portanto, ao critério estipulado pela [12] para ser considerado adição pozolânica.

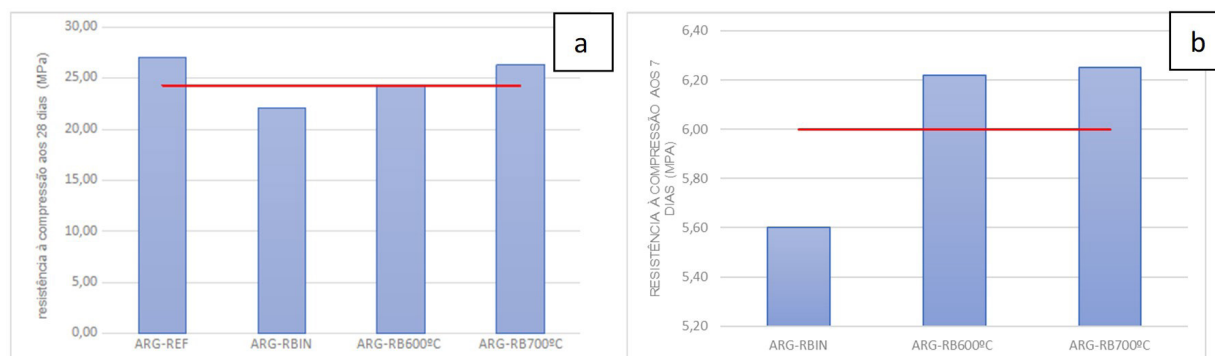


Figura 3. Índice de atividade pozolânica com: (a) cimento; (b) cal

Ao analisar os resultados apresentados na Fig.3(b) observa-se que as argamassas produzidas apresentaram o mesmo comportamento verificado no ensaio de atividade pozolânica com cimento (Fig.3(a)), onde as composições com uso de resíduo calcinado obtiveram melhor desempenho em relação à amostra que foi produzida com resíduo in natura. Neste caso, as argamassas RLLB 600 °C

e RLLB 700 °C alcançaram, aos sete dias de cura, os 6 MPa que são estipulados pela [15] para ser classificado como material pozolânico. Tais resultados estão de acordo com o que foi observado por [9], para o resíduo de bauxita que foi calcinado a 600 °C. Segundo [20], isso ocorre porque a metacaulinita presente no resíduo amorfo fica mais reativa com o aumento da temperatura de calcinação e influencia diretamente no índice de atividade pozolânica das argamassas avaliadas.

3.6. Resistência à compressão:

O gráfico da Fig.4 apresenta os resultados obtidos para resistência à compressão, ao longo do tempo, das argamassas analisadas nesta pesquisa. É possível observar que aos 7 dias de cura a argamassa de referência, composta por cimento CPV de alta resistência inicial, apresentou um melhor desempenho em comparação com as demais amostras. No entanto, no decorrer do tempo, houve uma evolução nos resultados das argamassas produzidas com resíduo calcinado, principalmente para a composição ARG-RB700 °C, que aos 28 dias superou o valor de resistência apresentado pela argamassa padrão, alcançando um valor de 24 MPa (o equivalente a 26,31%). Os resultados estão condizentes com todos os aspectos verificados na fase de caracterização do resíduo de bauxita, pelo qual se observou que o tratamento térmico empregado com temperatura de 700 °C faz com que o material apresente propriedades pozolânicas.

Os resultados de resistência à compressão das argamassas estão de acordo com o que já havia sido detectado por outros pesquisadores como [7] que obtiveram uma resistência de 87% da argamassa de referência, para o resíduo de bauxita ativado termicamente a 400 °C.

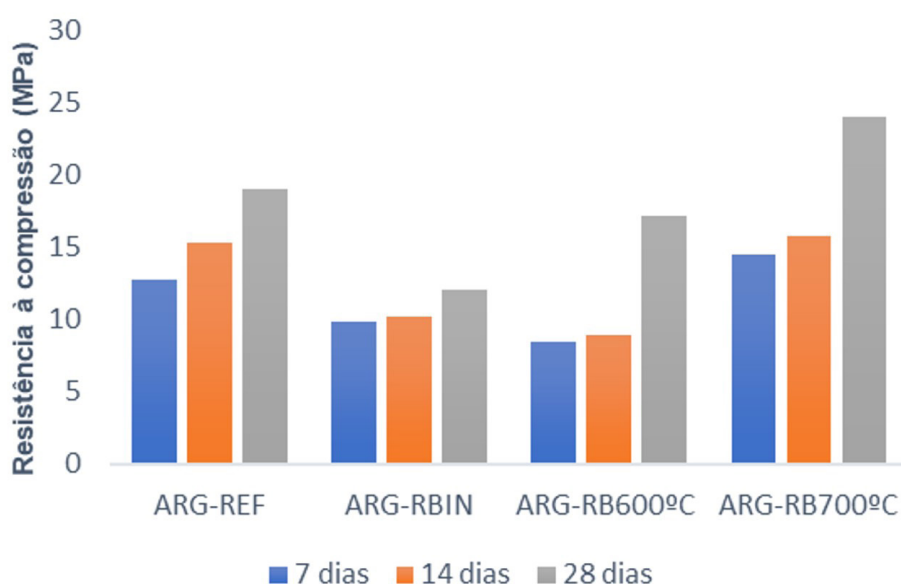


Figura 4. Evolução ao longo do tempo da resistência à compressão das argamassas produzidas

3.7. Absorção de água por capilaridade:

O gráfico da Fig.5 ilustra os resultados do ensaio de absorção por capilaridade realizado nas argamassas analisadas nesta pesquisa. É possível verificar que os resultados estão coerentes com o que foi observado no ensaio de resistência à compressão e corroboram para a explicação sobre o motivo pelo qual houve um aumento na resistência das argamassas com resíduo calcinado. Ao analisar o gráfico, constata-se que a composição ARG-RB 700 °C foi a que obteve o menor índice de permeabilidade, seguido pela argamassa de referência, ARG-R B600 °C e, por último, a ARG-RBIN.

Os resultados apresentados demonstram que o resíduo de bauxita, calcinado a 700 °C, é capaz de atuar no refinamento da estrutura dos poros de argamassa, devido à reação pozolânica do resíduo, reduzindo em até 38% a porosidade capilar do material. Esse efeito se reflete diretamente no aumento de resistência mecânica observado para esta composição de argamassa. Tais resultados são similares ao que foi apontado por [7].

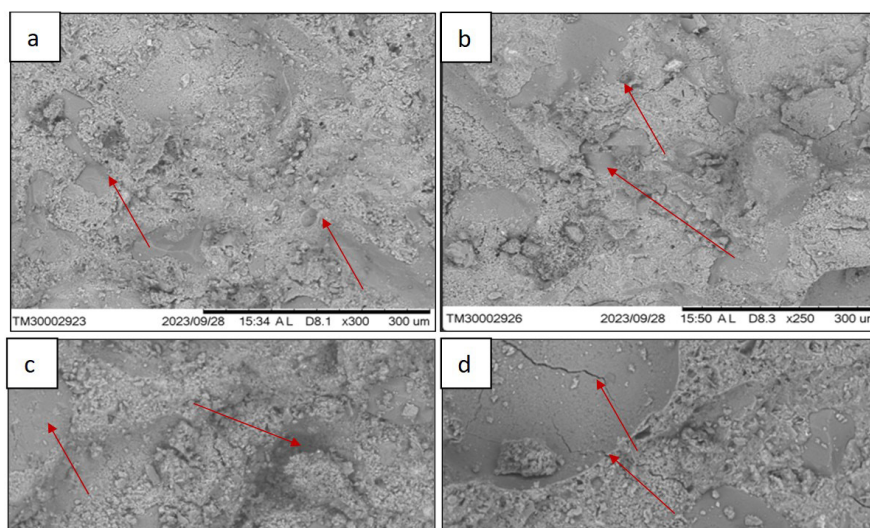


Figura 5. Evolução ao longo do tempo da absorção de água por capilaridade das argamassas produzidas

3.8. Microscopia eletrônica de varredura:

As imagens da Fig.6 ilustram a microestrutura das composições de argamassas analisadas neste trabalho. Observa-se que, nas misturas em que foi empregado o resíduo de bauxita calcinado a 600 °C e 700 °C (Fig.6(a) e Fig.6(b), respectivamente), houve uma diminuição do tamanho dos poros na estrutura, fato este que está de acordo com os resultados mecânicos observados anteriormente, haja vista que a ação pozolânica do resíduo permite uma menor permeabilidade da matriz cimentícia, o que é responsável por gerar um material com menor índice de absorção e maior resistência à compressão. Também é possível observar a formação de uma pequena fissura na microestrutura da argamassa de referência (Fig.6(d)), bem como um alto índice de vazios na amostra composta pelo resíduo de bauxita em sua forma in natura (Fig.6(c)), demonstrando que o processo de calcinação é essencial para que haja o refinamento dos grãos do material, proporcionando assim a ativação pozolânica do resíduo.

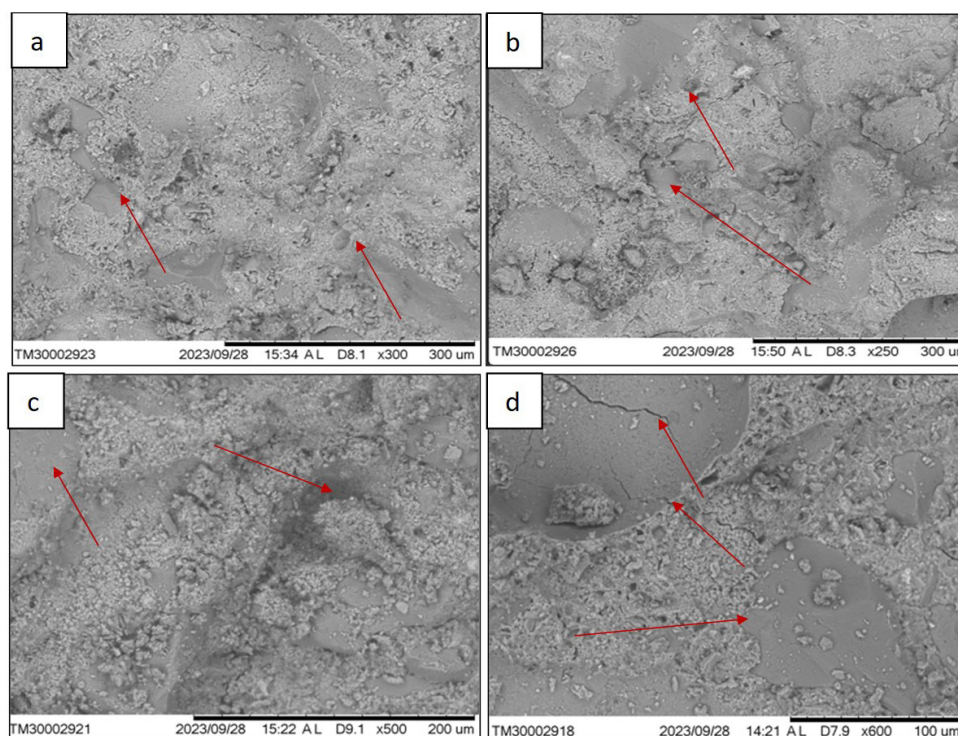


Figura 6. MEV das amostras de: (a) ARG-RB 600 °C; (b) ARG-RB 700 °C; (c) ARG-RBIN; e (d) ARG-REF

No trabalho desenvolvido por [21], o autor verificou que as imagens obtidas por meio de elétrons secundários das amostras de resíduo de bauxita apresentavam uma grande irregularidade na superfície das partículas, a ponto de inferir-se que se tratava de aglomerados de indivíduos menores, também observados nas laterais dos campos de imagens. No presente trabalho também foi verificado o mesmo fenômeno. Acredita-se que estas irregularidades sejam responsáveis por gerar maior área de contato para que haja um melhor processo de hidratação do cimento, gerando, portanto, uma matriz mais densa.

4. CONCLUSÃO:

O presente trabalho alcançou o objetivo principal a que se propôs, conseguindo indicar que o resíduo de bauxita, após passar por um processo de tratamento térmico, calcinação a 600 e 700 °C, é capaz de gerar um material que pode ser utilizado como adição pozolânica em argamassas de cimento Portland.

Verificou-se que a temperatura ótima para a sinterização do resíduo é a de 700 °C. Obedecendo a esse critério, é possível utilizar o resíduo de bauxita em um percentual de substituição do clínquer de até 14% para formar um cimento pozolânico que atende aos critérios estabelecidos pela [22].

Durante a etapa de caracterização do resíduo de bauxita, observou-se que este material (na forma in natura) é constituído por uma mistura de minerais de hidróxido (gibbsita, boemita e diásporo), além de impurezas como (caulinita, hematita, goethita, quartzo e anatásio). O processo de calcinação é essencial para que este material passe a apresentar uma fase amorfa, com propriedades pozolânicas. O uso do resíduo de bauxita permite a confecção de uma argamassa com menor índice de absorção por capilaridade e maior resistência à compressão, aos 28 dias de cura, fato este que foi corroborado pelos resultados verificados nas imagens microestruturais dos compósitos cimentícios.

Os resultados obtidos nesta pesquisa foram, em alguns aspectos, superiores aos verificados por outros autores que testaram o uso do resíduo de bauxita para matrizes cimentícias em trabalhos anteriores. A utilização deste material para aplicação em cimento (como adição pozolânica), além de possibilitar a redução da emissão de dióxido de carbono para atmosfera (decorrente da produção de clínquer), também possibilitaria uma alternativa economicamente mais vantajosa para a logística reversa deste subproduto. No entanto, apesar de os resultados verificados nesta pesquisa serem animadores, ainda existe um longo caminho de estudo para a verificação de outros parâmetros relacionados ao uso do resíduo de bauxita em misturas cimentícias, principalmente no que se refere aos aspectos de durabilidade do material. Por isso, recomenda-se que sejam realizados novos estudos nesta área, visando verificar os aspectos referentes a vida útil do material.

REFERÊNCIAS:

- [1] Silva L, Picanço M S, 2023. Análise investigativa sobre o uso de resíduo de caulim para a produção de compósitos cimentícios. *Revista Caribeña de Las Ciencias Sociales* 12, 3, 1397-1426.
- [2] Paumgarten M D V, 2020. Resíduos industriais da Amazônia como adição mineral para cimento Portland. Belém: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará.
- [3] Santos W M, 2011. Mineralogia e geoquímica da bauxita derivada do anortosito. Brasília: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade de Brasília.
- [4] Cunha Jr A J P, Costa D C L, Macêdo A N, 2022. Análise sistemática da literatura sobre o uso do rejeito de lama vermelha para a produção de agregados sintéticos leves. *Research, Society and Development* 11, 5.
- [5] IBRAM, 2021. Instituto Brasileiro de Mineração. <http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00002806.pdf>
- [6] Guo T, Yang H, Liu Q, Hannian G, Wang N, Yu W, Dai Y, 2018. Adsorptive removal of phosphate from aqueous solutions using different types of red mud. *Water Sci. Technol.* 570-577.
- [7] Fortes G M, Balbino T G F, Lourenço R R, Montini M, 2011. Avaliação do uso de resíduo de bauxita como aditivo pozolânico no cimento Portland. Porto de Galinhas: 55º Congresso Brasileiro de Cerâmica.
- [8] Romano R C O, Mesquita J A F S, Bernado H M, Niza D A, Maciel M H, Cincotto M A, Pillegi R G, 2021. Combined evaluation of oscillatory rheometry and isothermal calorimetry for the monitoring of hardening stage of Portland cement compositions blended with bauxite residue from Bayer process generated in different sites in Brazil. *Rev. Ibracon Estrut. Mater.* 14, 2, e14211.
- [9] Paumgarten M D V, Reis F J L, Picanço M S, Costa D S R, Santos A C M, 2021. Caracterização e avaliação do índice de atividade pozolânica de lama vermelha e resíduo de manganês para produção de misturas ternárias cimentícias. *Brazilian Journal of Development* 7, 8, 85965-85979.

-
- [10] Racanelli L A, 2019. Uso de lavagem de bauxita para a fabricação de ligantes geopoliméricos. Belém: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará.
- [11] Pouey M T F, 2006. Beneficiamento da cinza da casca de arroz residual com vistas à produção de cimento composto e/ou pozolânico. Porto Alegre: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- [12] NBR 5752, 2014. Materiais pozolânicos. Determinação da atividade pozolânica com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [13] NBR 16605, 2017. Cimento Portland e outros materiais em pó. Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [14] NBR 7214, 2015. Areia normal para ensaio de cimento. Especificação. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [15] NBR 5751, 2015. Materiais pozolânicos. Determinação da atividade pozolânica com cal aos 7 dias. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [16] NBR 13279, 2005. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos. Determinação da resistência à tração na flexão e a compressão. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [17] NBR 9779, 2012. Argamassa e concretos endurecidos. Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [18] Reis A W, 2014. Caracterização mineralógica do agregado obtido a partir da lama vermelha do processo Bayer. Belém: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará.
- [19] NBR 12653, 2014. Materiais pozolânicos. Requisitos. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [20] Martins W S, 2020. Cimento Portland como substituição parcial de cinzas do resíduo da estação de tratamento de água. Belém: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará.
- [21] Liberato C C, Pileggi R G, Romano R C O, Liberato C C, 2012. Efeito da calcinação do resíduo da bauxita nas características reológicas e no estado endurecido de suspensões com cimento Portland. *Ambiente Construído* 12, 4, 53-61.
- [22] NBR 16697, 2018. Cimento Portland. Requisitos. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.