

UFPA

PPGEC

Universidade Federal do Pará



Agostinho Alves de Oliveira Júnior

**Resíduo de bauxita da Amazônia como
material suplementar ao cimento
Portland para a produção de concreto
com agregado reciclado**

TESE DE DOUTORADO

Instituto de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Civil

Tese orientada pelo Professor Dr. Marcelo de Souza Picanço

Belém – Pará – Brasil

2021

Universidade Federal do Pará
Instituto de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil



Agostinho Alves de Oliveira Júnior

**Resíduo de bauxita da Amazônia como material
suplementar ao cimento Portland para a produção
de concreto com agregado reciclado**

Tese de Doutorado

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil
da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos para
obtenção do Título de Doutor.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço

Belém – Pará – Brasil

2021

Universidade Federal do Pará
Instituto de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil



Agostinho Alves de Oliveira Júnior

**Resíduo de bauxita da Amazônia como material
suplementar ao cimento Portland para a produção de
concreto com agregado reciclado**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da
Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos para obtenção do
Título de Doutor.

Prof. Dr. Marcelo de Souza Picanço

Orientador

PPGEC - UFPA

Prof. Dr. Alcebíades Negrão Macêdo

Examinador Interno

PPGEC – UFPA

Prof. Dr. Bernardo Borges Pompeu Neto

Examinador Interno

PPGEC – UFPA

Prof. Dr. Nilo Cesar Consoli

Examinador Externo

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Belém – Pará – Brasil

2021

À Deus, ser maravilhoso, e indispensável em minha vida, que me dá força e coragem para seguir em frente, e não desistir. À minha maravilhosa família, amada esposa Elizabete, sempre ao meu lado, independentemente de onde sopram os ventos, e aos meus amados filhos Fellipe e Gabriella, que fazem de mim um pai orgulhoso.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho não estaria devidamente concluído, se nele não estivesse expresso os meus mais sinceros agradecimentos, e enorme reconhecimento daqueles que, de alguma forma, colaboraram no transcorrer de sua elaboração.

Aos professores Dênio Raman Carvalho de Oliveira que me incentivou, conversou e mostrou o caminho para realização deste trabalho, Bernardo Borges Pompeu Neto e Alcebíades Negrão, pelo incentivo e apoio dado sempre que precisei somando com a minha formação acadêmica.

Ao professor Marcelo de Souza Picanço, meu orientador, pela (sempre) disponibilidade, apoio e inestimável contribuição para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao engenheiro Maurílio Gomes Pimentel que me apoiou no desenvolvimento dos ensaios deste trabalho, contribuindo de forma determinante para que esse objetivo fosse alcançado.

Aos técnicos do laboratório de Engenharia Civil da UFPa, pelo apoio indispensável durante toda a etapa de realização dos ensaios laboratoriais.

Minha gratidão ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil nas pessoas dos seus coordenadores durante período de realização do doutoramento, professores Dênio Ramam Carvalho de Oliveira, Marcelo de Souza Picanço e à secretária Sanny Ramos Mendes de Assis.

Agradecimento especial ao Instituto Federal do Amapá, que concedeu o afastamento das minhas atividades laborais, a fim me dedicar com exclusividade aos estudos e pesquisas, em busca desta formação.

A minha esposa Elizabete Santos de Oliveira pela compreensão, incentivo e companheirismo, sem os quais provavelmente a caminhada teria sido mais difícil.

Aos meus filhos Fellipe e Gabriella, e ao meu neto Arthur, anjos que Deus colocou em minha vida, por compreender e aceitar minha ausência.

RESUMO

De Oliveira Júnior, A. A. (2021) **Resíduo de bauxita da Amazônia como material suplementar ao cimento Portland para a produção de concreto com agregado reciclado**. Tese de Doutorado, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, Pará, Brasil, 2021.

O consumo de recursos naturais, e a conseqüente produção de resíduos gerados pela indústria vem aumentando substancialmente ao longo dos anos, ocasionando grandes problemas ambientais nos descartes desses materiais, além do esgotamento dos recursos naturais. Assim, as pesquisas avançam no sentido de encontrar destinação e uso desses resíduos. O agregado reciclado de concreto (ARC) já é aceito no mercado, devido a viabilidade de suas propriedades em relação ao agregado natural. Entretanto, a incorporação do resíduo de bauxita (RB), apresenta dificuldades em sua utilização in natura. Nesta pesquisa, o RB foi calcinado a 700°C visando melhorar sua reatividade, onde apresentou quantidades significativas de sílica e alumina amorfas, responsáveis por promover propriedades pozolônicas na matriz. O cimento Portland foi substituído parcialmente em 5%, 10% e 15% por RB em concretos com 0%, 50% e 100% de substituição de agregado graúdo natural por agregado graúdo reciclado do concreto (AGRC). Foram realizados ensaios de resistência à compressão, módulo de elasticidade, tração por compressão diametral, absorção de água capilar e total em amostras com idade de 28 dias, com o objetivo de investigar suas variações. Nas propriedades mecânicas, com o aumento do teor de RB nos concretos, a resistência à compressão reduziu. Verificou-se que na maior taxa de adição de RB (15%), os valores obtidos para a resistência à tração, e módulo foram conservados em relação ao concreto de referência. Os materiais sílico aluminosos presentes no RB reagiram com as reservas de hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) presentes no ARC, favorecendo a resistência do concreto. Resultados indicaram que a adição de RB calcinado, em substituição parcial ao cimento Portland, e o uso de ARC são métodos viáveis para produção de concretos.

Palavras-chave

Resíduo de bauxita; materiais de construção; agregado reciclado do concreto; propriedades mecânicas.

ABSTRACT

De Oliveira Júnior, A. A. (2021) Bauxite residue from the Amazon as a supplementary material to Portland cement for the production of concrete with recycled aggregate. Doctoral Thesis, Institute of Technology, Federal University of Pará, Belém, Pará, Brazil, 2021.

The consumption of natural resources, and the consequent production of waste generated by the industry, has increased substantially over the years, causing major environmental problems in the disposal of these materials, in addition to the depletion of natural resources. Thus, research is moving towards finding the destination and use of this waste. The recycled concrete aggregate (ARC) is already accepted in the market, due to the viability of its properties and in relation to the natural aggregate. However, the incorporation of RB presents difficulties in its use in natura. In this research, the RB was calcined at 700°C in order to improve its reactivity, where it presented significant amounts of amorphous silica and alumina, responsible for promoting pozzolanic properties in the matrix. Portland cement was partially replaced in 5%, 10% and 15% by RB in concrete with 0%, 50% and 100% substitution of natural coarse aggregate for recycled coarse concrete aggregate (AGRC). Tests of resistance to compression, modulus of elasticity, traction by diametrical compression, absorption of capillary and total water were carried out on samples aged 28 days, in order to investigate their variations. In the mechanical properties, with the increase of the content of RB in the concretes, the compressive strength reduced. It was found that at the highest rate of addition of RB (15%), the values obtained for the tensile strength, and modulus were conserved in relation to the reference concrete. The aluminous silica materials present in the RB reacted with the calcium hydroxide (Ca (OH) 2) reserves present in the ARC, favoring the strength of the concrete. Results indicated that the addition of calcined RB, in partial replacement to Portland cement, and the use of ARC are viable methods for concrete production.

Key words

Bauxite residue; Construction Materials; recycled concrete aggregate; mechanical properties.

“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê.”

(Arthur Schopenhauer)

Sumário

1 INTRODUÇÃO	1
1.1. OBJETIVOS	2
1.1.1 Objetivo geral	2
1.1.2 Objetivos específicos.....	3
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA GERAL.....	3
2.1 RESÍDUO DE BAUXITA DESTINADO A USOS INDUSTRIAIS.....	3
2.2 O RESÍDUO DE BAUXITA COMO UMA MATÉRIA PRIMA SUSTENTÁVEL PARA A PRODUÇÃO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL	4
2.3 CONCRETOS COM AGREGADO RECICLADO.....	5
2.3.1 Influência do agregado reciclado na trabalhabilidade dos concretos	7
2.3.2 Influência da condição de umidade dos agregados	8
2.3.3 Influência da qualidade dos agregados reciclados.....	10
2.3.4 A trabalhabilidade ao longo do tempo	10
2.3.5 A influência dos aditivos redutores de água.....	12
2.3.6 Efeitos das adições minerais.....	13
2.3.7 Características reológicas dos concretos com agregado reciclado	14
2.4 USO DE POZOLANAS EM CONCRETOS COM AGREGADO RECICLADO	15
3. ARTIGO 1: CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO DE BAUXITA VISANDO SEU USO NA CONSTRUÇÃO CIVIL	17
3.1 RESUMO.....	17
3.2 ABSTRACT	17
3.3 INTRODUÇÃO	18
3.4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	19
3.4.1 Beneficiamento do resíduo de bauxita	19
3.4.2 Caracterização	20
3.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	21

3.5.1 Massa específica.....	21
3.5.2 Difração de raios X.....	21
3.5.3 Fluorescência de raio-X.....	22
3.5.4 Granulometria.....	22
3.5.5 Método de BET	23
3.5.6 Discussão.....	24
3.5.6.1 O resíduo de bauxita como matéria prima sustentável na produção de materiais de construção civil	25
3.5.6.2 Resíduo de bauxita sendo destinado a produtos industriais ecologicamente corretos	26
3.6 CONCLUSÕES	27
3.7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	28
4 ARTIGO 2: AVALIAÇÃO DO USO DO RESÍDUO DA BAUXITA NA PRODUÇÃO DE CONCRETOS COM AGREGADO RECICLADO	32
4.1 RESUMO.....	32
4.2 ABSTRACT	33
4.3 INTRODUÇÃO	33
4.4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	34
4.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	40
4.5.1 Efeitos do resíduo de bauxita nas propriedades mecânicas dos concretos	41
4.5.2 Efeitos do resíduo de bauxita nas propriedades de durabilidade dos concretos.....	49
4.6. CONCLUSÕES	54
4.7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55
5 CONCLUSÕES GERAIS.....	61
6 SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS.....	62
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63
APÊNDICE I – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	72
APÊNDICE II – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO.....	75

APÊNDICE III – MÓDULO DE ELASTICIDADE.....	76
APÊNDICE IV – ABSORÇÃO TOTAL DE ÁGUA.....	77
APÊNDICE V – ÍNDICE DE VAZIOS	78
APÊNDICE VI – ANÁLISE ESTATÍSTICA	79
APENDICE VII – ARTIGO SUBMETIDO.....	89

Lista de Figuras

Figura 1 – Delineamento experimental: resumo dos procedimentos realizados para beneficiamento e caracterização da lama vermelha.	20
Figura 2 - Difractogramas da lama vermelha: o tratamento térmico da lama vermelha desestruturou sua composição mineralógica formando novas fases, em 1000°C apenas a hematita conservou-se, e houve o surgimento da nefelina.	22
Figura 3 – Análise granulométrica da lama vermelha: O aumento da temperatura de calcinação, surtiu no aumento da granulometria da lama vermelha, apesar de em todas as temperaturas terem apresentado uma distribuição bem contínua.	23
Figura 4 – Processamento do agregado reciclado (a), granulometria dos agregados (b) e morfologia do agregado reciclado (c).....	36
Figura 5 – Processamento (a), granulometria a laser (b) e análise mineralógica do resíduo de bauxita (c) por difração de raios X.....	37
Figura 6: Resposta à resistência à compressão para os concretos com 0% de substituição do agregado e com substituição do cimento por resíduo de bauxita para os teores do estudo. Anova de Kruskal-Wallis com comparação múltipla de Simes-Hochberg: $H = 37,143$; $p\text{-value} = 4,29.10^{-8}$	41
Figura 7: Resposta à resistência à compressão para os concretos com 50% de substituição do agregado gráudo natural pelo AGRC e com substituição do cimento por resíduo de bauxita para os teores do estudo. Anova de Kruskal-Wallis com comparação múltipla de Simes-Hochberg: $H = 31,101$; $p\text{-value} = 8,09.10^{-7}$	42
Figura 8: Resposta à resistência à compressão para os concretos com 100% de substituição do agregado gráudo natural pelo AGRC e com substituição do cimento por resíduo de bauxita para os teores do estudo. Anova de Kruskal-Wallis com comparação múltipla de Simes-Hochberg: $H = 29,460$; $p\text{-value} = 1,79.10^{-7}$	42
Figura 9: Resposta à resistência à compressão para os concretos sem substituição (a), com substituição de 5% (b), substituição de 10% (c) e substituição de 15% (d) do cimento por resíduo de bauxita e com substituição do agregado gráudo natural pelo AGRC para os teores do estudo.	43
Figura 10: Resposta a resistência à tração para os concretos com 0% de substituição do agregado e com substituição do cimento por resíduo de bauxita para os teores do estudo. Anova de uma via, complementada pelo teste de Tukey.	44
Figura 11: Resposta à resistência à tração para os concretos com 50% de substituição do agregado e com substituição do cimento por resíduo de bauxita para os teores do estudo. Anova de Kruskal-Wallis com comparação múltipla de Simes-Hochberg: $H = 11,977$; $P\text{-value} = 0,007$	45

Figura 12: Resposta a resistência à tração para os concretos com 100% de substituição do agregado e com substituição do cimento por resíduo de bauxita para os teores do estudo. Anova de uma via, complementada pelo teste de Tukey.	45
Figura 13: Resposta à resistência à tração para os concretos sem substituição (a), com substituição de 5% (b), substituição de 10% (c) e substituição de 15% (d) do cimento por resíduo de bauxita e com substituição do agregado graúdo natural pelo AGRC para os teores do estudo.....	46
Figura 14: Resposta ao módulo de elasticidade para os concretos com 0% de substituição do agregado e com substituição do cimento por resíduo de bauxita para os teores do estudo. Anova de Kruskal-Wallis com comparação múltipla de Simes-Hochberg: $H = 0,727$; $p\text{-value} = 0,841$	47
Figura 15: Resposta ao módulo de elasticidade para os concretos com 50% de substituição do agregado e com substituição do cimento por resíduo de bauxita para os teores de estudo. Por causa das variâncias homogêneas encontradas no teste de homocedasticidade, utilizou-se a análise Anova de uma via, complementada pelo teste de Tukey.....	47
Figura 16: Resposta ao módulo de elasticidade para os concretos com 100% de substituição do agregado e com substituição do cimento por resíduo de bauxita para os teores de estudo. Por causa das variâncias homogêneas encontradas no teste de homocedasticidade, utilizou-se a análise Anova de uma via, complementada pelo teste de Tukey.....	48
Figura 17: Resposta ao módulo de elasticidade para os concretos sem substituição (a), com substituição de 5% (b), substituição de 10% (c) e substituição de 15% (d) do cimento por resíduo de bauxita e com substituição do agregado graúdo natural pelo AGRC para os teores do estudo.	49
Figura 18 – Resposta na absorção de água por imersão em concretos substituição de cimento por resíduo de bauxita. Valores apresentados são a média e o desvio padrão. O teste de homocedastidade mostrou que as variâncias são homogêneas, por conta disso, utilizou-se a análise múltipla de Tukey aceitando a hipótese nula (H_0) e rejeitando a hipótese alternativa (H_1).	50
Figura 19 – Resposta na absorção de água por imersão em concretos com substituição de agregado graúdo por ARC. Valores apresentados são a média e o desvio padrão. O teste de homocedastidade mostrou que as variâncias são homogêneas, por conta disso, utilizou-se a análise múltipla de Tukey aceitando a hipótese nula (H_0) e rejeitando a hipótese alternativa (H_1)......	50
Figura 20 – Efeitos da substituição de cimento por RB na AAI em concretos com 50% e 100% de substituição de agregado graúdo por AGRC. Os valores mostrados são as médias e o desvio padrão. As vogais representam os agrupamentos das amostras. O teste de homocedastidade mostrou que as variâncias são homogêneas, por conta disso, utilizou-se a análise múltipla de Tukey rejeitando a hipótese nula (H_0) e rejeitando a hipótese alternativa (H_1). 51	51
Figura 21 – Efeitos da substituição de agregado graúdo por AGRC nos concretos com 5% e 15% de substituição de cimento por RB. Os valores mostrados são as médias e o desvio padrão. O teste de homocedastidade mostrou que as	

variâncias são homogêneas, por conta disso, utilizou-se a análise múltipla de Tukey rejeitando a hipótese nula (H_0) e rejeitando a hipótese alternativa (H_1). 51

Figura 22 – Resposta na absorção de água por capilaridade em concretos substituição de cimento por resíduo de bauxita. Valores apresentados são a média e o desvio padrão dos pontos medidos. Em destaque está a absorção inicial (5 mim – 6 h). 52

Figura 23 – Resposta na absorção de água por capilaridade em concretos com substituição de agregado graúdo por ARC. Valores apresentados são a média e o desvio padrão dos pontos medidos. Em destaque está a absorção inicial (5 mim – 6 h). 53

Figura 24 – Resposta na absorção de água por capilaridade em concretos 50% de ARC e com aumento no teor de resíduo de bauxita. Valores apresentados são a média e o desvio padrão dos pontos medidos. Em destaque está a absorção inicial (5 mim – 6 h)..... 53

Figura 25 – Resposta na absorção de água por capilaridade em concretos 100% de ARC e com aumento no teor de resíduo de bauxita. Valores apresentados são a média e o desvio padrão dos pontos medidos. Em destaque está a absorção inicial (5 mim – 6 h)..... 54

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Massas específicas da lama vermelha: a calcinação da lama vermelha provocou aumento na massa específica de acordo com o aumento de temperatura.	21
Tabela 2 – Fluorescência da lama vermelha in natura e calcinada nas temperaturas de 600°C, 800°C e 1000°C: é perceptível que os compostos químicos predominantes no material analisado são a sílica, a alumina e a hematita e que a quantidade de cada composto não varia de forma significativa, somente a porcentagem de perda ao fogo (PF).....	22
Tabela 3 – Áreas superficiais da lama vermelha in natura e calcinada: com o aumento de temperatura o material sofreu uma diminuição na área superficial específica.	23
Tabela 4 – Caracterização química do resíduo de bauxita e do cimento Portland.	38
Tabela 5 – Consumo dos materiais em Kg/m ³	38

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o concreto tornou-se um dos materiais de construção civil mais consumidos no mundo, devido principalmente às suas características mecânicas, disponibilidade e durabilidade. Com o desenvolvimento industrial acelerado, aliado ao crescimento populacional contínuo, uma grande quantidade de estruturas progressivamente mais complexas utiliza cada vez mais concreto, as quais consomem grandes parcelas dos recursos naturais, com a produção global saltando de 21 bilhões de toneladas em 2007 para 40 bilhões de toneladas em 2014 (TAM, SOOMRO E EVANGELISTA, 2018). Concomitantemente, há um grande acúmulo de resíduos de construção em função da demolição de edificações comprometidas e desastres naturais, responsáveis por mais de 60% do total de resíduos em países como o Reino Unido (PAINE; DHIR, 2010). Diante desse cenário, o agregado reciclado do concreto apresenta-se como uma solução em potencial para não apenas diminuir a demanda por agregados naturais, como também reduzir os impactos ambientais relacionados ao descarte desses resíduos (SILVA; BRITO; DHIR, 2014).

Os resultados de estudos feitos em amostras de concreto produzidas com agregado reciclado de concreto apresentam menores valores de propriedades mecânicas, densidade e trabalhabilidade conforme a taxa de adição do agregado reciclado de concreto aumenta, em relação ao concreto tradicional (SANTOS; SILVA; BRITO, 2019), as quais estão diretamente relacionadas à presença de dois tipos de zonas de transição nesse material, uma entre a o agregado reciclado e a nova argamassa e a outra entre o agregado reciclado e a argamassa aderida à sua superfície (DIMITRIOU; SAVVA; PETROU, 2018). Ademais, os concretos produzidos com esse tipo de agregado reciclado são considerados porosos, com valores de permeabilidade muito mais altos do que em concretos comuns (GÓMEZ-SOBERÓN, 2002). No entanto, em decorrência da argamassa aderida em sua superfície, proveniente do concreto de origem, o agregado reciclado pode apresentar uma fonte adicional de reservas de Ca(OH)_2 que, ao reagir com materiais silico-aluminosos, pode ser capaz de gerar produtos de hidratação como o C-S-H e C-A-S-H, responsáveis por aumentar a força, durabilidade e outras propriedades do concreto (SHAIKH, 2017).

Acredita-se que uma fonte de SiO_2 e Al_2O_3 possa contribuir para a reação pozolânica com o Ca(OH)_2 na matriz cimentícia (MALHOTRA; MEHTA, 2002). Um potencial material com essas características é o resíduo insolúvel do minério da bauxita, conhecido como resíduo de bauxita. Hoje, em todo o planeta, existe um estoque calculado em três bilhões de toneladas de rejeitos de bauxita. A produção anual de rejeito de bauxita é estimada em 150 milhões de toneladas, e somente 3% desse volume são reaproveitados. Anualmente, cerca de 1 a 1,6 toneladas de resíduo de bauxita são produzidos por tonelada de alumina extraída (DÍAZ et al., 2015). Esse resíduo é formado, principalmente, por seis óxidos principais: Al_2O_3 , Fe_2O_3 , Na_2O , SiO_2 , com menores quantidades de CaO e TiO_2 (RIBEIRO; LABRINCHA; MORELLI, 2011). Apesar dos avanços e revisões sobre as aplicações desse material na construção civil (PONTIKES; ANGELOPOULOS, 2013), há pouco avanço para o emprego desse material em proporção industrial e comercial. Esse fato pode ser associado ao uso do resíduo de bauxita em seu estado natural, sem passar por nenhum beneficiamento térmico onde seus minerais de aluminossilicatos tornam-se menos cristalinos, o que prejudica sua reatividade (LIU et al., 2011).

Assim, o presente trabalho tem como objetivo analisar os efeitos da substituição parcial do resíduo de bauxita por cimento Portland nas propriedades mecânicas de e de durabilidade de concretos produzidos com agregados graúdos reciclados investigando suas variações em diferentes idades. O resíduo de bauxita utilizada no estudo foi calcinada a uma temperatura de 700°C , para o aumento de sua reatividade com o hidróxido de cálcio no processo de hidratação do cimento Portland. Para identificar o comportamento macroestrutural das amostras, foram realizados os ensaios de resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade estático.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Produção de concreto com agregado graúdo reciclado de concreto em substituição do agregado graúdo natural com utilização do resíduo de bauxita como adição mineral no cimento Portland.

1.1.2 Objetivos específicos

- Caracterização do resíduo da bauxita tratado termicamente em diferentes temperaturas
- Avaliação dos efeitos do uso de resíduo de bauxita na produção de concretos com agregado reciclado nas respostas de propriedades mecânicas e de durabilidade

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA GERAL

2.1 RESÍDUO DE BAUXITA DESTINADO A USOS INDUSTRIAIS

O resíduo de bauxita apresenta também aplicação promissora como adsorvente de baixo custo no tratamento de água, para remover metais pesados, ânions inorgânicos, íons metaloides, compostos orgânicos e bactérias (LIU; NAIDU; MING, 2011). Isso pode ser realizado após um tratamento térmico ou químico específico no material (LIU; YANG; XIAO, 2009). Para remoção de boro de uma solução aquosa, por exemplo, é necessário neutralizar o resíduo de bauxita para que se obtenha um melhor aproveitamento e isso pode ser feito a partir de um tratamento com água do mar que vai reduzir a alcalinidade do material sem diminuir a capacidade de adsorção (LIU; NAIDU; MING, 2011). Esse material pode ser neutralizado também a partir de um ácido, como HCL, H₂SO₄, que pode aumentar a área superficial e o volume de poros, favorecendo a adsorção (WANG; ANG; TADÉ, 2008).

Além disso, o uso de metais nobres e óxidos metálicos é popular como catalisador para aplicações na indústria, mas eles possuem alto preço e baixa estabilidade. Sendo assim, o resíduo de bauxita é uma alternativa mais barata para esse uso, por conter grandes porcentagens de Fe e Al (SUSHIL; BATRA, 2008). Para isso é necessário que ela passe por um tratamento, de forma a ativar as características requeridas, como por exemplo uma ativação por meio da calcinação ou tratada com HCl, afim de melhorar as características texturais (SHIM et al., 2018).

Outra possibilidade de uso do resíduo de bauxita é como absorção e purificação de gases residuais ácidos, como o SO₂. O resíduo da bauxita pode ser aplicado como um dessulfurante devido a sua alta capacidade alcalina. Os resíduos

resultantes desse processo podem ser reutilizados como matéria prima para produção de cimento (LIU; YANG; XIAO, 2009).

Podem ser produzidos também corantes inorgânicos a partir do resíduo de bauxita após a calcinação em altas temperaturas, os materiais obtidos apresentam novas estruturas cristalinas e quando adicionados a esmaltes cerâmicos como aditivos produzem esmaltes com cores estáveis e de alta intensidade (CARNEIRO et al., 2018a). O uso do resíduo de bauxita como pigmento é aceitável se ela traz vantagens de desempenho, além das vantagens ambientais e econômicas. De acordo com Carneiro et al., (2018b) a adição de 3% em peso desse material calcinado tem um melhor desempenho do que a *in natura* seca, e é um agente corante mais estável do que a hematita comercial.

2.2 O RESÍDUO DE BAUXITA COMO UMA MATÉRIA PRIMA SUSTENTÁVEL PARA A PRODUÇÃO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL

O resíduo de bauxita é um material caracterizado por ter uma composição complexa que vai depender da origem da bauxita proveniente e não há na literatura muitos relatos recentes acerca de caracterizações como a realizada neste trabalho. Foi possível identificar, com os resultados obtidos, mudanças na composição química deste material a partir das diferentes temperaturas de calcinação, no entanto a mudança mais significativa não foi com relação aos compostos e sim a perda ao fogo, onde houve uma grande variação. Ademais, verificamos mudanças nas propriedades físicas e também na mineralogia do material, visto que ocorre a decomposição de alguns minerais e o surgimento de fases mais resistentes.

Como visto nos resultados com relação aos compostos químicos presentes no resíduo de bauxita analisado, a sílica (SiO_2), a alumina (Al_2O_3) e o óxido de ferro (Fe_2O_3) são os principais componentes, além de ter uma importante porcentagem de óxido de sódio (Na_2O) e de dióxido de titânio (TiO_2). A sílica presente é um composto que, promove melhora nas respostas mecânicas das pastas após o endurecimento, devido à nucleação heterogênea acelerada, ao melhor empacotamento das misturas e à maior reatividade das partículas por serem finas (FLORES et al., 2017).

Assim como a sílica, a alumina também aumenta a resistência a compressão de pastas de cimento Portland devido sua capacidade de refinar os poros da mistura, além disso, acelera a hidratação e diminui a trabalhabilidade (GOWDA et al., 2017). Ela também melhora as propriedades refratárias em concretos, tem alto ponto de fusão e possui boas propriedades mecânicas, se tornando adequada para aplicações em altas temperaturas (KUMAR et al., 2014).

Já o dióxido de titânio acelera a formação do gel C-S-H e melhora a microestrutura do concreto levando à melhora na durabilidade e aumento de resistência (JALAL; FATHI; FARZAD, 2013). No entanto, esse composto não atua como material pozolânico, por isso não aumenta o consumo de cal livre (ESSAWY; ABD, 2014). Além disso, o anatásio (TiO₂) é muito utilizado como catalisador, pigmento e em materiais eletrônicos, mas essas aplicações requerem titânica de alta pureza para isso é necessário controlar o tamanho, a morfologia e a textura das partículas do cristal (HSIANG; LIN, 2006).

Já devido às propriedades físicas desse resíduo de bauxita estudada após a calcinação - como redução da porosidade, aumento da granulometria e redução da área superficial - é necessário menos ligante para produzir um cimento geopolimérico de alta resistência a compressão (DIETEL et al., 2017). O cimento geopolimérico é uma alternativa inovadora ao cimento Portland convencional e ele se baseia em materiais naturais ou subprodutos industriais, como o resíduo de bauxita, com o objetivo de reduzir a pegada de carbono. A produção desse cimento é a partir da junção entre um material aluminossilicato – como o resíduo de bauxita -, um reagente alcalino de fácil utilização e água. Esse tipo de cimento cura mais rapidamente, alcança a maior parte da resistência em 24 horas, forma uma ligação forte com todos os tipos de agregados à base de rochas e tem boa resistência ao fogo (DAVIDOVITS, 2015). Além disso, o consumo de energia de fabricação é baixo e tem baixo teor de emissão de CO₂ (ESSAIDI et al., 2013).

2.3 CONCRETOS COM AGREGADO RECICLADO

Uma das abordagens mais capazes de garantir maior sustentabilidade na construção, demolição e nas reformas de estruturas é diminuir os impactos associados aos materiais utilizados. A reciclagem de materiais de construção não é a solução ideal em um contexto de maior sustentabilidade, pois é preferível

implementar estratégias específicas que possam reduzir o uso de matérias-primas e impedir a produção de resíduos. Isso pode ser alcançado aumentando a vida útil das edificações, o que impediria sua degradação bem como o consumo de novos materiais e, conseqüentemente, a produção de resíduos de construção e demolição (RCD). No entanto, na prática atual, existem vários fatores que limitam o emprego dessas abordagens, tornando a reciclagem de RCD na forma de agregado reciclado como uma alternativa para sanar esse problema.

A normatização para implementar esses agregados na indústria da construção cada vez mais vem ganhando força, como por exemplo: até 2020, um mínimo de 70% em massa de todos os RCD's não perigosos e não naturais deverão estar preparados para reutilização de acordo com a Diretiva 2008/98/EC na comunidade europeia. Um dos primeiros passos para conseguir isso é institucionalizar a prática de demolição seletiva, na qual se torna bastante fácil segregar todos os componentes e lidar com cada um separadamente.

No entanto, apesar da extensa pesquisa e experiência positiva no uso do agregado reciclado (BRITO; SILVA, 2015; SILVA; BRITO, 2014; SILVA; BRITO; DHIR, 2014), ainda existem várias barreiras para o seu maior uso na produção de novos materiais de construção, incluindo: a confiabilidade dos envolvidos na indústria da construção; a inexistência de sistemas de recuperação adequados, com controle de alta qualidade do processamento e revenda a preços acessíveis; falta de padrões e especificações que possam permitir uma melhor compreensão dos efeitos do uso de tais materiais no desempenho do concreto (BRITO; SILVA, 2016; SILVA; BRITO; DHIR, 2017).

A importância de processar RCD para gerar agregado reciclado e usá-los em novos materiais de construção é inevitável, em vista dos recentes esforços para reduzir ainda mais a pegada ambiental de vários produtos na indústria da construção, os esforços foram concentrados no concreto, devido à sua considerável contribuição no total das emissões de CO₂. De fato, muitos estudos foram publicados nas últimas quatro décadas, alegando a viabilidade do uso do agregado reciclado como substituição parcial do agregado natural na produção de concreto. No entanto, apesar dos achados positivos amplamente observados,

a maioria das pesquisas se concentrou nos desempenhos mecânicos e relacionados à durabilidade, com menos ênfase dada às novas propriedades do concreto com agregado reciclado de concreto. Grande parte dos estudos que fazem uso do agregado reciclado de concreto foram realizados sem levar em consideração a importância da condição de umidade do agregado reciclado, que deve resultar em misturas com níveis aceitáveis de trabalhabilidade ao longo do tempo. Além disso, a relação água/cimento efetiva afeta consideravelmente as propriedades no estado fresco e endurecido desses concretos. Vários estudos foram realizados fazendo avaliações comparativas no nível do material, em que o projeto de mistura do agregado reciclado de concreto foi feito substituindo diretamente o agregado natural por agregado de concreto com base em sua massa específica, e não em seu volume, influenciando na proporção de agregado/cimento das misturas.

2.3.1 Influência do agregado reciclado na trabalhabilidade dos concretos

A trabalhabilidade do concreto pode ser resumida como a quantidade interna de trabalho necessária para alcançar a compactação máxima do material (NEVILLE; BROOKS, 2010). Para caracterizar o comportamento desse trabalho interno e a aparência da nova mistura, métodos qualitativos (por exemplo, dureza, coesão, rigidez e compactação), quantitativos empíricos (por exemplo, *slump test*) ou quantitativos fundamentais (por exemplo, viscosidade, fluidez, valor de rendimento) são usados (NEWMAN; CHOO, 2003). Os métodos quantitativos empíricos fornecem uma única medida e, portanto, são referidos como testes de um parâmetro ou ponto único. Os métodos de *slump test*, que pertencem a essa categoria, é o método mais amplamente utilizado para caracterizar a trabalhabilidade do concreto com agregado reciclado. A abordagem mais adequada para quantificar e avaliar efetivamente a trabalhabilidade do concreto é com a aplicação de testes de dois parâmetros ou de dois pontos, que fornecem propriedades fundamentais para o estudo da reologia do concreto (ou seja, tensão de escoamento e viscosidade no estado plástico) (NEWMAN; CHOO, 2003)

2.3.2 Influência da condição de umidade dos agregados

Nealen e Rühl, 1997, e Nealen e Schenk, 1998 estudaram a influência do estado de umidade do agregado reciclado proveniente de resíduos de construção e demolição (RCD) na consistência do ARC. O AR já havia sido submetido a um processo de saturação no qual várias porções de sua capacidade total de absorção tinha sido compensada. Com a porcentagem decrescente de seu conteúdo de umidade, o concreto com agregado reciclado no estado fresco exibiu progressivamente níveis mais baixos de trabalhabilidade. Além disso, durante os primeiros 30 minutos, houve uma maior perda na taxa de abatimento realizada por *slump test* nas misturas com agregado reciclado seco, porque estes absorveram rapidamente parte da água da mistura. No entanto, misturas com agregado reciclado no estado saturado superfície seca mostraram níveis comparáveis na taxa de queda com as amostras de concretos com agregado natural que foram usadas como concreto de referência, tanto inicialmente quanto com o tempo. Nessas circunstâncias, também foi concluído que pequenas diferenças entre as misturas de concreto com agregado reciclado e concreto com agregado natural ocorreriam como resultado da variação na distribuição do tamanho das partículas, índice de forma ou rugosidade do agregado reciclado em comparação com o agregado natural, esses fenômenos também foram observados por Manzi; Mazzotti; Bignozzi, 2013.

Poon et al. 2014 realizaram uma análise abrangente sobre o efeito da incorporação de agregado reciclado de concreto em diferentes estados de umidade no desempenho do concreto. O agregado reciclado de concreto foi incorporado nos estados seco em estufa a 100°C, seco ao ar (25°C) e saturado superfície seca. Todas as misturas foram projetadas para que a relação água/cimento efetiva fosse equivalente. As misturas com 100% de agregado reciclado de concreto seco em estufa apresentaram os maiores níveis iniciais de *slump test*. Isso pode ser explicado pela compensação da água durante o procedimento de mistura, que resultou em uma maior relação água/cimento efetiva no momento do ensaio de *slump test*, uma vez que não havia sido dado tempo suficiente ao agregado reciclado de concreto para absorver a água, essa tendência foi observada por outros autores Pope et al., 2014. Após cerca de 15 a 30 minutos, todas as misturas, independentemente do nível de reposição,

apresentaram níveis comparáveis de trabalhabilidade, sugerindo que a água de compensação havia sido absorvida principalmente, resultando em misturas com proporções a/c efetivas semelhantes. Observando o comportamento mecânico do concreto com agregado reciclado de concreto e do ponto de vista prático da aplicação, é preferível usar o ARC com sua umidade natural. O agregado reciclado não apenas será usado sem a aplicação de um processo de secagem ou pré-saturação, o que seria impraticável do ponto de vista industrial, mas provavelmente resultaria em desempenho aprimorado.

Ferreira et al. 2011 estudaram a influência de submeter o agregado graúdo reciclado de concreto em um método de pré-saturação comparado com um método de compensação de água e como resposta, avaliar o desempenho dos concretos. No primeiro método, os ARC foram imersos em água por 24h, após esse período foram expostos ao ar para secagem até chegar no estado saturado superfície seca. O método de compensação de água consistiu em adicionar uma quantidade de água correspondente à absorvida pela ARC durante o processo de mistura. Os autores avaliaram a absorção de água do agregado graúdo reciclado de concreto ao longo do tempo e determinaram que cerca de 90% de sua capacidade de absorção total ocorria em apenas 5 minutos. Embora ambos os métodos tenham sido eficazes na produção de misturas com níveis equivalentes de trabalhabilidade (*slump test*), o concreto com agregado reciclado compensado por água mostrou valores mais consistentes. Além disso, esse método também levou à produção de amostras que exibiam um desempenho mecânico ligeiramente melhorado.

Beltrán et al. 2014 realizaram um estudo com uma perspectiva diferente, em que o delineamento experimental das misturas foi ajustado em termos da quantidade necessária de cimento extra nas misturas de concreto com agregado reciclado com o aumento do conteúdo de agregado graúdo reciclado de concreto, a fim de obter níveis de *slump* equivalentes, tendo como resposta a resistência à compressão. Para misturas de concreto com relação a/c efetiva similares, foi observado um aumento linear no teor de cimento; misturas com 100% de agregado reciclado de concreto exigiam cerca de 12% a mais de cimento para obter trabalhabilidade e resistência à compressão equivalentes. No entanto, embora o uso de cimento extra possa compensar parte da perda no desempenho

e nas propriedades no estado fresco bem como no comportamento mecânico, é uma abordagem menos econômica e ecológica, pois eles teriam mais energia incorporada no processo.

2.3.3 Influência da qualidade dos agregados reciclados

A qualidade do agregado reciclado é um conceito um tanto subjetivo, que pode envolver vários fatores diferentes relacionados às suas propriedades físicas, comportamento mecânico, características morfológicas e composição química. No entanto, o fator considerado mais influente nas propriedades do concreto com agregado reciclado é sua porosidade que é significativamente maior em comparação com a do agregado natural, em que fortes correlações foram observadas entre a absorção de água e a densidade do agregado reciclado e as propriedades do concreto no estado endurecido (SILVA; BRITO; DHIR, 2014; SILVA; BRITO; DHIR, 2015; SILVA et al., 2015).

Müller investigou o uso de dois tipos de agregado reciclado nas propriedades do concreto. A fração grossa de agregado natural foi completamente substituída por agregado reciclado de concreto ou agregado reciclado de argamassa, que havia sido previamente submetida a um processo de pré-saturação por 10 min. A porção de água absorvida durante esse período correspondeu a cerca de 90% e 80% da absorção de água em 24 horas do agregado reciclado de concreto e agregado reciclado de argamassa, respectivamente. Ambos os concretos com agregado reciclado de concreto exibiram relações água/cimento efetivas semelhantes e valores de trabalhabilidade (*slump test*) comparáveis aos do concreto com agregado natural, demonstrando assim que uma trabalhabilidade equivalente pode ser facilmente alcançada independentemente da qualidade do agregado reciclado usado.

2.3.4 A trabalhabilidade ao longo do tempo

Uma conservação na trabalhabilidade ao longo do tempo é frequentemente uma propriedade desejada, pois permite trabalhar com concreto por longos períodos até que ele endureça. Embora a incorporação de agregado reciclado normalmente não afete o tempo de ajuste, dependendo do teor de umidade do agregado reciclado, eles afetarão a perda de consistência ao longo do tempo.

Poon et al. 2004 demonstraram que o estado de umidade do agregado reciclado desempenha um papel importante na conservação da trabalhabilidade do concreto. Independentemente da umidade do agregado reciclado de concreto, desde que a absorção de água tenha sido compensada, após 15 a 30 minutos todas as misturas começaram a exibir níveis equivalentes de trabalhabilidade. Achados semelhantes foram observados por alguns dos mesmos autores em misturas contendo cinzas volantes em combinação com agregado graúdo reciclado de concreto (POON; KOU; LAM, 2007). Nealen e Rühl 1997 e Nealen e Schenk 1998 também relatou que garantir relações a/c efetivas semelhantes, independentemente do nível de substituição, resultaria em misturas concreto com agregado reciclado de concreto com trabalhabilidade equivalente ao longo do tempo ao das misturas do concreto de referência correspondentes. Por outro lado, ao incorporar a agregado reciclado no estado seco, devido à relação a/c efetiva gradualmente menor ao longo do tempo, é provável que o concreto com agregado reciclado de concreto resultante apresente uma alta perda na consistência, cujo grau depende do nível de substituição (MEFTEH et al., 2013).

Tu et al. 2006 avaliaram o efeito da incorporação de agregado reciclado de argamassa, tanto miúdo quanto graúdo na progressão da trabalhabilidade do concreto autoadensável. Observou-se que, após 1 h, a maioria das misturas ainda exibia alta fluidez, embora menor trabalhabilidade pudesse ser observada em misturas contendo agregado miúdo e graúdo de argamassa.

Dhir et al. 1999 avaliaram o efeito do uso de agregado reciclado de concreto na produção de novos concretos. Todos os agregados reciclados de concreto foram incorporados no estado saturado superfície seca. Inicialmente, todas as misturas, independentemente do nível de reposição, apresentaram fatores de compactação equivalentes. No entanto, com o passar do tempo, as misturas de referência exibiram uma maior perda no fator de compactação, quando comparadas às que continham 100% de agregado graúdo reciclado de concreto. Aqueles feitos com 100% de agregado reciclado de concreto e 50% de agregado miúdo reciclado de concreto apresentaram valores intermediários para os dois mencionados acima. É possível que o agregado reciclado de concreto, que estava no estado saturado superfície seca, tenha apresentado alguma

exsudação, contribuindo para uma maior relação a/c efetiva ao longo do tempo e melhor compactação.

2.3.5 A influência dos aditivos redutores de água

A adição de misturas a um lote de concreto pode ser realizada imediatamente antes ou durante do processo de mistura. Sua aplicação visa adicionar certas propriedades ao concreto, incluindo aceleração ou retardamento do tempo de endurecimento, melhoria de sua fluidez, conteúdo de ar, entre outros. O uso de aditivos redutores de água de alta faixa ou regulares é uma prática regular na fabricação de concreto e ganhou atenção especial na produção de concreto com agregado reciclado, devido à sua capacidade de melhorar sua trabalhabilidade no caso de agregado reciclado com superfície consideravelmente rugosa e formato irregular (PEDRO; BRITO; EVANGELISTA, 2015; TERANISHI et al., 1998; MEDDAH; SATO, 2010).

Jaau et al. 2004 estudaram a possibilidade de incorporar agregado graúdo reciclado de concreto na produção de concreto auto adensável. As misturas de concretos com agregado reciclado foram feitas com agregado reciclado na condição saturada superfície seca e com o mesmo conteúdo de aditivos redutores de água. Os resultados mostraram níveis equivalentes de trabalhabilidade e abatimento em um estágio inicial, mas apresentaram uma perda ligeiramente maior após algum tempo, quando comparados às misturas de referência. Observações semelhantes foram feitas para o abatimento inicial das misturas de concreto correspondentes, que eram comparáveis entre o concreto com agregado reciclado e o concreto com agregado natural, e também mostraram consistentemente uma perda ligeiramente maior ao longo do tempo. É possível que tenha havido um declínio na eficácia da mistura ao longo do tempo devido à maior superfície do agregado reciclado de concreto. No entanto, isso pode ter sido observado nos níveis iniciais de abatimento, conforme relatado por Cartuxo et al. 2015; Cartuxo et al., 2016 e Pereira et al. 2012, que afirmaram que pode haver uma pequena perda na eficácia de algumas misturas com aditivos redutoras de água com níveis crescentes de reposição. Embora aumentos similares tenham sido observados nas misturas de referência e nas feitas com a mistura redutora de água de alto alcance (polícarboxilatos modificados), sugerindo assim seu desempenho estável, parece que houve uma

eficácia reduzida ao usar o redutor de água regular à base de lignosulfonato nas misturas. Isso pode ser explicado por seu mecanismo de trabalho específico, que se baseia em repulsões eletrostáticas que atuam na superfície dos agregados. Como o agregado miúdo reciclado de concreto apresenta uma área superficial específica consideravelmente mais alta em comparação com a areia natural, é provável que a eficácia da mistura diminua para o mesmo conteúdo (EVANGELISTA; BRITO, 2014)

2.3.6 Efeitos das adições minerais

É sabido que algumas adições minerais têm algum grau de interação com a argamassa aderida do agregado reciclado de concreto ao longo do tempo, resultando em melhores comportamento mecânico e propriedades relacionadas à durabilidade do concreto (KURAD et al., 2017; KOU; POON, 2017; KOU, POON, 2008; KOU, POON, 2012). No entanto, embora se espere que o uso de adições minerais influencie a trabalhabilidade do concreto, é provável que sua eficácia não seja afetada pela presença de agregado reciclado.

Kou et al. 2011 estudaram a influência do uso de diferentes tipos de adições minerais nas misturas de concreto com agregado reciclado com o aumento do conteúdo de agregado reciclado. Em misturas sem adição minerais, a incorporação de maiores quantidades de agregado reciclado de concreto levou a níveis mais altos de abatimento como resultado da quantidade adicional não absorvida de água compensadora, produzindo assim misturas com uma maior relação *a/c* efetiva quando o teste de slump foi realizado. O uso de cinzas volantes ou escória granulada de alto forno como substituição parcial do cimento normalmente resulta em um efeito de lubrificação no concreto e, portanto, apresenta maiores abatimento (trabalhabilidade), o que foi o caso de todas as misturas. Embora os resultados das misturas contendo cinzas volantes sugiram uma ligeira redução na eficácia da capacidade de redução de água da adição minerais com o aumento do conteúdo de agregado reciclado de concreto, ou seja, aumento de 15 mm para misturas dos concretos com agregado natural e apenas 5 mm para os concretos com 100% de agregado gráudo reciclado de concreto, o ganho do abatimento de misturas com escória granulada de alto-forno moída foi afetado apenas marginalmente pela presença de agregado reciclado de concreto. Achados equivalentes foram relatados por Berndt em

misturas com 50% de escória granulada do alto-forno como substituição parcial do cimento e com conteúdo de agregado graúdo reciclado de concreto.

Kurad et al. 2017 também avaliaram a influência da adição de alto volume de cinzas volantes nas propriedades do concreto com agregado reciclado com o aumento do conteúdo agregado miúdo reciclado de concreto. Todas as misturas foram preparadas para exibir o mesmo nível de queda de 80 ± 10 mm. Independentemente do conteúdo de adição minerais, à medida que o conteúdo de agregado miúdo reciclado de concreto aumentou, a relação a/c efetiva também teve que ser aumentada para compensar o maior atrito inter-partículas do agregado miúdo reciclado de concreto, a fim de produzir misturas com níveis comparáveis de abatimento. No entanto, a capacidade de redução de água das cinzas volantes não foi afetada pela presença de agregado miúdo reciclado de concreto, uma vez que foram observadas reduções paralelas na relação efetiva a/c para as misturas.

Poon et al. 2010 estudaram o efeito da incorporação de cinzas volantes como substituição parcial do cimento no desempenho a longo prazo do concreto com agregado graúdo reciclado de concreto. Como uma abordagem de compensação de água foi seguida durante o processo de mistura, a fim de compensar totalmente a capacidade da absorção do agregado reciclado de concreto, foram observados valores mais altos de queda nas misturas com níveis de reposição crescentes: misturas com 100% de AGRC apresentaram um aumento de 30% em comparação com o concreto de referência, que foi produzido com 100% de agregado natural. Além disso, como observado nos estudos mencionados, o aumento do teor de cinzas volantes em combinação com níveis mais altos de substituição teve pouco efeito no aumento do abatimento dos concretos.

2.3.7 Características reológicas dos concretos com agregado reciclado

A caracterização reológica do concreto permite uma quantificação do fluxo e deformação da mistura, com o estudo das relações entre deformação, taxa de deformação, tensão e tempo. A reologia do concreto no estado fresco, que é afetada pelos constituintes das misturas (por exemplo, teor de cimento, relação a/c, relação entre agregados graúdos e miúdos, teor de superplastificante, entre

outros), pode ser caracterizada de acordo com os parâmetros reológicos do Modelo de Bingham (ou seja, tensão de escoamento e viscosidade plástica). Esse modelo foi considerado como aquele que pode representar aproximadamente o comportamento do concreto fresco (NEWMAN; CHOO, 2003; FALESCHINI et al., 2014), embora outros modelos também tenham sido propostos para explicar a não linearidade do comportamento do fluxo (FERRARIS; LARRARD, 1998). No caso de concreto com agregado reciclado, a tensão de escoamento e a viscosidade no estado plástico, além de serem afetadas pelos mesmos fatores encontrados no concreto convencional, são influenciadas principalmente pelos estados de umidade variáveis do agregado reciclado, sua forma irregular e rugosidade devido à argamassa aderida (AMARIO et al., 2017). Embora o uso de agregado reciclado seco leve à absorção da água da mistura em misturas não compensadas, causando um aumento na tensão de escoamento e na viscosidade no estado plástico, espera-se que uma maior rugosidade do agregado reciclado cause um maior atrito entre partículas e, portanto, um maior escoamento.

2.4 USO DE POZOLANAS EM CONCRETOS COM AGREGADO RECICLADO

Recentemente, as crescentes quantidades de resíduos de concreto para construção e demolição tornaram-se prejudiciais ao meio ambiente (SILVA; BRITO; DHIR, 2015). A reciclagem dos resíduos de concreto da construção e demolição é essencial para proteger o meio ambiente, economizar recursos naturais limitados e realizar o desenvolvimento sustentável nas obras (SILVA et al., 2015). No entanto, as propriedades inferiores do agregado reciclado de concreto, incluindo densidade relativamente baixa, alta porosidade e alta absorção de água em comparação com o agregado natural, impedem sua aplicação potencial em obras (BRITO; SILVA, 2016; FERRIRA; BRITO; BARRA, 2011; GOMES; BRITO, 2009). Para melhorar as propriedades do agregado reciclado de concreto, duas categorias de metodologias foram desenvolvidas (SILVA et al., 2015): (i) eliminação da argamassa aderida fracamente no agregado reciclado de concreto por meio de moagem em esferas (CORREIA; BRITO; PEREIRA, 2006), limpeza por água com ultrassom (BELTRÁN et al., 2014), retificação e aquecimento, (YANG; DU; BAO, 2011) ou pré-imersão em solução de ácido (HCl, H₂SO₄, ou H₃PO₄ (MÜLLER, 1998) ; e (ii) fortalecer a

argamassa aderida, revestindo a superfície com solução polimérica, como emulsão de álcool polivinílico (TAM; TAM, 2008), solução de silicato de sódio (CACHIM, 2009), e usando as reações entre CO_2 e produtos de hidratação (carbonatação acelerada) para a argamassa aderida (TAM; TAM; WANG, 2007; KHALAF; DEVENNY, 2005). No entanto, energia e custo extras são necessários para a realização dos métodos mencionados acima. Além disso, o agregado reciclado de concreto quando é pré imerso em soluções ácidas geralmente altera a condição do pH e introduz íons de sal no agregado reciclado de concreto, que alteram a composição química do agregado e influenciam a aplicação subsequente. As soluções de polímero e silicato de sódio reduzem efetivamente a absorção de água do RCA, mas apenas proporcionam um aumento limitado na resistência resultante do concreto.

O fortalecimento da argamassa aderida fracamente usando materiais pozolânicos (cinzas volantes, sílica ativa etc.) é considerado uma técnica eficiente para superar a fraca ligação entre argamassa antiga e o agregado natural (TSUJINO et al., 2007). Emergir o agregado reciclado em pastas pozolânicas, ou pulverização com materiais pozolânicos (revestimento de superfície), fazem as partículas finas pozolânicas reagir com hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) de modo a formar silicato de cálcio hidratado em gel (C-S-H) que de forma eficaz preenche os poros e espaços vazios na argamassa aderida (BRITO; SILVA, 2015; MANZI; MAZZOTTI; BIGNOZZI, 2013; TAM; TAM, 2005; SILVA; BRITO; DHIR, 2014; KHALAF; DEVENNY, 2004. Tam e Tam 2008 descobriram que a adição de sílica ativa na pré-mistura preencheu os vazios da superfície da argamassa aderida fracamente e formou uma forte camada ao redor da ARC. Eles tentaram obter melhorias adicionais nas propriedades do concreto com agregado reciclado, revestindo a superfície por materiais pozolânicos (cinzas volantes e escórias) ao redor do agregado reciclado de concreto. Verificou-se que as partículas das pozolanas se acumularam nos poros e na superfície do agregado reciclado de concreto para formar novos produtos de hidratação. Esses produtos não apenas fortalecem o agregado reciclado de concreto, mas também melhoram a microestrutura da zona de transição interfacial (ZTI). Assim, a força e a durabilidade do concreto com agregado reciclado de concreto foram melhoradas.

3. ARTIGO 1: CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO DE BAUXITA VISANDO SEU USO NA CONSTRUÇÃO CIVIL

3.1 RESUMO

Atualmente há uma valorização dos resíduos industriais, não só pelo quesito ambiental, como também visando um possível lucro através da reutilização deles. A lama vermelha - um resíduo proveniente do processo Bayer do refino de alumina - faz parte deste cenário, já que os meios de destinação mais utilizados provocam danos ao ambiente e já existem estudos relatando algumas aplicações. No entanto, os trabalhos existentes mostram falhas no desempenho do uso desse resíduo. Assim, este trabalho busca avaliar os efeitos da calcinação na lama vermelha, com o intuito de promover uma melhora nas propriedades. Com a análise dessa caracterização obtida observamos que a calcinação provocou o surgimento de uma nova fase mineralógica, aumentou a massa específica e a granulometria, diminuiu a área superficial e provocou alteração de perda ao fogo. A partir desses resultados deduzimos algumas aplicações para esse resíduo tanto no ramo da construção civil, utilizando os compostos químicos da lama vermelha em cimento Portland ou se beneficiando das propriedades físicas geradas após a calcinação para incrementar em cimentos geopoliméricos. Assim como, para aplicações ambientalmente favoráveis e usos industriais, desfrutando-se da grande quantidade de Fe e Al presentes na lama vermelha ela pode ser usada como catalisador, já pela sua alcalinidade pode ser aplicada como dessulfurante ou ela também pode ser utilizada como adsorvente e corante inorgânico.

Palavras-chave: Resíduo, Bauxita, Análise térmica, Reaproveitamento, Calcinação

3.2 ABSTRACT

Currently, there is an appreciation of industrial waste, not only for the environmental aspect, but also aiming at a possible economic gain through their reuse. Red sludge - a residue from the Bayer process of alumina refining - is part of this scenario, since the most used destination media cause damage to the environment, and studies have already reported on some applications. However, existing works show flaws in the performance of using this waste. Thus, this work

seeks to evaluate the effects of calcination on the red mud, in order to promote improvements in properties. microstructural. With the analysis of this characterization obtained, we observed that the calcination caused the appearance of a new mineralogical phase, increased the specific mass and granulometry, decreased the surface area and caused a change in loss to fire. From these results, we deduced some applications for this residue in the construction industry, using the chemical compounds of red mud in Portland cement, or benefiting from the physical properties generated after calcination, to increase in geopolymeric cements. As well as, for environmentally favorable applications and industrial uses, taking advantage of the large amount of Fe and Al present in the red mud, it can be used as a catalyst, because of its alkalinity it can be applied as a desulfurant, or it can also be used as an adsorbent. and inorganic dye.

Keyword: Residue, Bauxite, Thermal analysis, Reuse

3.3 INTRODUÇÃO

O processo Bayer, de produção de alumina, gera grandes quantidades de um resíduo insolúvel, conhecido como resíduo de bauxita (RB), sendo que para cada tonelada de alumina são geradas 1,6 toneladas desse material (KUMAR; KUMAR, 2013). Atualmente os meios mais utilizados de destinação do RB são o armazenamento em lagoas ou o empilhamento a seco. No entanto, devido à sua alta alcalinidade pode provocar problemas na fertilidade dos solos, gerar poluição de recursos hídricos e gerar um impacto negativo sobre os organismos vivos (NIKBIN et al., 2016).

A cada ano a produção desse resíduo tem aumentado, o que provoca preocupação em desenvolver métodos e encontrar alternativas para o descarte adequado e um possível aproveitamento desse material. Outro fator importante de ser ressaltado, é que a valorização de resíduos aumentou nas últimas décadas, não só pelas questões ambientais, mas também pelo reconhecimento de que os recursos naturais são limitados, e a transformação desse material, considerado resíduo industrial inutilizável, em matéria prima também pode ter um atrativo econômico.

Já existem estudos a respeito da reutilização desse material, mas é preciso observar a real aplicação para a finalidade que se quer, por exemplo, segundo Tang et al., (2018) a incorporação do resíduo de bauxita provoca um impacto negativo nas propriedades frescas do concreto, sendo necessária a utilização de mais superplastificante. O autor acima utilizou o material de estudo *in natura* e o tratamento feito foi somente desagregação e secagem, não houve um procedimento executado a fim de melhorar o seu desempenho, considerando que ele tem uma natureza porosa, que conseqüentemente irá absorver mais água e diminuir a fluidez do produto.

Analisando de uma forma geral a composição do resíduo de bauxita, percebemos que ela é constituída principalmente por óxido de alumínio (Al_2O_3), óxido de ferro (Fe_2O_3), óxido de silício (SiO_2) e dióxido de titânio (TiO_2) (DODOO-ARHIN et al., 2017). Dessa maneira, realizou-se um tratamento térmico em diferentes temperaturas nesse resíduo, a fim de melhorar as propriedades físicas do mesmo.

3.4 MATERIAIS E MÉTODOS

3.4.1 Beneficiamento do resíduo de bauxita

O resíduo de bauxita (RB) foi analisado tanto *in natura*, quanto calcinada em temperaturas de 600°C, 800°C e 1000°C. O procedimento de calcinação ocorreu em um forno mufla com taxa de aquecimento de 15°C/min, assim que atingiu a temperatura desejada de queima o material permaneceu na mufla por 2h e foi retirado posteriormente para o resfriamento natural. Em seguida desagregou-se cada amostra de lama vermelha até que fossem passantes na peneira de abertura igual a 75µm. Esses procedimentos descritos estão representados de maneira sintética na figura 1.

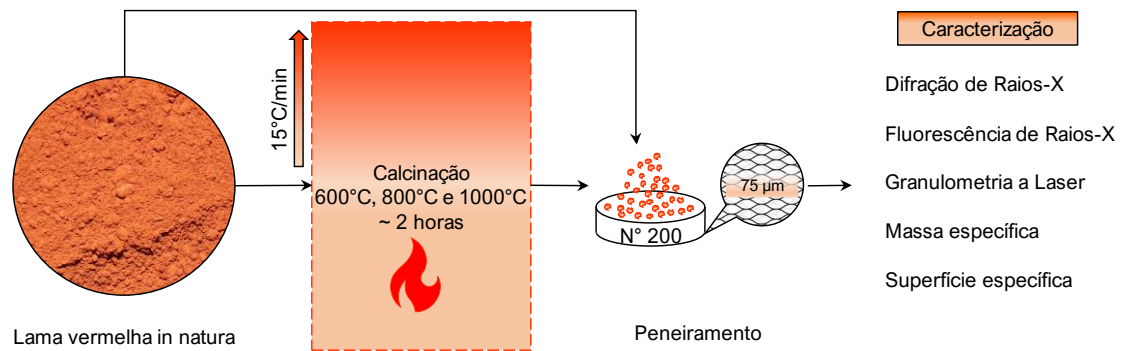


Figura 1 – Delineamento experimental: resumo dos procedimentos realizados para beneficiamento e caracterização do RB.

3.4.2 Caracterização

O ensaio de massa específica foi realizado a partir da norma de determinação da densidade real de solos (DNER-ME - 093/94, 1994). A análise de difração de raios-X (DRX) foi realizada em um difratômetro de feixe divergente equipado com um goniômetro θ - θ , um tubo de raios-X de Cu com radiação de Cu ($K\alpha_1=1,540598 \text{ \AA}$) e um filtro de Ni $K\beta$. As condições do instrumento foram as seguintes: 40kV e 40mA; fenda Soller de $2,5^\circ$ (feixe incidente e refratado); faixa angular (2θ) de 5° a 75° . A coleta dos difratogramas foi realizada com passo angular de $0,02^\circ$ e tempo por passo de $0,5 \text{ s}^\circ$, fenda divergente de 0,6mm. O ensaio de granulometria foi feito por difração a laser, o ultrassom foi de 60s, a medida de 60/60/4 e as concentrações de material foram imersas em água. Os teores da composição química foram determinados em amostra fundida com tetraborato de lítio anidro, na calibração ROC-1 (Rochas), em espectrômetro de fluorescência de raios-X, marca PANalytical, modelo Zetium; a perda ao fogo (PF) foi efetuada a 1020°C por 2h. A área superficial da lama vermelha foi calculada através do método BET (Teoria de Adsorção Multimolecular) utilizando o instrumento Nova Station A, sendo determinada pela adsorção de nitrogênio a 77K, com uma densidade de 1g/cc. O tempo de análise para a amostra in natura foi de 24,8min, para a amostra calcinada a 600°C foi de 23,3min, a 800°C foi de 22,9min e a 1000°C de 20,3min.

3.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.5.1 Massa específica

A massa específica do RB altera de acordo com a mineralogia da rocha de origem. Para essa amostra de RB ensaiada observou-se que com o aumento da temperatura de calcinação ocorreu o aumento da massa específica (Tabela 1).

Tabela 1 – Massas específicas da lama vermelha: a calcinação da lama vermelha provocou aumento na massa específica de acordo com o aumento de temperatura.

In natura	600°C	800°C	1000°C
2,741	3,007	3,012	3,028

3.5.2 Difração de raios X

De acordo com a análise mineralógica obtida (Figura 2), a lama vermelha in natura contém picos referentes à gibbisita ($\text{Al}(\text{OH})_3$), goethita ($\text{FeO}(\text{OH})$), anatásio (TiO_2), hematita (Fe_2O_3) e sodalita ($\text{Na}_4\text{Al}_3(\text{SiO}_4)_3\text{Cl}$). Quando esse material é submetido ao procedimento de calcinação à 600°C, a sodalita não sofre transformação, assim como a goethita, a hematita e o anatásio, no entanto o pico de gibbisita desaparece. Na calcinação à 800°C não há nenhuma mudança perceptível, ou seja, permanecem os minerais encontrados à 600°C. Já quando o RB é calcinado à 1000°C percebe-se a decomposição da sodalita, do anatásio e da goethita, e o surgimento da nefelina (NaAlSiO_4), além do que a hematita permaneceu sem nenhuma reestruturação.

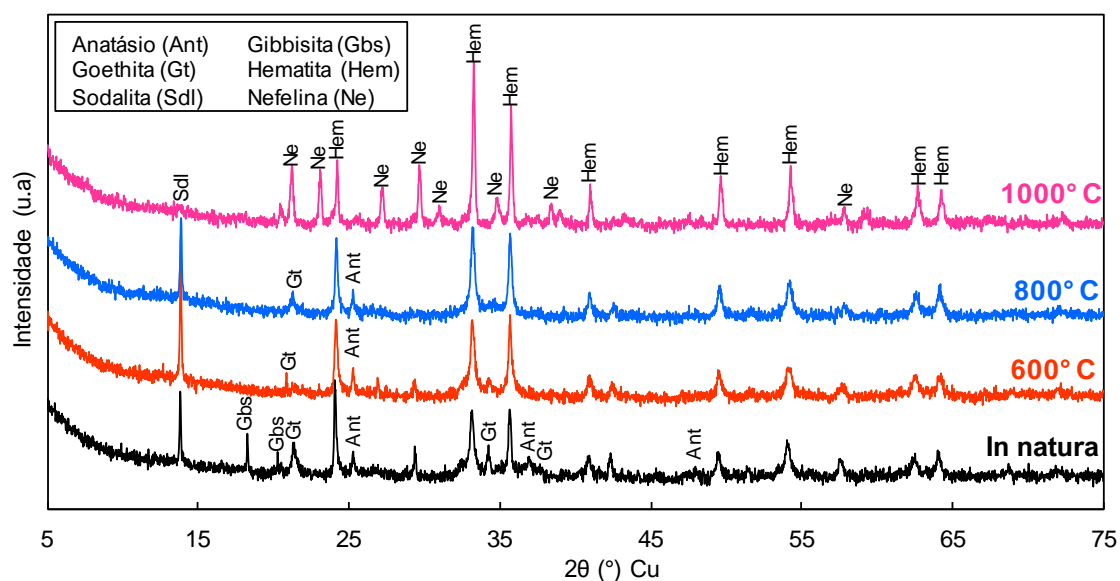


Figura 2 - Difrátogramas do RB: o tratamento térmico do RB desestruturou sua composição mineralógica formando novas fases, em 1000°C apenas a hematita conservou-se, e houve o surgimento da nefelina.

3.5.3 Fluorescência de raio-X

A composição química do RB vai depender da origem da bauxita, no entanto é de praxe que esse material retém o ferro, titânio, sílica e parte do alumínio presentes na bauxita (Kim et al., 2017), assim como foi observado para essa amostra analisada (Tabela 2). Além disso, a presença de Na₂O deve-se a adição do hidróxido de sódio durante a etapa de digestão do processo Bayer.

Tabela 2 – Fluorescência do RB *in natura* e calcinada nas temperaturas de 600°C, 800°C e 1000°C: é perceptível que os compostos químicos predominantes no material analisado são a sílica, a alumina e a hematita e que a quantidade de cada composto não varia de forma significativa, somente a porcentagem de perda ao fogo (PF).

Amostra/ %	In natura	600°C	800°C	1000°C
SiO ₂	18,2	18,3	18,7	18,2
Al ₂ O ₃	21,6	22,6	23,0	22,4
Fe ₂ O ₃	30,4	31,0	31,7	30,9
MnO	0,15	0,16	0,16	0,15
MgO	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10
CaO	1,47	1,47	1,51	1,48
Na ₂ O	10,9	11,2	11,4	11,1
K ₂ O	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10
TiO ₂	5,79	6,10	6,23	6,07
P ₂ O ₅	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10
PF	9,73	6,94	4,74	7,84

3.5.4 Granulometria

O aumento da temperatura pode promover a agregação do solo através da secagem e do aquecimento do mesmo (Jiang et al., 2017), essa agregação ocasiona em um aumento no tamanho das partículas. Assim como ocorreu com esse RB analisado, visto que com o aumento da temperatura de calcinação o material teve um aumento na distribuição granulométrica de suas partículas (Figura 3).

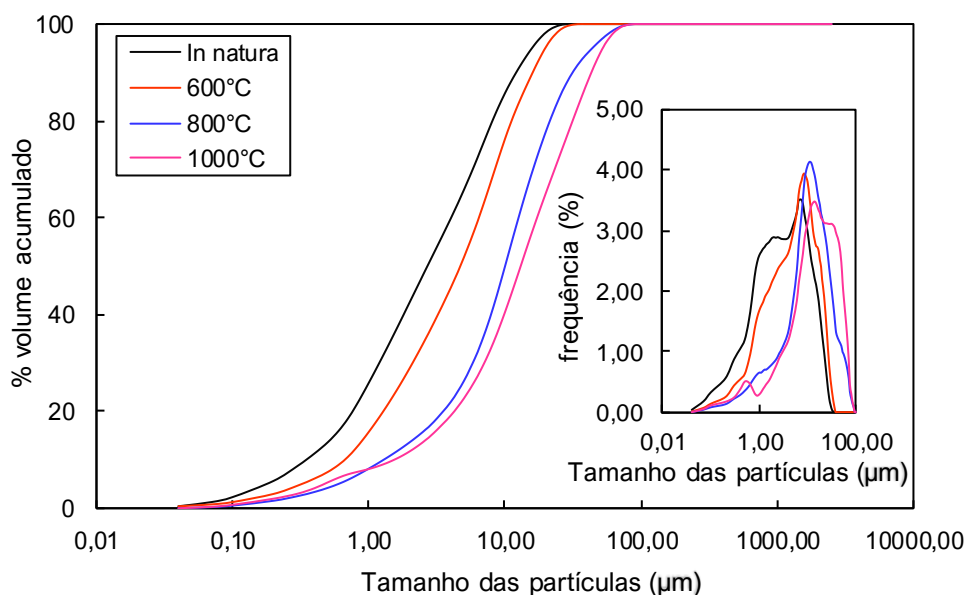


Figura 3 – Análise granulométrica do RB: O aumento da temperatura de calcinação, surtiu no aumento da granulometria da amostra, apesar de que, em todas as temperaturas terem apresentado uma distribuição contínua.

3.5.5 Método de BET

A calcinação a altas temperaturas pode levar à sinterização de alguns componentes, atuando na área superficial de forma decrescente (Kurtoğlu et al., 2016) e por preencher os vazios existentes provoca uma redução na quantidade de poros. Dessa forma, quanto maior a temperatura que o RB for calcinado menor sua área superficial (Tabela 3). Isso pode ser comprovado também ao analisar a granulometria desse material, já que o tamanho das partículas aumentou com a calcinação e o material se tornou menos fino, portanto diminuiu a área superficial.

Tabela 3 – Áreas superficiais do RB *in natura* e calcinado: com o aumento de temperatura o material sofreu uma diminuição na área superficial específica.

In natura	600°C	800°C	1000°C
24,921 m ² /g	19,085 m ² /g	15,327 m ² /g	7,515 m ² /g

3.5.6 Discussão

A sinterização de um material reduz a sua porosidade, reduzindo assim a acessibilidade da solução alcalina e a reatividade geral. Além disso, aumenta a granulometria das partículas e reduz a área superficial externa (Dietel et al., 2017), e dependendo da temperatura de calcinação a massa específica também sofrerá variação (Wu and Liu, 2012), essas características discutidas contribuem com os resultados obtidos neste trabalho. O aumento de massa específica pode ter sido ocasionado também devido aos efeitos fundentes do óxido de sódio (Na_2O) presente na composição química, e da obtenção de uma estrutura cristalina mais densa e estável.

A partir do DRX observamos que o tratamento térmico na temperatura de 1000°C provocou o surgimento de uma nova fase, que é a nefelina. Esse mineral tem a característica de ser resistente a altas temperaturas e o seu uso para obtenção de agregados para a construção civil tem sido muito discutido (CETEM, 2008). Além disso, analisando o difratograma do RB é perceptível que a gibbisita não pode ser detectada nas temperaturas a partir de 600°C , esse fato ocorre por motivo de pirólise (Wu and Liu, 2012), ou seja, ocorre a decomposição dela devido à alta temperatura e devido ao ambiente ter pouco oxigênio.

O alto teor de Al_2O_3 tende a aumentar a propriedade refratária do material, ou seja, ele se torna mais resistente a altas temperaturas (Pinheiro and Holanda, 2010). Assim como o óxido alcalino K_2O e os alcalinos-terrosos CaO e MgO , que apesar de apresentarem baixos valores percentuais também caracterizam a alta refratariedade do RB. Junto com o óxido de ferro, esse óxido alcalino e os alcalino-terrosos atuam como material fundente (Helena et al., 2004) e irão ter grande influência durante a queima, favorecendo a sinterização e a densificação (Silva et al., 2005).

A perda ao fogo demonstra a presença de água molecular e de matéria orgânica no material e é utilizada para medir as espécies voláteis, carbono não queimado e umidade nos materiais sólidos, ela pode ser resultada da perda parcial de água da estrutura e da decomposição de alguns minerais instáveis (Mu et al., 2017), por esse motivo ela diminuiu com a calcinação do RB aos 600°C e 800°C e aumentou aos 1000°C pelo surgimento da nefelina, que é um mineral resistente.

3.5.6.1 O resíduo de bauxita como matéria prima sustentável na produção de materiais de construção civil

O resíduo de bauxita (RB) é um material caracterizado por ter uma composição complexa que vai depender da origem da bauxita proveniente e não há na literatura muitos relatos recentes acerca de caracterizações como a realizada neste trabalho. Foi possível identificar com os resultados obtidos, mudanças na composição química deste material a partir das diferentes temperaturas de calcinação, no entanto a mudança mais significativa não foi com relação aos compostos e sim a perda ao fogo que houve uma grande variação. Além disso, verificamos mudanças nas propriedades físicas e também na mineralogia do material, visto que ocorre a decomposição de alguns minerais e o surgimento de fases mais resistentes.

Como visto nos resultados com relação aos compostos químicos presentes na amostra de RB analisada, a sílica (SiO_2), a alumina (Al_2O_3) e o óxido de ferro (Fe_2O_3) são os principais componentes, além de ter uma importante porcentagem de óxido de sódio (Na_2O) e de dióxido de titânio (TiO_2). A sílica presente é um composto que, promove melhora nas respostas mecânicas das pastas após o endurecimento, devido à nucleação heterogênea acelerada, ao melhor empacotamento das misturas e à maior reatividade das partículas por serem finas (Flores et al., 2017).

Assim como a sílica, a alumina também aumenta a resistência a compressão de pastas de cimento Portland devido sua capacidade de refinar os poros da mistura, além disso, acelera a hidratação e diminui a trabalhabilidade (Gowda et al., 2017). Ela também melhora as propriedades refratárias em concretos, tem alto ponto de fusão e possui boas propriedades mecânicas, se tornando adequada para aplicações em altas temperaturas (Kumar et al., 2014).

Já o dióxido de titânio acelera a formação do gel C-S-H e melhora a microestrutura do concreto levando à melhora na durabilidade e aumento de resistência (Jalal et al., 2013). No entanto, esse composto não atua como material pozolânico, por isso não aumenta o consumo de cal livre (Essawy and Abd, 2014). Além disso, o anatásio (TiO_2) é muito utilizado como catalisador,

pigmento e em materiais eletrônicos, mas essas aplicações requerem titânica de alta pureza para isso é necessário controlar o tamanho, a morfologia e a textura das partículas do cristal (Hsiang and Lin, 2006).

Já devido às propriedades físicas dessa amostra de RB estudada após a calcinação - como redução da porosidade, aumento da granulometria e redução da área superficial - é necessário menos ligante para produzir um cimento geopolimérico de alta resistência a compressão (Dietel et al., 2017). O cimento geopolimérico é uma alternativa inovadora ao cimento Portland convencional e ele se baseia em materiais naturais ou subprodutos industriais, como o RB, com o objetivo de reduzir a pegada de carbono. A produção desse cimento é a partir da junção entre um material aluminossilicato – como o RB -, um reagente alcalino de fácil utilização e água. Esse tipo de cimento cura mais rapidamente, alcança a maior parte da resistência em 24 horas, forma uma ligação forte com todos os tipos de agregados à base de rochas e tem boa resistência ao fogo (Davidovits, 2015). Além disso, o consumo de energia de fabricação é baixo e tem baixo teor de emissão de CO₂ (Essaidi et al., 2013).

3.5.6.2 Resíduo de bauxita sendo destinado a produtos industriais ecologicamente corretos

O resíduo de bauxita apresenta também uma aplicação promissora como um adsorvente de baixo custo no tratamento de água para remover metais pesados, ânions inorgânicos, íons metaloides, compostos orgânicos e bactérias (Liu et al., 2011). Isso pode ser realizado após um tratamento térmico ou químico específico no material (Liu et al., 2009). Para remoção de boro de uma solução aquosa, por exemplo, é necessário neutralizar o RB para que se obtenha um melhor aproveitamento e isso pode ser feito a partir de um tratamento com água do mar que vai reduzir a alcalinidade do material sem diminuir a capacidade de adsorção (Liu et al., 2011). Esse material pode ser neutralizado também a partir de um ácido, como HCL, H₂SO₄, que pode aumentar a área superficial e o volume de poros, favorecendo a adsorção (Wang et al., 2008).

Além disso, o uso de metais nobres e óxidos metálicos é popular como catalisador para aplicações na indústria, mas eles possuem alto preço e baixa estabilidade. Sendo assim, o RB é uma alternativa mais barata para esse uso,

por conter grandes porcentagens de Fe e Al (Sushil and Batra, 2008). Para isso é necessário que ele passe por um tratamento, de forma a ativar as características requeridas, como por exemplo uma ativação por meio da calcinação ou tratado com HCl, afim de melhorar as características texturais (Shim et al., 2018).

Outra possibilidade de uso do RB é como absorção e purificação de gases residuais ácidos, como o SO₂. O resíduo da bauxita pode ser aplicado como um dessulfurante devido a sua alta capacidade alcalina. Os resíduos resultantes desse processo podem ser reutilizados como matéria prima para produção de cimento (Liu et al., 2009).

Podem ser produzidos também corantes inorgânicos a partir do resíduo de bauxita após a calcinação em altas temperaturas, os materiais obtidos apresentam novas estruturas cristalinas e quando adicionados a esmaltes cerâmicos como aditivos produzem esmaltes com cores estáveis e de alta intensidade (Carneiro et al., 2018b). O uso do RB como pigmento é aceitável se ela traz vantagens de desempenho, além das vantagens ambientais e econômicas. De acordo com Carneiro et al., (2018b) a adição de 3% em peso desse material calcinado tem um melhor desempenho do que a *in natura* seca e é um agente corante mais estável do que a hematita comercial.

3.6 CONCLUSÕES

A partir do tratamento térmico no RB observou-se que houveram mudanças em suas propriedades físicas - como o aumento da massa específica, aumento da granulometria e diminuição da área superficial - sendo provocadas pela sinterização do material. Assim como, a composição mineralógica alterou a partir da decomposição de alguns minerais e do surgimento da nefelina, percebemos também a permanência da hematita em todas as temperaturas analisadas. Com relação aos compostos químicos, houveram alterações de porcentagem, no entanto não tão significativas se comparadas à mudança na porcentagem de perda ao fogo - resultada da perda parcial de água da estrutura e da decomposição de alguns minerais instáveis.

Com a análise dessa caracterização, obtida do tratamento térmico do resíduo de bauxita proveniente da Amazônia, detectamos possíveis aplicações para a

utilização desse material, uma vez que esse procedimento implica melhoras nas propriedades do mesmo, como por exemplo na fabricação de cimento Portland ou cimento geopolimérico, adsorvente de baixo custo no tratamento de água, catalisador para aplicações industriais, etc.

3.7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CARNEIRO, J., CAPELA, M.N., TOBALDI, D.M., NOVAIS, R.M., SEABRA, M.P., Labrincha, J.A., 2018a. Red mud and electroplating sludge as coloring agents of distinct glazes: The influence of heat treatment. **Mater. Lett.** 223, 166–169. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2018.04.013>

CARNEIRO, J., TOBALDI, D.M., HAJJAJI, W., CAPELA, M.N., NOVAIS, R.M., SEABRA, M.P., LABRINCHA, J.A., 2018b. Red mud as a substitute coloring agent for the hematite pigment. **Ceram. Int.** 44, 4211–4219. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.11.225>

CETEM, 2008. **Rochas e minerais industriais: usos e especificações, Rochas & Minerais Industriais: usos e especificações.**

DAVIDOVITS, J., 2015. **Cimento geopolimérico: Uma revisão.**

DIETEL, J., WARR, L.N., BERTMER, M., STEUDEL, A., GRATHOFF, G.H., EMMERICH, K., 2017. The importance of specific surface area in the geopolymerization of heated illitic clay. **Appl. Clay Sci.** 139, 99–107. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2017.01.001>

DNER-ME - 093/94, 1994. **Determinação da densidade Real.**

DODOO-ARHIN, D., NUAMAH, R.A., AGYEI-TUFFOUR, B., OBADA, D.O., YAYA, A., 2017. Awaso bauxite red mud-cement based composites: Characterisation for pavement applications. **Case Stud. Constr. Mater.** 7, 45–55. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2017.05.003>

ESSAIDI, N., SAMET, B., BAKLOUTI, S., ROSSIGNOL, S., 2013. Effect of calcination temperature of Tunisian clay on the properties of geopolymers. **Ceram. – Silikáty** 57, 251–257.

ESSAWY, A.A., ABD, S., 2014. Physico-mechanical properties, potent adsorptive and photocatalytic efficacies of sulfate resisting cement blends containing micro silica and nano-TiO₂. **Constr. Build. Mater.** 52, 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.026>

FLORES, Y.C., CORDEIRO, G.C., TOLEDO FILHO, R.D., TAVARES, L.M., 2017. Performance of Portland cement pastes containing nano-silica and different types of silica. **Constr. Build. Mater.** 146, 524–530. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.069>

GOWDA, R., NARENDRA, H., RANGAPPA, D., PRABHAKAR, R., 2017. Effect of nano-alumina on workability, compressive strength and residual strength at elevated temperature of Cement Mortar. **Mater. Today Proc.** 4, 12152–12156. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.09.144>

HELENA, L., SIQUEIRA, S. DE, ALEGRE, P., 2004. **Utilização De Resíduos De Rochas Ornamentais Na Produção De Cerâmica Branca** 1–125.

HSIANG, H.I., LIN, S.C., 2006. Effects of aging on the kinetics of nanocrystalline anatase crystallite growth. **Mater. Chem. Phys.** 95, 275–279. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2005.06.019>

JALAL, M., FATHI, M., FARZAD, M., 2013. Effects of fly ash and TiO₂nanoparticles on rheological, mechanical, microstructural and thermal properties of high strength self compacting concrete. **Mech. Mater.** 61, 11–27. <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2013.01.010>

JIANG, C., SÉQUARIS, J.M., VEREECKEN, H., KLUMPP, E., 2017. **Effects of temperature and associated organic carbon on the fractionation of water-dispersible colloids from three silt loam topsoils under different land use.** **Geoderma** 299, 43 – 53. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.03.009>

KIM, S.Y., JUN, Y., JEON, D., OH, J.E., 2017. Synthesis of structural binder for red brick production based on red mud and fly ash activated using Ca(OH)₂and Na₂CO₃. **Constr. Build. Mater.** 147, 101–116. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.171>

KUMAR, A., KUMAR, S., 2013. Development of paving blocks from synergistic use of red mud and fly ash using geopolymerization. **Constr. Build. Mater.** 38, 865–871. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.013>

KUMAR, P.H., SRIVASTAVA, A., KUMAR, V., MAJHI, M.R., SINGH, V.K., 2014. Implementation of industrial waste ferrochrome slag in conventional and low cement castables: Effect of microsilica addition. **J. Asian Ceram. Soc.** 2, 169–175. <https://doi.org/10.1016/j.jascer.2014.03.004>

KURTOĞLU, S.F., SOYER-UZUN, S., UZUN, A., 2016. Tuning structural characteristics of red mud by simple treatments. **Ceram. Int.** 42, 17581–17593. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.08.072>

LIU, W., YANG, J., XIAO, B., 2009. Review on treatment and utilization of bauxite residues in China. **Int. J. Miner. Process.** 93, 220–231. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2009.08.005>

LIU, Y., NAIDU, R., MING, H., 2011. Red mud as an amendment for pollutants in solid and liquid phases. **Geoderma** 163, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.04.002>

MU, Y., SAFFARZADEH, A., SHIMAOKA, T., 2017. Influence of ignition process on mineral phase transformation in municipal solid waste incineration (MSWI) fly ash: Implications for estimating loss-on-ignition (LOI). **Waste Manag.** 59, 222–228. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.09.028>

NIKBIN, I.M., ALIAGHAZADEH, M., SH CHARKHTAB, FATHOLLAHPOUR, A., 2016. Environmental impacts and mechanical properties of lightweight concrete containing bauxite residue (red mud). **J. Clean. Prod.** 172, 2683–2694. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.11.143>

PINHEIRO, B.C. A, HOLANDA, J.N.F., 2010. Efeito da temperatura de queima em algumas propriedades mecânicas de cerâmica vermelha. **Cerâmica** 56, 237–243. <https://doi.org/10.1590/S0366-69132010000300005>

SHIM, W.G., NAH, J.W., JUNG, H.Y., PARK, Y.K., JUNG, S.C., KIM, S.C., 2018. Recycling of red mud as a catalyst for complete oxidation of benzene. **J. Ind. Eng. Chem.** 60, 259–267. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2017.11.012>

SILVA, J.B., HOTZA, D., SEGADÃES, A. M., ACCHAR, W., 2005. Incorporação de lama de mármore e granito em massas argilosas. **Cerâmica** 51, 325–330. <https://doi.org/10.1590/S0366-69132005000400004>

SUSHIL, S., BATRA, V.S., 2008. Catalytic applications of red mud, an aluminium industry waste: A review. **Appl. Catal. B Environ.** 81, 64–77. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2007.12.002>

TANG, W.C., WANG, Z., LIU, Y., CUI, H.Z., 2018. Influence of red mud on fresh and hardened properties of self-compacting concrete. **Constr. Build. Mater.** 178, 288–300. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.171>

WANG, S., ANG, H.M., TADÉ, M.O., 2008. **Novel applications of red mud as coagulant, adsorbent and catalyst for environmentally benign processes.** **Chemosphere** 72, 1621–1635. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.05.013>

WU, C.S., LIU, D.Y., 2012. Mineral phase and physical properties of red mud calcined at different temperatures. **J. Nanomater.** 2012. <https://doi.org/10.1155/2012/628592>

4 ARTIGO 2: AVALIAÇÃO DO USO DO RESÍDUO DA BAUXITA NA PRODUÇÃO DE CONCRETOS COM AGREGADO RECICLADO

4.1 RESUMO

A indústria da construção civil é uma grande consumidora de recursos naturais, o que provoca grandes impactos ambientais. Para minimizar esse problema utiliza-se subprodutos de materiais complementares ao cimento Portland e agregados reciclados de concreto. Esse estudo tem como objetivo investigar a durabilidade de concretos produzidos com agregado graúdo reciclado de concreto (AGRC), usando o Resíduo de bauxita (RB), tratado termicamente, como substituto do cimento, analisando a absorção de água por imersão, que

depende principalmente da porosidade total do concreto, e a absorção capilar, na qual é influenciada pela conectividade e diâmetro dos poros. Os resultados mostram que a combinação de RB e AGRC aumenta a absorção de água por imersão e capilaridade. Isso ocorre por conta da reação pozolânica do RB e da porosidade do AGRC.

Palavras-chave: Resíduo de Bauxita, Concreto, Durabilidade, Absorção de água por ações de imersão e capilaridade, Agregado Reciclado de Concreto.

4.2 ABSTRACT

The construction industry is a major consumer of natural resources, which would cause environmental impacts. To solve this problem, we use by-products of complementary materials to Portland cement and recycled aggregates of concrete. This study aims to investigate the durability of concrete produced with recycled aggregate of concrete (AGRC) using the red mud (LV) treated thermally as a substitute for the cement, analyzing water absorption by immersion, which depends mainly on the total porosity of the concrete, and capillary absorption, in which it is influenced by connectivity and pore diameter. The results show that the combination of LV and AGRC increases water absorption by immersion and capillarity. This is due to the Pozolan reaction of LV and the porosity of the AGRC.

Keywords: Bauxite Residue, Concrete, Durability, Water absorption by immersion and capillary actions, Recycled Concrete Aggregate.

4.3 INTRODUÇÃO

Atualmente, a indústria da construção é uma grande consumidora de agregados naturais, além de ser uma grande produtora de muitos agregados de resíduos (WU et al., 2018), por exemplo o concreto é composto de 75-80% de agregados, isso provocaria um esgotamento de recursos naturais e emissões significativas de CO₂ devido a produção desses agregados (MEDJIGBODO et al., 2018). Outro material muito consumido é o cimento, aditivos minerais tornaram-se o caminho comum usado para reduzir o impacto ambiental da sua fabricação (DEBOUCHA et al., 2015). Em virtude disso, busca-se superar essas situações usando subprodutos de materiais complementares ao cimento, resíduo de bauxita e agregados reciclados de concreto. As adições ao cimento melhoram certas características do concreto e preservam o ambiente ao aproveitar

resíduos, diminuir as emissões de gases e também diminuir a extração de matéria-prima

O agregado reciclado de concreto constitui a maior parte do volume global de agregados de resíduos e, portanto, tem atraído muita atenção tanto da preservação ambiental como da preservação de recursos, no que diz respeito ao seu uso efetivo na indústria da construção (HU; WANG; KIM, 2013). Esse tipo de agregado é produzido a partir de concreto demolido e suas propriedades são determinadas pelas argamassas aderidas (XIAO et al., 2013).

O resíduo de bauxita (RB) é gerado no beneficiamento da bauxita para a retirada do alumínio denominado “processo Bayer” e tem quatro etapas: digestão, clarificação, precipitação e calcinação (LIMA et al., 2017). Quando o RB está *in natura*, a incorporação dele no concreto gera um impacto negativo, absorvendo mais água e diminuindo a fluidez (TANG et al., 2018). Ele é principalmente constituído de óxido de alumínio (Al_2O_3), óxido de ferro (Fe_2O_3) e óxido de silício (SiO_2) (PIMENTEL et al., 2016), sendo um material promissor para substituição de cimento.

Existem uma relação entre a vida útil (durabilidade) e os impactos ambientais do concreto, estudos anteriores focaram na durabilidade de concretos com RB ou agregado reciclado de concreto. A durabilidade de concretos pode ser identificada através dos ensaios de absorção de água por imersão e absorção de água por capilaridade, no qual depende da porosidade e a capacidade de um fluido penetrar na microestrutura do concreto respectivamente (KURDA; DE BRITO; SILVESTRE, 2019). Desta maneira, propõe-se realizar um tratamento térmico no RB para melhorar suas propriedades e avaliar a sua influência, ativada termicamente, na durabilidade do concreto produzido com agregado gráudo reciclado de concreto (AGRC), analisando absorção por imersão e capilaridade dos novos concretos.

4.4 MATERIAIS E MÉTODOS

O resíduo de bauxita (RB) utilizado no estudo foi obtido a partir de uma refinaria de alumina em Barcarena, município do estado do Pará. Para aumentar a reatividade do material RB, seria necessário desestruturar a Gibssita para produzir óxido de alumínio amorfo, isso seria possível com a calcinação do

mesmo, onde a temperatura de decomposição do mesmo fica em torno de 575°C (2H), na prática (DRX) observou-se que a 600°C ainda apresentava a Gibssita, e a 700°C apresentou os mesmos resultados do RB calcinado a 800°C e 1000°C, então optou-se pela temperatura de calcinação de 700°C, por ser economicamente mais viável para produzir (menor consumo de energia).

O processo de calcinação transcorreu em um forno do tipo mufla, com taxa de aquecimento de 10°C/min. O material só foi colocado no forno após ele atingir a temperatura desejada de queima (700°C), permanecendo no forno por 2 horas. Após a calcinação, a amostra foi retirada da mufla para resfriamento natural, ou seja, o recipiente (cadinho) contendo o material foi disposto em temperatura ambiente no laboratório até total resfriamento por cerca de 24 horas. Posteriormente, o material foi para moagem em um moinho de esferas de alumina por 2h, com razão de 1kg de material para 3kg (1:3) de esferas e então armazenado para análises posteriores.

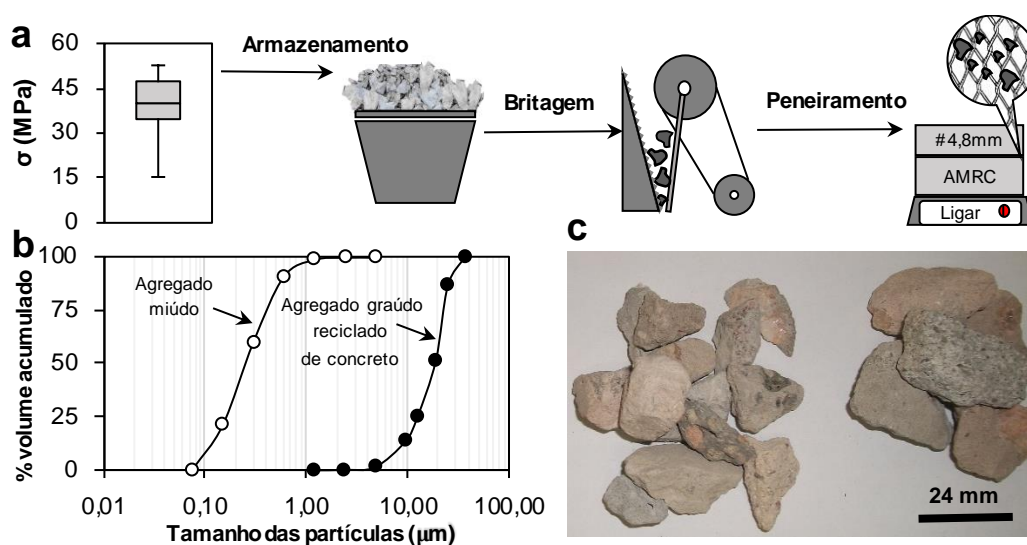
O agregado graúdo reciclado foi obtido a partir de amostras de concreto convencional, produzidas no laboratório de engenharia civil da UFPa, disponibilizadas para esta pesquisa. As amostras foram recolhidas para ensaio de compressão axial, para então poder classificá-las em classes de resistência. Posteriormente, essas amostras foram britadas em um britador mecânico de mandíbula, com abertura da mandíbula constante, para não alterar as propriedades mecânicas dos agregados. O material foi então peneirado, e como critério de separação granulométrica foi considerado todo material retido na peneira de 4,8 mm como agregado graúdo reciclado. A o agregado graúdo natural (brita) foi proveniente da britagem de rochas graníticas. O cimento utilizado foi o CP V ARI (alta resistência inicial) por não conter adições minerais, com a adição de aditivo superplastificante para manter a consistência da amostra para moldagem.

Uma premissa importante do presente estudo é que os agregados reciclados de concreto apresentam Ca(OH)_2 (SHAIKH, 2017) em sua composição, podendo servir como uma fonte adicional de portlandita para as novas misturas de concretos além dos gerados por meio da hidratação do cimento Portland. Para obtenção do agregado reciclado utilizado nesse estudo foram utilizadas

amostras de concretos disponíveis no Laboratório de Engenharia Civil (LEC) da UFPa. As amostras foram ensaiadas à compressão, por isso a classe de resistência dos concretos que originaram o agregado reciclado era conhecida (Figura 4a), após o ensaio à compressão as amostras foram armazenadas, em seguida, britadas em um britador de mandíbulas e beneficiadas por peneiramento. O material que ficava retido na peneira de abertura 4,8 mm era considerado como agregado graúdo reciclado de concreto (AGRC), que foi utilizado para produzir os concretos.

O AGRC apresentou uma granulometria bem graduada (Figura 4b) com massa específica de 2320 Kg/m³ e diâmetro máximo de 25 mm, a morfologia é equidimensional com arestas bem definidos (Figura 4c), a textura é áspera e típica de agregados angulosos obtidos por processo de britagem. Como agregado miúdo, utilizou-se uma areia de origem quartzosa com massa específica de 2650 Kg/m³, sua granulometria é apresentada na figura 4b.

Figura 4 – Processamento do agregado reciclado (a), granulometria dos agregados (b) e morfologia do agregado reciclado (c).

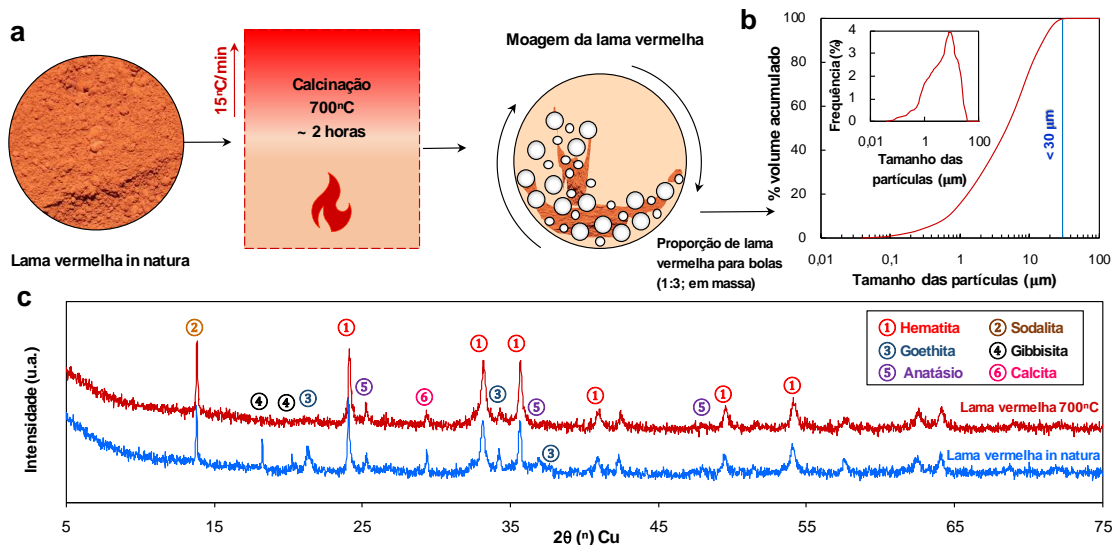


As tentativas de uso do resíduo de bauxita como material suplementar ao cimento Portland já não é novidade, entretanto a forma de incorporação desse material é realizada em geral no estado *in natura* sem nenhum beneficiamento, neste estudo o resíduo de bauxita foi beneficiado por meio de tratamento térmico em um forno mufla em temperatura de 700°C por duas horas, seguido de moagem por 1 hora (Figura 5a). Esse processo gerou um resíduo de bauxita cuja granulometria apresentou grãos inferiores a 30 μm e diâmetro médio das

partículas de 8 μm (Figura 5b). Além disso, a calcinação do resíduo de bauxita, permitiu que o mineral gibbsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$) se desestruturasse permitindo que o alumínio (Al_2O_3) do material ficasse no estado amorfo (Figura 5c).

A temperatura de 700°C foi escolhida por ser a temperatura na qual a gibbsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$) se desidroxilou por completo, apesar de a caracterização da amostra revelar que em 600°C esse fenômeno já ocorresse, na prática durante a calcinação, por ser uma quantidade (massa) de material maior que usada na queima para caracterização, a gibbsita ainda era revelada no ensaio de DRX, já que a quantidade de material usado na calcinação para caracterização era bem inferior (cerca de 100g). Existiam duas possibilidades para alcançar essa condição de transformação total da gibbsita em Al_2O_3 amorfo, aumentando o tempo de queima, ou aumentando a temperatura, para o caso do presente estudo, optou-se por aumentar a temperatura.

Figura 5 – Processamento (a), granulometria a laser (b) e análise mineralógica do resíduo de bauxita (c) por difração de raios X.



Além desses materiais, utilizou-se o cimento Portland (CP V) com massa específica de 3150 Kg/m^3 por esse não conter nenhuma adição mineral além de fíler calcário, aditivo superplastificante 3º geração de massa específica de 1090 Kg/m^3 e água potável com pH 6,5. A caracterização química dos materiais revelou que o resíduo de bauxita é rico em SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 (Tabela 4)

Tabela 4 – Caracterização química do resíduo de bauxita e do cimento Portland.

Material	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	PF
Resíduo de bauxita	18,70	23,00	31,70	0,16	<0,10	1,51	11,40	<0,10	6,23	<0,10	4,74
Cimento	31,00	9,70	3,51	-	4,02	44,83	0,18	0,90	-	-	4,65

após realização dos ensaios de caracterização dos agregados e do resíduo de bauxita, iniciou-se a produção dos concretos definidos do plano de trabalho com a moldagem dos corpos-de-prova. A dosagem foi feita de acordo com o método do Instituto de Pesquisas Tecnológicas da Universidade de São Paulo (IPT). No qual é produzido um concreto controle, onde o teor de substituição tanto para resíduo de bauxita quanto para o agregado graúdo reciclado será de 0%. Em seguida, foram confeccionados concretos com substituição do agregado graúdo natural por agregado graúdo reciclado do concreto em teores de 0%, 50% e 100% (esses teores foram escolhidos por serem pouco usual na literatura, em geral as substituições chegam a ser até 50%, poucos trabalhos fazem uso de 100%). Assim como teores de 0%, 5%, 10% e 15%, em volume, para substituição de cimento Portland por resíduo de bauxita calcinado, estes teores são baseados em dados de um estudo piloto realizado no laboratório da UFPA que revelou que teores acima de 20% eram muito prejudiciais as propriedades do concreto, por isso optou-se por utilizar esses valores de teores. Para evitar mais variáveis no estudo e manter a consistência do concreto, foi fixada a relação água/cimento (a/c) e adicionado aditivo superplastificante, respectivamente. A tabela abaixo apresenta o consumo dos materiais utilizados.

Tabela 5 – Consumo dos materiais em Kg/m³

Concreto	Cimento	Resíduo Bauxita	Areia	AGN	ARC	Água	Aditivo
0ARC0RB	356,60	-	734,60	1048,41	-	213,96	0,71
0ARC5RB	338,77	17,83	734,60	1048,41	-	213,96	1,71
0ARC10RB	320,94	35,66	734,60	1048,41	-	213,96	1,71
0ARC15RB	303,11	53,49	734,60	1048,41	-	213,96	1,93
50ARC0RB	347,82	-	716,50	511,29	511,29	208,69	1,04
50ARC5RB	330,43	17,39	716,50	511,29	511,29	208,69	1,11
50ARC10RB	313,04	34,78	716,50	511,29	511,29	208,69	1,15
50ARC15RB	295,65	52,17	716,50	511,29	511,29	208,69	1,15
100ARC0RB	339,46	-	699,28	-	998,00	203,67	1,02
100ARC5RB	322,48	16,97	699,28	-	998,00	203,67	1,09
100ARC10RB	305,51	33,95	699,28	-	998,00	203,67	1,12
100ARC15RB	288,54	50,92	699,28	-	998,00	203,67	1,12

Após a pesagem dos formantes do concreto, eles foram adicionados na betoneira. Os concretos foram confeccionados em uma betoneira de eixo inclinado com capacidade para 150 litros. Posteriormente, adicionou-se o agregado graúdo pré-misturado com parte da água, e deixado misturar por 30 s. Em seguida, adicionou-se areia, cimento e o resíduo de bauxita, em seguida misturou-se por mais 30 s. Por fim, adicionou-se o agregado graúdo reciclado juntamente com o restante da água misturada com o aditivo. A pasta de concreto foi misturada por mais 5 min, resultando em um período de mistura total de 6 min. Foram moldados corpos-de-prova cilíndricos de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura, e armazenados em ambiente de laboratório pelo tempo de 24 h. Os corpos-de-prova foram desmoldados e colocados à cura imersa em água saturada com hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), com temperatura de $28 \pm 2^\circ\text{C}$ até 28 dias, idade na qual os corpos-de-prova foram submetidos aos ensaios mecânicos. Para realização dos ensaios mecânicos, foi feita a retificação dos corpos-de-prova, através da retifica com serra diamantada, a qual realiza um polimento na superfície, regularizando-a. Além disso, para alguns corpos-de-prova foi feito o capeamento com disco de borracha de neoprene, para regularizar as imperfeições. Os ensaios de resistência à compressão axial (ABNT NBR 5739:2007), resistência à tração por compressão diametral (ABNT NBR 7222:2011) e módulo de elasticidade estático (ABNT NBR 8522:2017) foram realizados na prensa mecânica da marca EMIC. O ensaio do módulo de elasticidade estático contou com o uso de extensômetros para permitir o controle preciso de aplicação de carga e para aquisição de pontos de deformação que permitam um cálculo adequado dos resultados obtidos.

A absorção de água por imersão foi determinada de acordo com a norma NBR 9778:1987. Primeiramente, determinou-se a massa da amostra seca exposta ao ar, logo após manteve a uma temperatura de $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ durante 3 dias. Após passar pelo resfriamento determinou a massa seca (M_s). Completado o procedimento da estufa foi realizado a imersão da amostra em água durante 72 horas. Posteriormente, colocou-se os corpos de prova em um recipiente cheio d'água que foi progressivamente levado à ebulição, onde a ação na água durou 5 horas. Finalmente, com a perda natural de calor da água, mediu a massa

imersa (M_i) com o auxílio de uma balança hidrostática e a massa saturada (M_{sat}).

Para a absorção de água por capilaridade foi realizado o ensaio segundo a norma ASM C1585 – 13. Inicialmente, determinou-se a massa da amostra seca exposta ao ar, logo após manteve à uma temperatura de (105 ± 5) °C até a constância de massa, considerou-se que a massa é constante, quando a diferença entre duas pesagens consecutivas, do mesmo corpo de prova, não exceder do 0,5% do menor valor obtido, dentro de um período de 24 horas na estufa. Após o resfriamento das amostras, selou a superfície lateral delas com impermeabilizante e a extremidade que não foi exposta a água usou uma folha plástica folgada fixada com um faixa elástica. Posteriormente, mediu a massa seca da amostra e quatro diâmetros da superfície de molhagem. Finalmente, posicionou-se os corpos de prova sobre suportes, preenchendo com água o recipiente de ensaio, de modo que o nível de água permaneça em constância de 1 a 3mm evitando a molhagem de outras superfícies. Após o início do ensaio registrou as massas com 5 mim, 10 mim, 20 mim, 1h, 2h, 3h, 4h, 5h, 6h, 24h, 48h, 72h, 96h, 120h, 144h e 168h contadas sempre a partir da colocação das amostras.

4.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados foram analisados quando a sua normalidade por meio de teste de Shapiro-Wilk, e quanto a sua homocedasticidade por meio do teste de Levene, caso os dados apresentassem uma distribuição normal e homogeneidade das variâncias, estes foram comparados utilizando-se Anova de uma via com análise múltipla de Tukey, por haver mais de duas condições experimentais, e representação gráfica de barras representando a média com as barras de erros representando \pm o desvio padrão, caso contrário, os dados foram analisados utilizando-se Anova de Kruskal-Wallis com comparação múltipla de Simes-Hochberg, com representação gráfica de diagrama de caixas. Foram consideradas diferenças estatísticas quando $P < 0,05$.

4.5.1 Efeitos do resíduo de bauxita nas propriedades mecânicas dos concretos

Para os três grupos de substituição de agregado graúdo natural por AGRC analisados (0%, 50% e 100%), foi menor a resistência à compressão das amostras na medida que a substituição do cimento por resíduo de bauxita aumentava (0%, 5%, 10% e 15%), com resultado estatisticamente significativo representado nas figuras 6, 7 e 8. Pode-se observar a degradação da resistência em amostras com até 10% de substituição por resíduo de bauxita, provavelmente devido ao resíduo de bauxita apresentar propriedades pozolânicas inferiores ao cimento Portland. Ainda que o resíduo de bauxita tenha uma boa capacidade de preenchimento dos poros devido ao tamanho médio de suas partículas serem menores que 10 μm (Senff, Hotza e Labrincha, 2011), esse comportamento não é suficiente para compensar a menor reatividade química em comparação com o cimento. Entretanto, em 15% de substituição, observa-se que os valores de resistência mantêm-se próximos aos de 10%, o que pode ser explicado pela reação entre o Ca(OH)_2 com a alumina presente no resíduo da bauxita, a qual produz aluminatos de cálcio (Gordon, Pinnock e Moore, 1996) e componentes cimentícios responsáveis pela manutenção e aumento da resistência em idades avançadas.

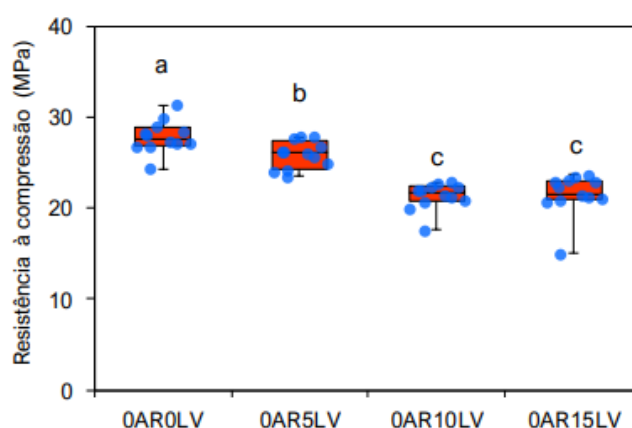


Figura 6: Resposta à resistência à compressão para os concretos com 0% de substituição do agregado e com substituição do cimento por resíduo de bauxita para os teores do estudo. Anova de Kruskal-Wallis com comparação múltipla de Simes-Hochberg: $H = 37,143$; $p\text{-value} = 4,29 \cdot 10^{-8}$

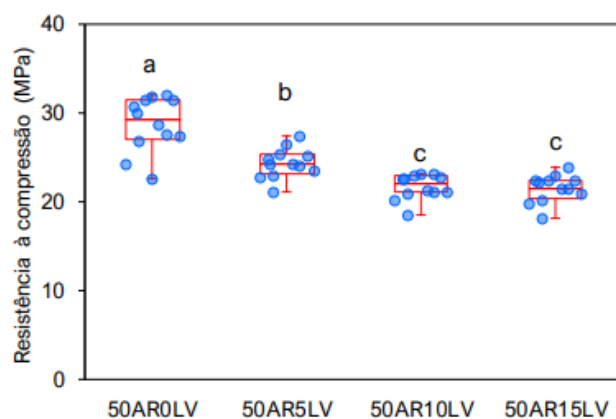


Figura 7: Resposta à resistência à compressão para os concretos com 50% de substituição do agregado graúdo natural pelo AGRC e com substituição do cimento por resíduo de bauxita para os teores do estudo. Anova de Kruskal-Wallis com comparação múltipla de Simes-Hochberg: $H = 31,101$; $p\text{-value} = 8,09 \cdot 10^{-7}$.

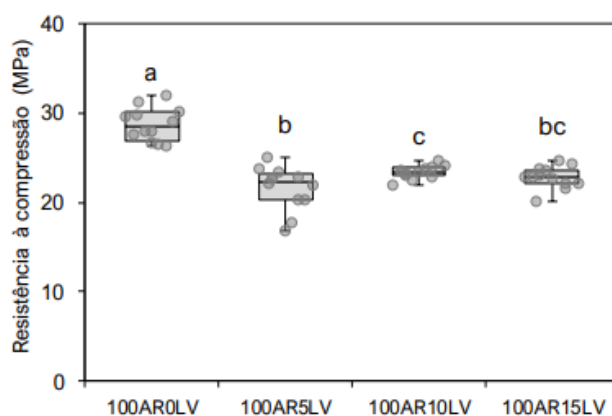


Figura 8: Resposta à resistência à compressão para os concretos com 100% de substituição do agregado graúdo natural pelo AGRC e com substituição do cimento por resíduo de bauxita para os teores do estudo. Anova de Kruskal-Wallis com comparação múltipla de Simes-Hochberg: $H = 29,460$; $p\text{-value} = 1,79 \cdot 10^{-7}$.

Para os grupos com 0%, 10% e 15% de substituição do cimento por resíduo de bauxita, os teores crescentes de AGRC pouco influenciaram nos resultados de resistência à compressão das amostras, obtendo resultados não significativos. Os resultados são apresentados na figura 9. Esse efeito pode ser devido a reação pozolânica do hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) presente na matriz com os óxidos SiO_2 e Al_2O_3 presentes na resíduo de bauxita, a qual produz géis adicionais de C-S-H e C-A-S-H, além de densificar a zona de transição interfacial do agregado graúdo reciclado com a matriz da argamassa (Malhotra and Mehta, 2002). Entretanto, para o grupo de 5% de substituição de cimento por resíduo de bauxita, observa-se um declínio de resistência para o maior teor de substituição de agregado graúdo natural por agregado graúdo reciclado. A resistência do concreto é determinada pela qualidade dos agregados incorporados na mistura.

Logo, a zona de transição interfacial presente no concreto com agregado reciclado é mais fraca devido à presença da argamassa antiga aderida (Thomas, Thaickavil e Wilson, 2018). Ademais, devido a taxa de substituição pequena, possivelmente as partículas do resíduo de bauxita não preencheram a maioria dos poros, diminuindo a densidade da amostra e, conseqüentemente, sua resistência.

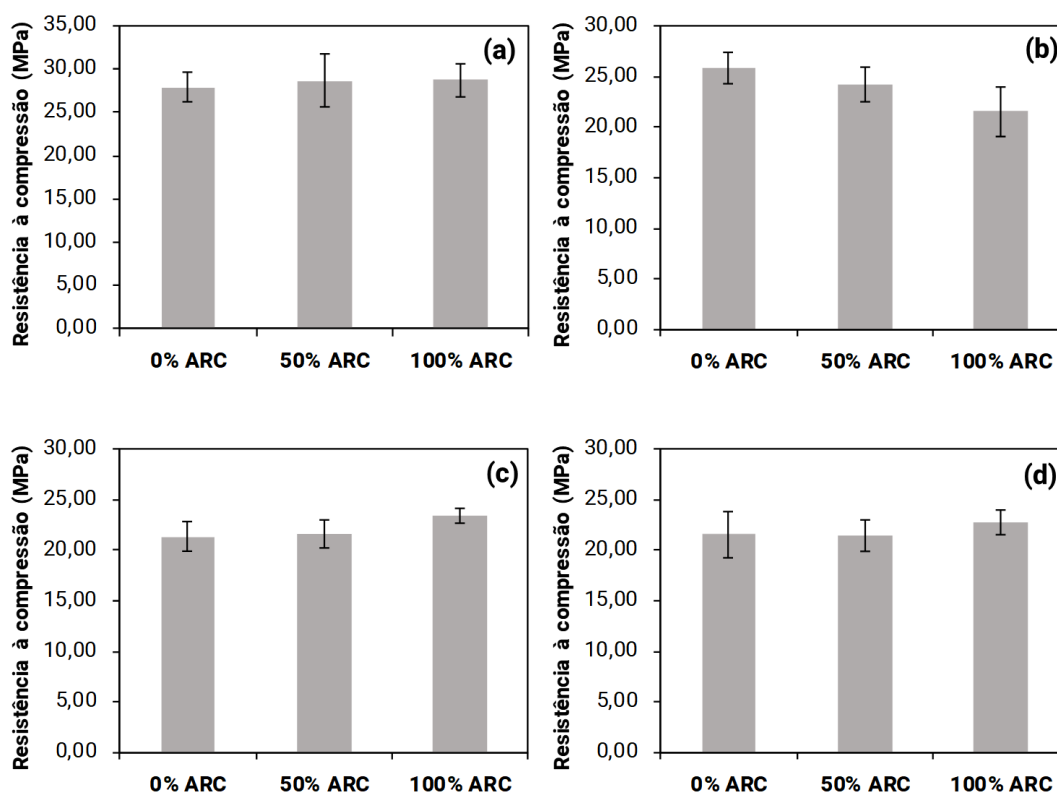


Figura 9: Resposta à resistência à compressão para os concretos sem substituição (a), com substituição de 5% (b), substituição de 10% (c) e substituição de 15% (d) do cimento por resíduo de bauxita e com substituição do agregado graúdo natural pelo AGRC para os teores do estudo.

Para dois grupos de substituição de agregado graúdo natural por AGRC analisados (0% e 100%), a substituição de resíduo de bauxita não alterou de forma estatisticamente significativa a resistência à tração das amostras de concreto, com os resultados apresentados nas figuras 10 e 12. Dessa forma, os valores de resistência à tração mantêm-se próximos aos do concreto de referência para 28 dias. Entretanto, para idades mais avançadas, podem ocorrer ganhos de resistência à tração nas amostras, em função da cura interna, proporcionada pela porosidade da partícula do resíduo de bauxita, que absorve

mais água no estado fresco para então liberá-la posteriormente em maiores idades, contribuindo para o processo de hidratação (Liu e Poon, 2016).

Não obstante, para os teores de 50% de substituição de agregado graúdo reciclado do concreto, o resíduo de bauxita alterou a resistência, de forma a diminuir conforme a substituição de cimento por resíduo de bauxita aumentava (0%, 5%, 10% e 15%), com resultados estatisticamente significativos apresentados na figura 11. Como discutido anteriormente, a razão pode ser devida as menores propriedades pozolânicas do resíduo de bauxita em relação ao cimento. Ademais, a porosidade característica do AGRC, devido à presença da argamassa antiga aderida na superfície do agregado, pode também prejudicar a resistência do concreto, aumentando a absorção de água em sua superfície (Thomas, Thaickavil e Wilson, 2018). Entretanto, é necessário o estudo em idades avançadas para confirmar a reação dos aluminossilicatos com as reservas de Ca(OH)_2 encontradas no ARGC, viabilizando a manutenção da resistência.

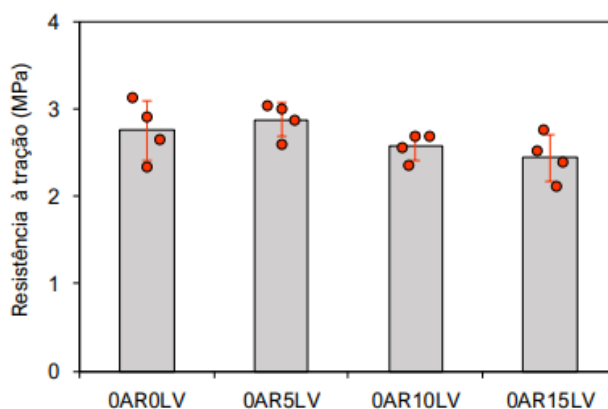


Figura 10: Resposta a resistência à tração para os concretos com 0% de substituição do agregado e com substituição do cimento por resíduo de bauxita para os teores do estudo. Anova de uma via, complementada pelo teste de Tukey.

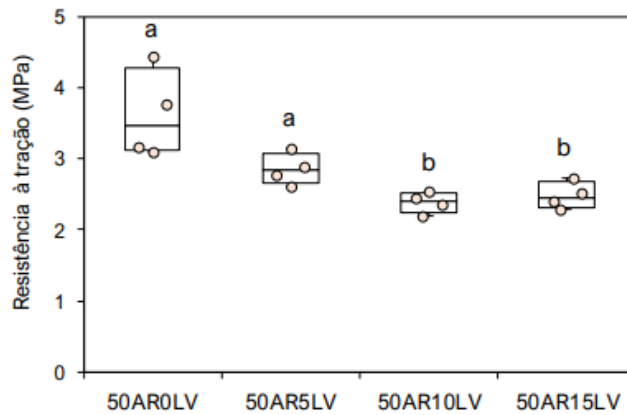


Figura 11: Resposta à resistência à tração para os concretos com 50% de substituição do agregado e com substituição do cimento por resíduo de bauxita para os teores do estudo. Anova de Kruskal-Wallis com comparação múltipla de Simes-Hochberg: $H = 11,977$; $P\text{-value} = 0,007$.

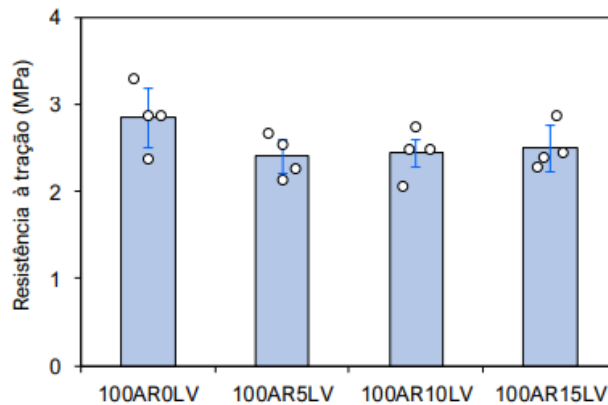


Figura 12: Resposta a resistência à tração para os concretos com 100% de substituição do agregado e com substituição do cimento por resíduo de bauxita para os teores do estudo. Anova de uma via, complementada pelo teste de Tukey.

Para os grupos com 5%, 10% e 15% de substituição do cimento por resíduo de bauxita, os teores crescentes de AGRC pouco influenciaram nos resultados de resistência à tração dos concretos, com resultados não significativos em cada teor de resíduo de bauxita. Os resultados são apresentados na figura 13. Porém, para o grupo sem adição de resíduo de bauxita, observa-se um pico de aumento de resistência para a substituição do agregado graúdo natural por AGRC. Esse efeito pode ser atribuído a eficiência da zona de transição interfacial formada no concreto com AGRC (Etxeberria *et al.*, 2007). Além disso, como não foi possível observar efeito negativo na resistência à tração dos concretos produzidos com AGRC, pode-se inferir que o agregado e a matriz da argamassa possuem boas características de ligação, apresentando resultados de ruptura similares aos do concreto de referência (Sagoe-Crentsil, Brown e Taylor, 2001).

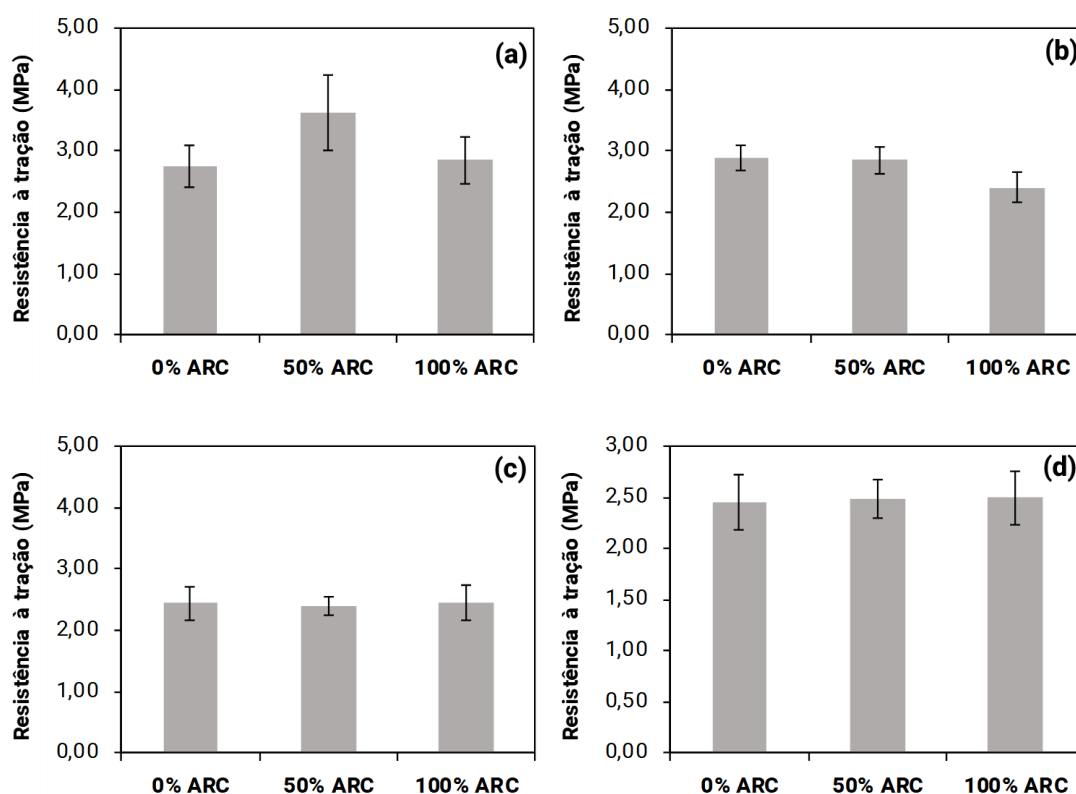


Figura 13: Resposta à resistência à tração para os concretos sem substituição (a), com substituição de 5% (b), substituição de 10% (c) e substituição de 15% (d) do cimento por resíduo de bauxita e com substituição do agregado graúdo natural pelo AGRC para os teores do estudo.

Para os três grupos de substituição de agregado graúdo natural por AGRC analisados (0%, 50% e 100%), a indução do resíduo de bauxita, mesmo em relação ao maior teor de substituição (15%), não alterou de forma estatisticamente significativa o módulo de elasticidade das amostras de concreto, apresentados nas figuras 14, 15 e 16. Logo, pode-se concluir que o resíduo da bauxita não prejudica o módulo de elasticidade dos concretos. Isso pode ser explicado pelo fato de que o resíduo de bauxita, ao ser calcinado, liberou alumina a partir da desidroxilação da gibbisita (Manfroi, 2009) e, a partir da reação com a Portlandita, melhorou a formação de produtos de hidratação, como o C-A-S-H, que melhoram os resultados de resistência, já que o módulo de elasticidade aumenta quando a resistência à compressão aumenta. Entretanto, deve-se atentar para o aumento no módulo da amostra com os maiores teores, tanto de resíduo de bauxita quanto de AGRC (15% de resíduo de bauxita e 100% de AGRC). Esse efeito pode ter sido causado pelo desvio padrão anômalo de uma única amostra, já que essa tendência não é observada

nos resultados de resistência à compressão discutidos anteriormente, para o grupo em questão.

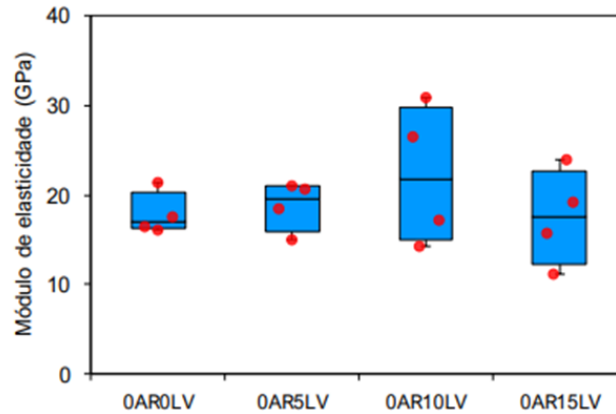


Figura 14: Resposta ao módulo de elasticidade para os concretos com 0% de substituição do agregado e com substituição do cimento por resíduo de bauxita para os teores de estudo. Anova de Kruskal-Wallis com comparação múltipla de Simes-Hochberg: $H = 0,727$; $p\text{-value} = 0,841$.

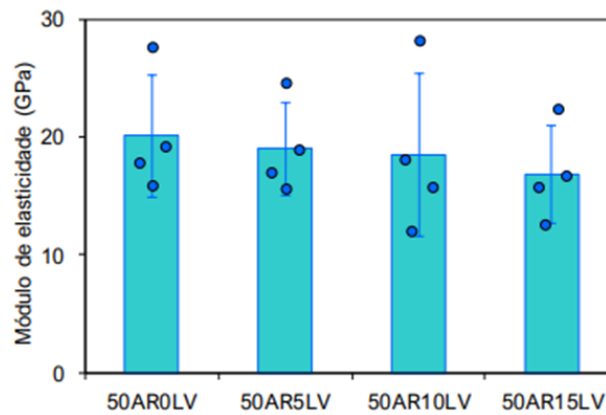


Figura 15: Resposta ao módulo de elasticidade para os concretos com 50% de substituição do agregado e com substituição do cimento por resíduo de bauxita para os teores de estudo. Por causa das variâncias homogêneas encontradas no teste de homocedasticidade, utilizou-se a análise Anova de uma via, complementada pelo teste de Tukey.

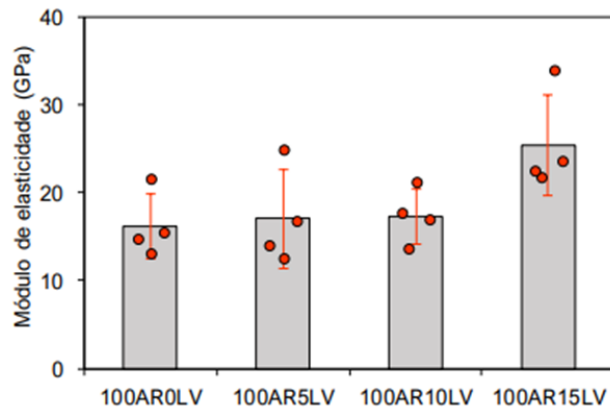


Figura 16: Resposta ao módulo de elasticidade para os concretos com 100% de substituição do agregado e com substituição do cimento por resíduo de bauxita para os teores de estudo. Por causa das variâncias homogêneas encontradas no teste de homocedasticidade, utilizou-se a análise Anova de uma via, complementada pelo teste de Tukey.

Para os grupos com 0% e 5% de substituição de cimento por resíduo de bauxita, os teores crescentes de AGRC pouco influenciaram nos resultados do módulo, com resultados não significativos para cada teor de resíduo de bauxita. Os resultados são apresentados na figura 17. Em 10% de substituição por resíduo de bauxita, observa-se que o aumento no teor de substituição do agregado graúdo natural pelo AGRC promove a redução do módulo de elasticidade das amostras. Essa situação pode ter ocorrido por causa de micro fissuras presentes no AGRC, na sua zona de transição interfacial com a argamassa antiga, devido ao processo de britagem, o que leva a uma menor rigidez na matriz do concreto, resultando em uma zona de transição mais fraca entre o agregado reciclado e a argamassa (Thomas, Thaickavil e Wilson, 2018). Esse efeito de redução pode também ter sido influenciado pela densidade do AGRC, que é menor que a de um agregado graúdo natural, já que o módulo de elasticidade depende significativamente da densidade e módulo do próprio agregado utilizado (Neville, 1995). No grupo com os maiores teores de substituição para as duas variáveis (15% de resíduo de bauxita e 100% de AGRC), ocorreu um aumento não esperado no valor do módulo de elasticidade. Esse resultado, provavelmente, foi devido ao efeito de enchimento das partículas de resíduo de bauxita. Pois o fato delas alocarem-se nos poros aumenta a densidade da amostra e, conseqüentemente, aumentam seu módulo de elasticidade.

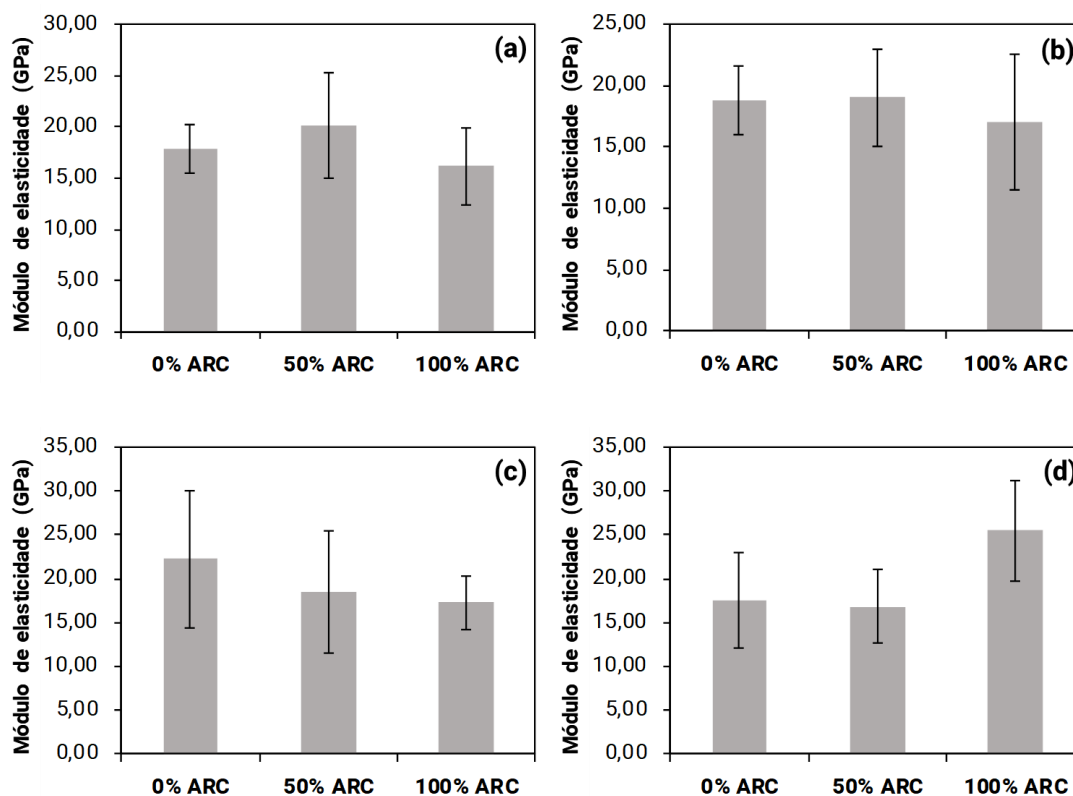


Figura 17: Resposta ao módulo de elasticidade para os concretos sem substituição (a), com substituição de 5% (b), substituição de 10% (c) e substituição de 15% (d) do cimento por resíduo de bauxita e com substituição do agregado graúdo natural pelo AGRC para os teores do estudo.

4.5.2 Efeitos do resíduo de bauxita nas propriedades de durabilidade dos concretos

A absorção de água por imersão (AAI) é um teste que de maneira indireta mede a porosidade acessível à água (KURDA; DE BRITO; SIRBESTRE, 2019). Nesse estudo a absorção de água por imersão foi determinada em 28 dias.

Em relação a influência do resíduo de bauxita (Figura 18), verifica-se que a sua presença na mistura do concreto não alterou de forma significativa a AAI, devido que a RB calcinada em 700 °C possui atividade pozolânica (MANFROI, 2009).

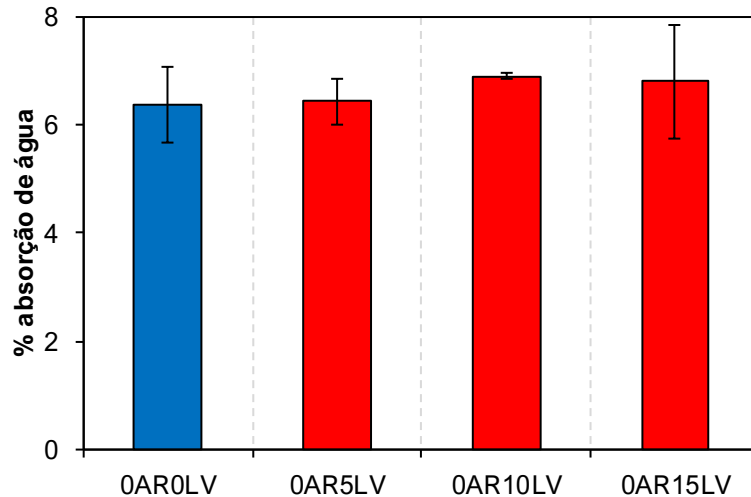


Figura 18 – Resposta na absorção de água por imersão em concretos substituição de cimento por resíduo de bauxita. Valores apresentados são a média e o desvio padrão. O teste de homocedastidade mostrou que as variâncias são homogêneas, por conta disso, utilizou-se a análise múltipla de Tukey aceitando a hipótese nula (H_0) e rejeitando a hipótese alternativa (H_1).

Semelhantemente o AGRC (Figura 19) não alterou de forma significativa a AAI quando aumenta o nível de incorporação. Isso ocorre porque o AGRC apresenta propriedades semelhante à do agregado natural.

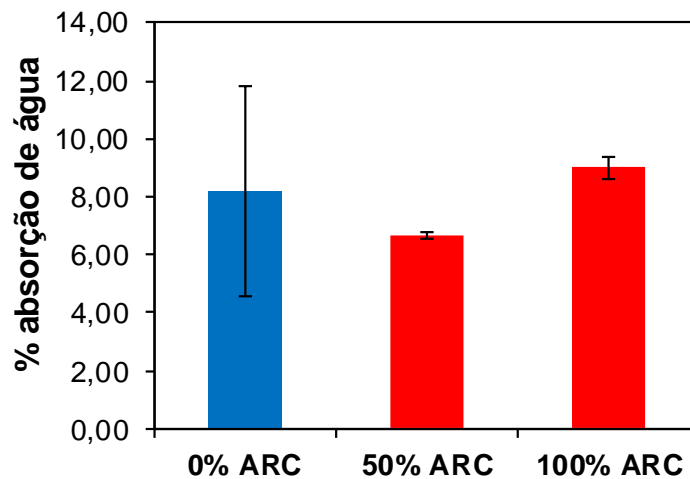


Figura 19 – Resposta na absorção de água por imersão em concretos com substituição de agregado graúdo por ARC. Valores apresentados são a média e o desvio padrão. O teste de homocedastidade mostrou que as variâncias são homogêneas, por conta disso, utilizou-se a análise múltipla de Tukey aceitando a hipótese nula (H_0) e rejeitando a hipótese alternativa (H_1).

Os efeitos nos concretos produzidos com 50% e 100% AGRC (Figura 20) quando há um aumento no teor de RB a AAI aumentou de forma significativa, apesar de não ser proporcional ao nível de incorporação. Assim como, as amostras de 5% e 15% de substituição de cimento por RB (Figura 21) e com o acréscimo de ARC cresceu de forma considerável a AAI. Esses resultados provavelmente estão relacionados com a fases porosas do AGRC (KRUGER; PEREIRA; CHINELATTO, 2017) e com a reação pozolânica da RB, no qual consome Ca(OH)_2 da pasta de cimento produzindo mais produtos de hidratação.

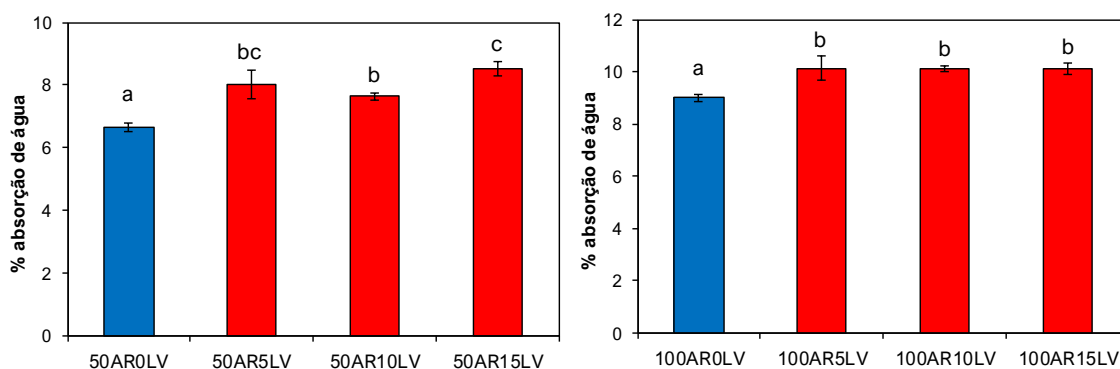


Figura 20 – Efeitos da substituição de cimento por RB na AAI em concretos com 50% e 100% de substituição de agregado graúdo por AGRC. Os valores mostrados são as médias e o desvio padrão. As vogais representam os agrupamentos das amostras. O teste de homocedastidade mostrou que as variâncias são homogêneas, por conta disso, utilizou-se a análise múltipla de Tukey rejeitando a hipótese nula (H_0) e rejeitando a hipótese alternativa (H_1).

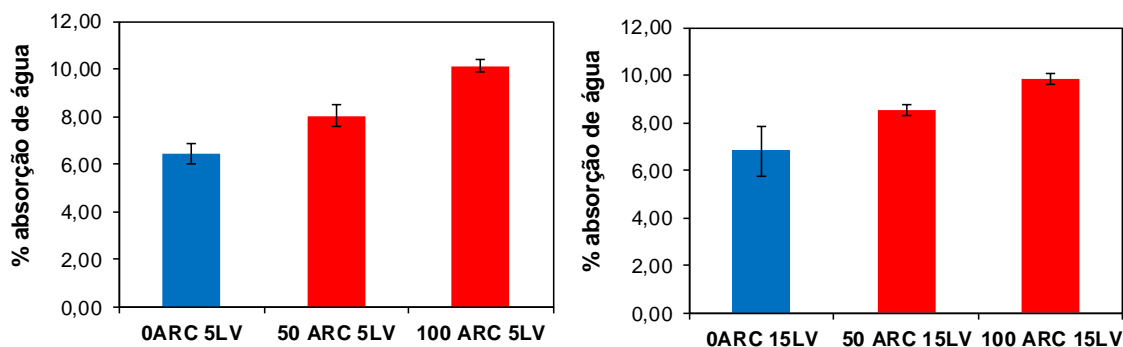


Figura 21 – Efeitos da substituição de agregado graúdo por AGRC nos concretos com 5% e 15% de substituição de cimento por RB. Os valores mostrados são as médias e o desvio padrão. O teste de homocedastidade mostrou que as variâncias são homogêneas, por conta disso, utilizou-se a análise múltipla de Tukey rejeitando a hipótese nula (H_0) e rejeitando a hipótese alternativa (H_1).

A absorção por capilaridade (AC) é um parâmetro que caracteriza a tendência de um líquido se espalhar sobre a superfície sólida. A força e a velocidade de subida capilar depende de parâmetros como densidade do líquido, raio médio de

poros, tensão superficial do líquido, ângulo de contato e aceleração gravitacional constante g (CNUUDE et al., 2008). Além disso, essas forças capilares são importantes para a retenção de água dentro do concreto. Portanto, nesse estudo foi analisado a absorção capilar inicial (5 mm – 6 h) e secundária (24 h – 192 h) em concretos com idade de 28 dias.

Com o acréscimo do teor de substituição de cimento por RB aumentou a absorção inicial, porém a secundária não houve uma diferença significativa (Figura 22). Isso ocorre devido a alumina presente no RB ter uma capacidade de refinar os poros da mistura (GOWDA et al., 2017).

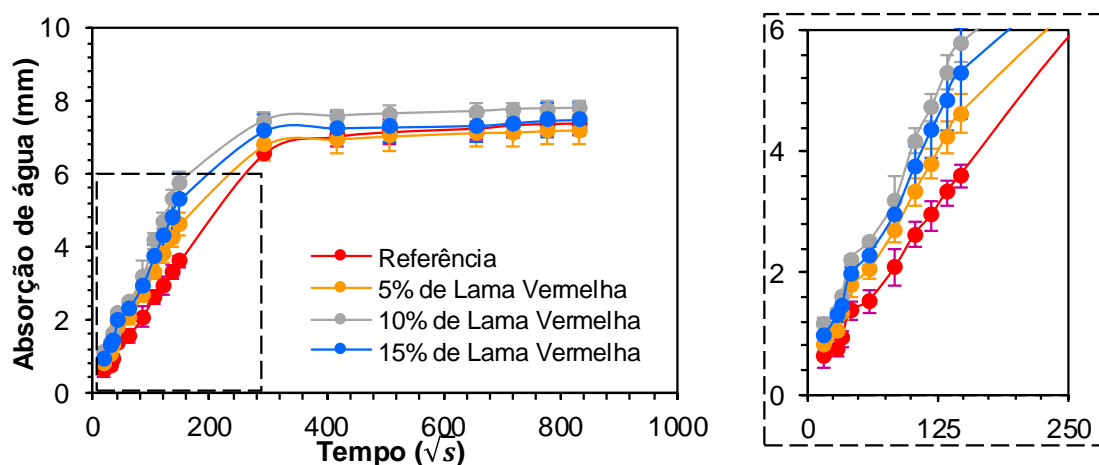


Figura 22 – Resposta na absorção de água por capilaridade em concretos substituição de cimento por resíduo de bauxita. Valores apresentados são a média e o desvio padrão dos pontos medidos. Em destaque está a absorção inicial (5 mm – 6 h).

No caso da substituição de agregado graúdo por AGRC aumentou a absorção capilar (Figura 22). Isto está associado ao tamanho dos poros, que começa a diminuir ao longo do tempo, devido ao aumento da formação de produtos de hidratação relacionado com argamassa antiga presa no AGRC (KURDA; DE BRITO; SILVESTRE, 2019).

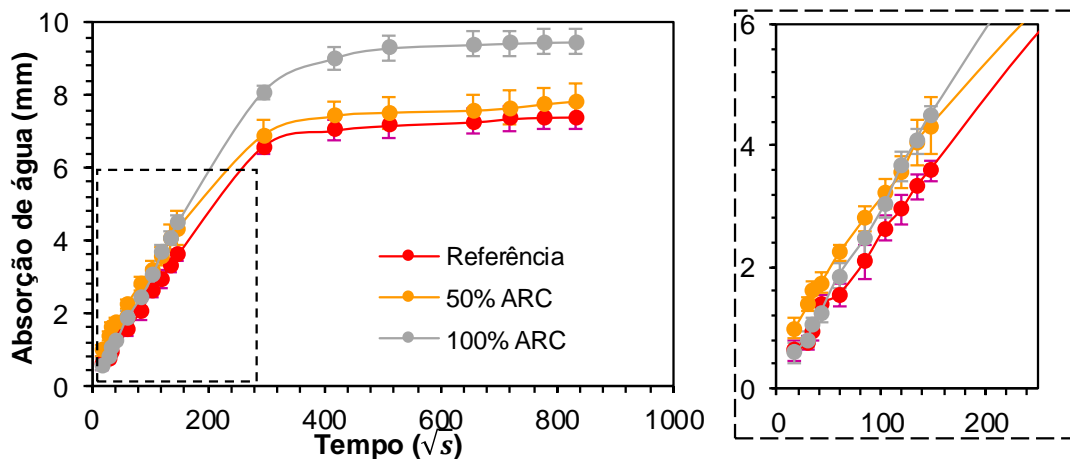


Figura 23 – Resposta na absorção de água por capilaridade em concretos com substituição de agregado graúdo por ARC. Valores apresentados são a média e o desvio padrão dos pontos medidos. Em destaque está a absorção inicial (5 mm – 6 h).

Os efeitos nos concretos produzidos com 50% AGRC (Figura 11) e 100% AGRC (Figura 12) quando há um aumento no teor de RB a absorção inicial não alterou de forma significativa, entretanto a absorção secundária foi maior. Esses resultados provavelmente estão relacionados com a porosidade do AGRC (KURDA; DE BRITO; SILVESTRE, 2019) e com a reação pozolânica da RB, no qual consome Ca(OH)_2 da pasta de cimento afinando os poros.

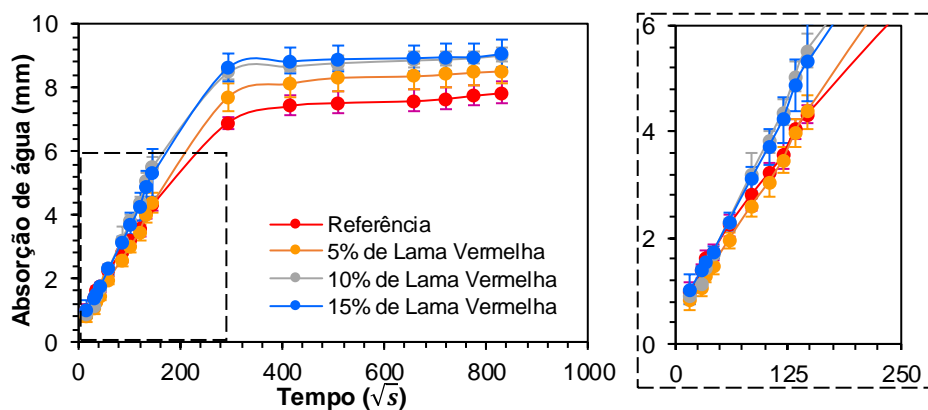


Figura 24 – Resposta na absorção de água por capilaridade em concretos 50% de ARC e com aumento no teor de resíduo de bauxita. Valores apresentados são a média e o desvio padrão dos pontos medidos. Em destaque está a absorção inicial (5 mm – 6 h).

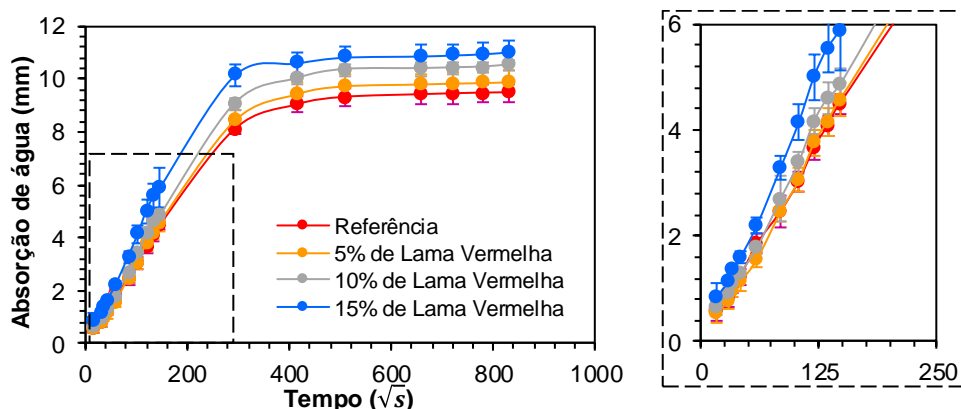


Figura 25 – Resposta na absorção de água por capilaridade em concretos 100% de ARC e com aumento no teor de resíduo de bauxita. Valores apresentados são a média e o desvio padrão dos pontos medidos. Em destaque está a absorção inicial (5 mim – 6 h).

4.6. CONCLUSÕES

- A influência do resíduo de bauxita (RB) calcinado nas propriedades mecânicas do concreto produzido com ARC foram avaliadas no presente estudo. Os resultados demonstram que o aumento do teor de RB prejudica a resistência à compressão, apresentando resultados menores que os do concreto de referência. Entretanto, em contraste com efeitos negativos dos valores de compressão, para a resistência à tração, com exceção do grupo de 50% de ARC, e para o módulo de elasticidade, o aumento do conteúdo de RB pouco influenciou em seus resultados. Esse efeito pode ser explicado a partir da reação entre as reservas de hidróxido de cálcio presentes no ARC com os aluminossilicatos presentes na composição do resíduo da bauxita, que contribuem para a manutenção da resistência. Ademais, a incorporação do agregado reciclado pouco influenciou nos resultados de resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade em maiores teores de incorporação.
- O resíduo de bauxita e o agregado reciclado de concretos quando analisados individualmente não alteram de forma significativa a absorção por imersão. Portanto, a porosidade dos concretos não muda consideravelmente com a incorporação do RB e do AGRC.

- Quanto a absorção por capilaridade percebemos que o RB e o AGRC diminuem os diâmetros dos poros fazendo que a velocidade de percolação aumente consideravelmente.
- Relacionando os efeitos combinados do RB e AGRC, a absorção por imersão, aumenta deixando o concreto mais poroso, e a absorção de água por capilaridade aumentou após 24 horas.
- Diante dos resultados é possível concluir que, em geral, o resíduo de bauxita calcinado incorporado em concretos produzidos com agregados graúdos reciclados de concreto, demonstram a viabilidade da substituição parcial do cimento, em teores controlados, em produtos como o concreto na construção civil.

4.7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45**. Agregados –Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Comitê: ABNT/CB-018 Cimento, Concreto e Agregados, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52**. Agregado miúdo –Determinação da massa específica e massa específica aparente. Comitê: ABNT/CB-018 Cimento, Concreto e Agregados, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53**. Agregado graúdo –Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Comitê: ABNT/CB-018 Cimento, Concreto e Agregados, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**. Agregados –Determinação da composição granulométrica. Comitê: ABNT/CB-018 Cimento, Concreto e Agregados, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739. Concreto-Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Comitê: **ABNT/CB-018** Cimento, Concreto e Agregados, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**. Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Comitê: ABNT/CB-018 Cimento, Concreto e Agregados, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**. Argamassa de Concreto Endurecido – Determinação de absorção de água, índice de vazios e massa específica. Comitê: ABNT/CB-018 Cimento, Concreto e Agregados, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697** - Cimento Portland - Requisitos, 2018.

ASM INTERNATIONAL C1585 – 13. Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes. **World Trade Organization Technical Barriers to Trade (TBT) Committee**, 2018.

CNUdde, V. et al. High-speed neutron radiography for monitoring the water absorption by capillarity in porous materials. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, **Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms**, v. 266, n. 1, p. 155–163, 2008.

DEBOUCHA, W. et al. Effect of incorporating blast furnace slag and natural pozzolana on compressive strength and capillary water absorption of concrete. **Procedia Engineering**, v. 108, p. 254–261, 2015.

GOWDA, R. et al. Effect of nano-alumina on workability, compressive strength and residual strength at elevated temperature of Cement Mortar. **Materials Today: Proceedings**, v. 4, n. 11, p. 12152–12156, 2017.

HU, J.; WANG, Z.; KIM, Y. Feasibility study of using fine recycled concrete aggregate in producing self-consolidation concrete. **Journal of Sustainable Cement-Based Materials**, v. 2, n. 1, p. 20–34, 2013.

KRUGER, P.; PEREIRA, E.; CHINELATTO, A. S. A. **Influência do agregado reciclado na durabilidade do concreto: uma revisão da bibliografia**. p. 253–265, 2017.

KURDA, R.; DE BRITO, J.; SILVESTRE, J. D. Water absorption and electrical resistivity of concrete with recycled concrete aggregates and fly ash. **Cement and Concrete Composites**, v. 95, n. October 2018, p. 169–182, 2019.

LIMA, M. S. S. et al. Red mud application in construction industry: Review of benefits and possibilities. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. Anais...2017

LEITE, M. B. (2001). **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de construção e demolição**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Tese (Doutorado), Porto Alegre.

MANFROI, E. P. **Avaliação da lama vermelha como material pozolânico em substituição ao cimento para produção de argamassas**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2009.

MEDJIGBODO, S. et al. How do recycled concrete aggregates modify the shrinkage and self-healing properties? **Cement and Concrete Composites**, v. 86, p. 72–86, 2018.

PIMENTEL, M. . et al. **Avaliação dos efeitos da temperatura na lama vermelha da região amazônica m. g. pimentel**. 2016

TANG, W. C. et al. Influence of red mud on fresh and hardened properties of self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 178, p. 288–300, 2018.

WU, C. R. et al. Improving the properties of recycled concrete aggregate with bio-deposition approach. **Cement and Concrete Composites**, v. 94, n. September, p. 248–254, 2018.

XIAO, J. et al. Properties of interfacial transition zones in recycled aggregate concrete tested by nanoindentation. **Cement and Concrete Composites**, v. 37, n. 1, p. 276–292, 2013.

DÍAZ, B.; FREIRE, L.; NÓVOA, X. R.; PÉREZ, M. C. Chloride and CO₂ transport in cement paste containing red mud. **Cement and Concrete Composites**, v. 62, p. 178–186, 2015.

DIMITRIOU, G.; SAVVA, P.; PETROU, M. F. Enhancing mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 158, p. 228–235, 2018.

GÓMEZ-SOBERÓN, J. M. V. Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate: An experimental study. **Cement and Concrete Research**, v. 32, n. 8, p. 1301–1311, 2002.

GORDON, J. N.; PINNOCK, W. R.; MOORE, M. M. A preliminary investigation of strength development in Jamaican red mud composites. **Cement and Concrete Composites**, 1996.

LIU, R. X.; POON, C. S. Utilization of red mud derived from bauxite in self-compacting concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 384–391, 2016.

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, n. 8, p. 847–853, 2011.

MANFROI, E. P. **Avaliação da lama vermelha como material pozolânico em substituição ao cimento para produção de argamassas**. p. 152, 2009.

PAINE, K. A.; DHIR, R. K. Recycled aggregates in concrete: a performance-related approach. **Magazine of Concrete Research**, v. 62, n. 7, p. 519–530, 2010.

PONTIKES, Y.; ANGELOPOULOS, G. N. Bauxite residue in cement and cementitious applications: Current status and a possible way forward. **Resources, Conservation and Recycling**, 2013.

RIBEIRO, D. V.; LABRINCHA, J. A.; MORELLI, M. R. Potential use of natural red mud as pozzolan for Portland cement. **Materials Research**, v. 14, n. 1, p. 60–66, 2011.

SAGOE-CRENTSIL, K. K.; BROWN, T.; TAYLOR, A. H. Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate. **Cement and Concrete Research**, v. 31, n. 5, p. 707–712, 2001.

SANTOS, S.; SILVA, P. R. DA; BRITO, J. DE. Self-compacting concrete with recycled aggregates – A literature review. **Journal of Building Engineering**, v. 22, n. August 2018, p. 349–371, 2019.

SENEFF, L.; HOTZA, D.; LABRINCHA, J. A. Effect of red mud addition on the rheological behaviour and on hardened state characteristics of cement mortars. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 1, p. 163–170, 2011.

SHAIKH, F. U. A. Mechanical properties of recycled aggregate concrete containing ternary blended cementitious materials. **International Journal of Sustainable Built Environment**, v. 6, n. 2, p. 536–543, 2017.

TAM, V. W. Y.; SOOMRO, M.; EVANGELISTA, A. C. J. A review of recycled aggregate in concrete applications (2000–2017). **Construction and Building Materials**, v. 172, p. 272–292, 2018.

THOMAS, J.; THAICKAVIL, N. N.; WILSON, P. M. Strength and durability of concrete containing recycled concrete aggregates. **Journal of Building Engineering**, v. 19, n. April, p. 349–365, 2018.

MALHOTRA V.M.; MEHTA P.K. **High-performance, high-volume fly ash concrete: materials, mixture proportioning, properties, construction practice, and case histories**. 2002.

NEVILLE A.M. **Properties of Concrete**. 1995.

5 CONCLUSÕES GERAIS

No presente estudo foram investigados os efeitos do resíduo de bauxita tratada termicamente como material suplementar ao cimento Portland, bem como sua interação com os concretos produzidos com agregado reciclado de concreto. O resíduo de bauxita analisado não apresentou um efeito químico substancial (reação pozolânica) sugerindo que a interação do material na matriz foi prioritariamente física.

As análises realizadas indicam que o cimento Portland pode ser substituído parcialmente por resíduo de bauxita, sem comprometer algumas propriedades mecânicas e de desempenho do concreto, trazendo oportunidades para as mineradoras, devido ao seu potencial de aplicação, e uma possível redução das emissões de CO₂ relacionadas a produção do cimento Portland para as indústrias cimenteiras, além da possibilidade de reduzir o montante deste material depositado em barragens de rejeitos, que atualmente, é o grande desafio para as indústrias do alumínio. Apesar de uma compreensão mais profunda sobre a interação das partículas do resíduo com o cimento serem de substancial importância, os resultados aqui encontrados têm consequências importantes para a elaboração de materiais como blocos de concretos, elementos pré-moldados, etc. por possuir em sua composição elementos que agregam requisitos da matéria prima do setor da construção civil, estudos estes que poderão ser analisados em pesquisas futuras.

6 SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

Como este trabalho não tinha por objetivo esgotar o tema sobre as possibilidades de reciclagem e reutilização/utilização dos resíduos de construção civil e do resíduo de bauxita na construção civil, elencamos a seguir algumas possibilidades de pesquisas futuras:

Deve-se estudar o desempenho dos concretos aqui produzidos a longo prazo, para entender os efeitos dessas variáveis no comportamento e durabilidade dos mesmos, com realização de ensaios para avaliação do comportamento das propriedades mecânicas com idade superior a 28 dias;

Realização dos ensaios de atividade pozolânica do resíduo de bauxita;

O sucesso na utilização desses materiais dependeria da capacidade de competir economicamente com os materiais naturais que estariam substituindo, incluindo os custos de processamento e do transporte, além de um fator fundamental, que é a durabilidade ao longo da vida prevista da aplicação construtiva;

A análise considerada ótima da utilização do resíduo de bauxita e dos agregados graúdos reciclados de concreto devem levar em conta os seguintes aspectos:

- 1) necessidade de redução da exploração dos recursos naturais;
- 2) degradação do meio ambiente;
- 3) consumo de energia;
- 4) aspectos econômicos dessa utilização, e
- 5) aspectos legais e sociais.

A Alunorte – refinaria de alumínio está fazendo parcerias com o Instituto SENAI de Inovação em Tecnologias Mineraias (ISI-TM) com foco em estudos para o aproveitamento do resíduo de bauxita resultante do processo de produção do refino da bauxita, que ocorre em sua refinaria Barcarena (PA). A empresa vai investir R\$ 6,5 milhões, em quatro anos, na execução de pesquisas com o objetivo de reduzir o impacto ambiental provocado pelos resíduos do refinamento da bauxita. A empresa pretende extrair o óxido de ferro contido no material descartado pela Alunorte no Depósito de Resíduo Sólido (DRS1), que utiliza um

processo mais moderno (Filtro Prensa) de redução do volume de água dos rejeitos; desenvolver um produto a ser usado pela agricultura para correção da acidez do solo; e criar uma matéria prima para a indústria do cimento.
<https://redepara.com.br/n/196872> acesso 25/01/2021

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTM INTERNATIONAL C1585 – 13. **Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes**. World Trade Organization Technical Barriers to Trade (TBT) **Committee**, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**. Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Comitê: ABNT/CB-018 Cimento, Concreto e Agregados, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**. Concreto- Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Comitê: ABNT/CB-018 Cimento, Concreto e Agregados, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778**. Argamassa de Concreto Endurecido – Determinação de absorção de água, índice de vazios e massa específica. Comitê: ABNT/CB-018 Cimento, Concreto e Agregados, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248**. Agregados –Determinação da composição granulométrica. Comitê: ABNT/CB-018 Cimento, Concreto e Agregados, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45**. Agregados –Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Comitê: ABNT/CB-018 Cimento, Concreto e Agregados, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52**. Agregado miúdo –Determinação da massa específica e massa específica aparente. Comitê: ABNT/CB-018 Cimento, Concreto e Agregados, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 53**. Agregado graúdo –Determinação da massa específica, massa específica aparente e

absorção de água. Comitê: ABNT/CB-018 Cimento, Concreto e Agregados, 2009.

CARNEIRO, J. et al. Red mud and electroplating sludge as coloring agents of distinct glazes: The influence of heat treatment. **Materials Letters**, v. 223, p. 166–169, 2018b.

CARNEIRO, J. et al. Red mud as a substitute coloring agent for the hematite pigment. **Ceramics International**, v. 44, n. 4, p. 4211–4219, 2018a.

CETEM. Rochas e minerais industriais: usos e especificações. [s.l: s.n.].

CNUUDE, V. et al. High-speed neutron radiography for monitoring the water absorption by capillarity in porous materials. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, **Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms**, v. 266, n. 1, p. 155–163, 2008.

DAVIDOVITS, J. **Cimento geopolimérico**: Uma revisão. 2015.

DEBOUCHA, W. et al. Effect of incorporating blast furnace slag and natural pozzolana on compressive strength and capillary water absorption of concrete. **Procedia Engineering**, v. 108, p. 254–261, 2015.

DÍAZ, B.; FREIRE, L.; NÓVOA, X. R.; PÉREZ, M. C. Chloride and CO₂ transport in cement paste containing red mud. **Cement and Concrete Composites**, v. 62, p. 178–186, 2015.

DIETEL, J. et al. The importance of specific surface area in the geopolymerization of heated illitic clay. **Applied Clay Science**, v. 139, p. 99–107, 2017.

DIMITRIOU, G.; SAVVA, P.; PETROU, M. F. Enhancing mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 158, p. 228–235, 2018.

DNER-ME - 093/94. Determinação da densidade Real, 1994.

DODOO-ARHIN, D. et al. Awaso bauxite red mud-cement based composites: Characterisation for pavement applications. **Case Studies in Construction Materials**, v. 7, n. June, p. 45–55, 2017.

DRUMMOND, J. A. Investimentos privados, impactos ambientais e qualidade de vida num empreendimento mineral amazônico o caso da mina de manganês de Serra do Navio (Amapá). **História, Ciências, Saúde Manguinhos**, vol. 6, p. 753-792, 2000.

ESSAIDI, N. et al. Effect of calcination temperature of Tunisian clay on the properties of geopolymers. **Ceramics – Silikáty**, v. 57, n. 3, p. 251–257, 2013.

ESSAWY, A. A.; ABD, S. Physico-mechanical properties, potent adsorptive and photocatalytic efficacies of sulfate resisting cement blends containing micro silica and nano-TiO₂. **Construction and Building Materials**, v. 52, p. 1–8, 2014.

ETXEBERRIA, M.; VÁZQUEZ, E.; MARÍ, A.; BARRA, M. Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 37, n. 5, p. 735–742, 2007.

ENVIRONMENT, U. N.; SCRIVENER, K. L.; JOHN, V. M.; GARTNER, E. M. Cement and Concrete Research Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. **Cement and Concrete Research**, vol. 114, p. 2–26, 2018.

FLORES, Y. C. et al. Performance of Portland cement pastes containing nano-silica and different types of silica. **Construction and Building Materials**, v. 146, p. 524–530, 2017.

GÓMEZ-SOBERÓN, J. M. V. Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate: An experimental study. **Cement and Concrete**

Research, v. 32, n. 8, p. 1301–1311, 2002.

GORDON, J. N.; PINNOCK, W. R.; MOORE, M. M. A preliminary investigation of strength development in Jamaican red mud composites. **Cement and Concrete Composites**, 1996.

GOWDA, R. et al. Effect of nano-alumina on workability, compressive strength and residual strength at elevated temperature of Cement Mortar. **Materials Today: Proceedings**, v. 4, n. 11, p. 12152–12156, 2017.

HELENA, L.; SIQUEIRA, S. DE; ALEGRE, P. **Utilização De Resíduos De Rochas Ornamentais Na Produção De Cerâmica Branca**. p. 1–125, 2004.

HSIANG, H. I.; LIN, S. C. Effects of aging on the kinetics of nanocrystalline anatase crystallite growth. **Materials Chemistry and Physics**, v. 95, n. 2–3, p. 275–279, 2006.

HU, J.; WANG, Z.; KIM, Y. Feasibility study of using fine recycled concrete aggregate in producing self-consolidation concrete. **Journal of Sustainable Cement-Based Materials**, v. 2, n. 1, p. 20–34, 2013.

JALAL, M.; FATHI, M.; FARZAD, M. Effects of fly ash and TiO₂nanoparticles on rheological, mechanical, microstructural and thermal properties of high strength self compacting concrete. **Mechanics of Materials**, v. 61, p. 11–27, 2013.

JIANG, C. et al. Effects of temperature and associated organic carbon on the fractionation of water-dispersible colloids from three silt loam topsoils under different land use. **Geoderma**, v. 299, p. 43–53, 2017.

KIM, S. Y. et al. Synthesis of structural binder for red brick production based on red mud and fly ash activated using Ca(OH)₂and Na₂CO₃. **Construction and Building Materials**, v. 147, p. 101–116, 2017.

KRUGER, P.; PEREIRA, E.; CHINELATTO, A. S. A. **Influência do agregado**

reciclado na durabilidade do concreto: uma revisão da bibliografia. p. 253–265, 2017.

KUMAR, A.; KUMAR, S. Development of paving blocks from synergistic use of red mud and fly ash using geopolymerization. **Construction and Building Materials**, v. 38, p. 865–871, 2013.

KUMAR, P. H. et al. Implementation of industrial waste ferrochrome slag in conventional and low cement castables: Effect of microsilica addition. **Journal of Asian Ceramic Societies**, v. 2, n. 2, p. 169–175, 2014.

LVKURDA, R.; DE BRITO, J.; SIILESTRE, J. D. Water absorption and electrical resistivity of concrete with recycled concrete aggregates and fly ash. **Cement and Concrete Composites**, v. 95, n. October 2018, p. 169–182, 2019.

KURTOĞLU, S. F.; SOYER-UZUN, S.; UZUN, A. Tuning structural characteristics of red mud by simple treatments. **Ceramics International**, v. 42, n. 15, p. 17581–17593, 2016.

LEITE, M. B. (2001). **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de construção e demolição.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Tese (Doutorado), Porto Alegre.

LIMA, M. S. S. et al. Red mud application in construction industry: Review of benefits and possibilities. IOP Conference Series: **Materials Science and Engineering. Anais...2017**

LIU, R. X.; POON, C. S. Utilization of red mud derived from bauxite in self-compacting concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 384–391, 2016.

LIU, W.; YANG, J.; XIAO, B. Review on treatment and utilization of bauxite residues in China. **International Journal of Mineral Processing**, v. 93, n. 3–4, p. 220–231, 2009.

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, n. 8, p. 847–853, 2011.

LIU, Y.; NAIDU, R.; MING, H. Red mud as an amendment for pollutants in solid and liquid phases. **Geoderma**, v. 163, n. 1–2, p. 1–12, 2011.

MALHOTRA V.M.; MEHTA P.K. **High-performance, high-volume fly ash concrete: materials, mixture proportioning, properties, construction practice, and case histories**. 2002.

MANFROI, E. P. **Avaliação do resíduo de bauxita como material pozolânico em substituição ao cimento para produção de argamassas**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2009.

MANFROI, E. P. Avaliação do resíduo de bauxita como material pozolânico em substituição ao cimento para produção de argamassas. p. 152, 2009.

MEDJIGBODO, S. et al. How do recycled concrete aggregates modify the shrinkage and self-healing properties? **Cement and Concrete Composites**, v. 86, p. 72–86, 2018.

MU, Y.; SAFFARZADEH, A.; SHIMAOKA, T. Influence of ignition process on mineral phase transformation in municipal solid waste incineration (MSWI) fly ash: Implications for estimating loss-on-ignition (LOI). **Waste Management**, v. 59, p. 222–228, 2017.

NEVILLE A.M. **Properties of Concrete**. 1995

NIKBIN, I. M. et al. Environmental impacts and mechanical properties of lightweight concrete containing bauxite residue (red mud). **Journal of Cleaner Production**, v. 172, p. 2683–2694, 2016.

PAINE, K. A.; DHIR, R. K. Recycled aggregates in concrete: a performance-

related approach. *Magazine of Concrete Research*, v. 62, n. 7, p. 519–530, 2010.

PINHEIRO, B. C. A; HOLANDA, J. N. F. Efeito da temperatura de queima em algumas propriedades mecânicas de cerâmica vermelha. *Cerâmica*, v. 56, p. 237–243, 2010.

PONTIKES, Y.; ANGELOPOULOS, G. N. Bauxite residue in cement and cementitious applications: Current status and a possible way forward. *Resources, Conservation and Recycling*, 2013.

RIBEIRO, D. V.; LABRINCHA, J. A.; MORELLI, M. R. Potential use of natural red mud as pozzolan for Portland cement. *Materials Research*, v. 14, n. 1, p. 60–66, 2011.

SAGOE-CRENTSIL, K. K.; BROWN, T.; TAYLOR, A. H. Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate. *Cement and Concrete Research*, v. 31, n. 5, p. 707–712, 2001.

SANTOS, S.; SILVA, P. R. DA; BRITO, J. DE. Self-compacting concrete with recycled aggregates – **A literature review**. *Journal of Building Engineering*, v. 22, n. August 2018, p. 349–371, 2019.

SEFFF, L.; HOTZA, D.; LABRINCHA, J. A. Effect of red mud addition on the rheological behaviour and on hardened state characteristics of cement mortars. *Construction and Building Materials*, v. 25, n. 1, p. 163–170, 2011.

SHAIKH, F. U. A. Mechanical properties of recycled aggregate concrete containing ternary blended cementitious materials. *International Journal of Sustainable Built Environment*, v. 6, n. 2, p. 536–543, 2017.

SHIM, W. G. et al. Recycling of red mud as a catalyst for complete oxidation of benzene. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, v. 60, p. 259–267, 2018.

SILVA, J. B. et al. Incorporação de lama de mármore e granito em massas

argilosas. **Cerâmica**, v. 51, n. 320, p. 325–330, 2005.

SUSHIL, S.; BATRA, V. S. Catalytic applications of red mud, an aluminium industry waste: **A review. Applied Catalysis B: Environmental**, v. 81, n. 1–2, p. 64–77, 2008.

TAM, V. W. Y.; SOOMRO, M.; EVANGELISTA, A. C. J. A review of recycled aggregate in concrete applications (2000–2017). **Construction and Building Materials**, v. 172, p. 272–292, 2018.

TANG, W. C. et al. Influence of red mud on fresh and hardened properties of self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 178, p. 288–300, 2018.

TANG, W. C. et al. Influence of red mud on fresh and hardened properties of self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, v. 178, p. 288–300, 2018.

THOMAS, J.; THAICKAVIL, N. N.; WILSON, P. M. Strength and durability of concrete containing recycled concrete aggregates. **Journal of Building Engineering**, v. 19, n. April, p. 349–365, 2018.

UNITED NATIONS. **Population Division, World Urbanization Prospects: The 2014 Revision**. Department of Economic and Social Affairs, 2014.

WANG, S.; ANG, H. M.; TADÉ, M. O. Novel applications of red mud as coagulant, adsorbent and catalyst for environmentally benign processes. **Chemosphere**, v. 72, n. 11, p. 1621–1635, 2008.

WU, C. R. et al. Improving the properties of recycled concrete aggregate with bio-deposition approach. **Cement and Concrete Composites**, v. 94, n. September, p. 248–254, 2018.

WU, C. S.; LIU, D. Y. Mineral phase and physical properties of red mud calcined

at different temperatures. **Journal of Nanomaterials**, v. 2012, n. 3, 2012.

XIAO, J. et al. Properties of interfacial transition zones in recycled aggregate concrete tested by nanoindentation. **Cement and Concrete Composites**, v. 37, n. 1, p. 276–292, 2013.

BRIITO, J., SILVA, R. Current status on the use of recycled aggregates in concrete: Where do we go from here?. **RILEM Technical Letters**, v. 10, p. 1-5, 2016.

NEVILLE, A. M., BROOKS, J. J. **Concrete Technology**, 2010.

APÊNDICE I – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Quadro apresentado os dados brutos dos ensaios de resistência à compressão na idade de 28 dias.

Grupo	Resistência (MPa)	Grupo	Resistência (MPa)	Grupo	Resistência (MPa)
0ARC0LV	24,38	50ARC0LV	22,60	100ARC0LV	26,66
0ARC0LV	26,79	50ARC0LV	24,25	100ARC0LV	29,65
0ARC0LV	26,88	50ARC0LV	26,79	100ARC0LV	31,34
0ARC0LV	27,10	50ARC0LV	27,33	100ARC0LV	30,22
0ARC0LV	27,23	50ARC0LV	27,48	100ARC0LV	32,08
0ARC0LV	27,32	50ARC0LV	28,56	100ARC0LV	26,47
0ARC0LV	28,04	50ARC0LV	29,87	100ARC0LV	29,85
0ARC0LV	28,33	50ARC0LV	30,70	100ARC0LV	27,68
0ARC0LV	28,48	50ARC0LV	31,45	100ARC0LV	29,07
0ARC0LV	29,05	50ARC0LV	31,46	100ARC0LV	27,96
0ARC0LV	29,89	50ARC0LV	31,69	100ARC0LV	27,92
0ARC0LV	31,42	50ARC0LV	32,02	100ARC0LV	26,38
0ARC5LV	23,51	50ARC5LV	21,10	100ARC5LV	22,74
0ARC5LV	23,96	50ARC5LV	22,67	100ARC5LV	23,75
0ARC5LV	24,18	50ARC5LV	22,90	100ARC5LV	22,64
0ARC5LV	24,93	50ARC5LV	23,53	100ARC5LV	21,94
0ARC5LV	25,77	50ARC5LV	23,92	100ARC5LV	20,23
0ARC5LV	26,17	50ARC5LV	24,18	100ARC5LV	17,76
0ARC5LV	26,24	50ARC5LV	24,28	100ARC5LV	22,13

0ARC5LV	26,31	50ARC5LV	24,72	100ARC5LV	25,07
0ARC5LV	26,80	50ARC5LV	25,08	100ARC5LV	20,21
0ARC5LV	27,76	50ARC5LV	25,32	100ARC5LV	23,38
0ARC5LV	27,90	50ARC5LV	26,36	100ARC5LV	16,74
0ARC5LV	27,91	50ARC5LV	27,42	100ARC5LV	22,89
0ARC10LV	17,65	50ARC10LV	18,50	100ARC10LV	23,13
0ARC10LV	19,98	50ARC10LV	20,17	100ARC10LV	21,90
0ARC10LV	20,66	50ARC10LV	20,96	100ARC10LV	23,01
0ARC10LV	20,97	50ARC10LV	21,05	100ARC10LV	24,06
0ARC10LV	21,31	50ARC10LV	21,05	100ARC10LV	22,94
0ARC10LV	21,43	50ARC10LV	21,23	100ARC10LV	23,84
0ARC10LV	22,02	50ARC10LV	22,56	100ARC10LV	23,39
0ARC10LV	22,07	50ARC10LV	22,63	100ARC10LV	23,51
0ARC10LV	22,30	50ARC10LV	22,70	100ARC10LV	24,77
0ARC10LV	22,46	50ARC10LV	22,93	100ARC10LV	22,58
0ARC10LV	22,80	50ARC10LV	23,04	100ARC10LV	23,36
0ARC10LV	22,93	50ARC10LV	23,08	100ARC10LV	23,92
0ARC15LV	15,07	50ARC15LV	18,18	100ARC15LV	23,07
0ARC15LV	20,64	50ARC15LV	19,80	100ARC15LV	22,87
0ARC15LV	20,95	50ARC15LV	20,22	100ARC15LV	23,68
0ARC15LV	21,12	50ARC15LV	20,93	100ARC15LV	22,04
0ARC15LV	21,36	50ARC15LV	21,38	100ARC15LV	22,13
0ARC15LV	21,49	50ARC15LV	21,48	100ARC15LV	24,60

0ARC15LV	22,40	50ARC15LV	22,24	100ARC15LV	20,15
0ARC15LV	22,86	50ARC15LV	22,29	100ARC15LV	22,92
0ARC15LV	22,89	50ARC15LV	22,34	100ARC15LV	24,31
0ARC15LV	23,19	50ARC15LV	22,40	100ARC15LV	23,60
0ARC15LV	23,50	50ARC15LV	22,84	100ARC15LV	22,75
0ARC15LV	23,75	50ARC15LV	23,75	100ARC15LV	21,53

APÊNDICE II – RESISTÊNCIA À TRAÇÃO

Quadro com os dados brutos dos ensaios de resistência à tração na compressão diametral

Grupo	Resistência à tração (MPa)	Grupo	Resistência à tração (MPa)	Grupo	Resistência à tração (MPa)
0ARC0LV	2,34	50ARC0LV	3,10	100ARC0LV	2,87
0ARC0LV	3,13	50ARC0LV	3,18	100ARC0LV	3,30
0ARC0LV	2,65	50ARC0LV	3,77	100ARC0LV	2,88
0ARC0LV	2,91	50ARC0LV	4,44	100ARC0LV	2,37
0ARC5LV	2,60	50ARC5LV	2,62	100ARC5LV	2,55
0ARC5LV	3,05	50ARC5LV	2,78	100ARC5LV	2,68
0ARC5LV	2,88	50ARC5LV	2,89	100ARC5LV	2,27
0ARC5LV	3,00	50ARC5LV	3,13	100ARC5LV	2,14
0ARC10LV	2,37	50ARC10LV	2,19	100ARC10LV	2,49
0ARC10LV	2,69	50ARC10LV	2,37	100ARC10LV	2,49
0ARC10LV	2,56	50ARC10LV	2,46	100ARC10LV	2,07
0ARC10LV	2,70	50ARC10LV	2,53	100ARC10LV	2,74
0ARC15LV	2,76	50ARC15LV	2,28	100ARC15LV	2,39
0ARC15LV	2,53	50ARC15LV	2,41	100ARC15LV	2,28
0ARC15LV	2,39	50ARC15LV	2,51	100ARC15LV	2,45
0ARC15LV	2,11	50ARC15LV	2,74	100ARC15LV	2,88

APÊNDICE III – MÓDULO DE ELASTICIDADE

Quadro com os dados brutos dos ensaios de módulo de elasticidade

Grupo	Módulo (GPa)	Grupo	Módulo (GPa)	Grupo	Módulo (MPa)
0ARC0LV	16,18	50ARC0LV	15,90	100ARC0LV	13,06
0ARC0LV	16,42	50ARC0LV	17,80	100ARC0LV	14,73
0ARC0LV	17,47	50ARC0LV	19,21	100ARC0LV	15,36
0ARC0LV	21,35	50ARC0LV	27,61	100ARC0LV	21,53
0ARC5LV	14,97	50ARC5LV	15,61	100ARC5LV	12,44
0ARC5LV	18,44	50ARC5LV	16,96	100ARC5LV	13,97
0ARC5LV	20,71	50ARC5LV	18,94	100ARC5LV	16,76
0ARC5LV	21,07	50ARC5LV	24,57	100ARC5LV	24,95
0ARC10LV	14,29	50ARC10LV	12,02	100ARC10LV	13,65
0ARC10LV	17,24	50ARC10LV	15,68	100ARC10LV	16,86
0ARC10LV	26,45	50ARC10LV	18,15	100ARC10LV	17,62
0ARC10LV	30,96	50ARC10LV	28,18	100ARC10LV	21,13
0ARC15LV	11,14	50ARC15LV	12,55	100ARC15LV	21,81
0ARC15LV	15,73	50ARC15LV	15,72	100ARC15LV	22,53
0ARC15LV	19,22	50ARC15LV	16,76	100ARC15LV	23,58
0ARC15LV	23,91	50ARC15LV	22,42	100ARC15LV	33,90

APÊNDICE IV – ABSORÇÃO TOTAL DE ÁGUA

Quadro com os dados brutos do ensaio de absorção total de água das amostras de concreto

Grupo	Absorção de água (%)	Grupo	Absorção de água (%)	Grupo	Absorção de água (%)
0ARC0LV	5,91	50ARC0LV	6,48	100ARC0LV	8,50
0ARC0LV	6,06	50ARC0LV	6,66	100ARC0LV	9,04
0ARC0LV	7,20	50ARC0LV	6,67	100ARC0LV	9,23
0ARC0LV	-	50ARC0LV	6,81	100ARC0LV	9,29
0ARC5LV	6,15	50ARC5LV	7,43	100ARC5LV	9,85
0ARC5LV	6,23	50ARC5LV	7,92	100ARC5LV	10,07
0ARC5LV	6,31	50ARC5LV	8,37	100ARC5LV	10,12
0ARC5LV	7,08	50ARC5LV	8,39	100ARC5LV	10,50
0ARC10LV	6,83	50ARC10LV	7,55	100ARC10LV	9,37
0ARC10LV	6,90	50ARC10LV	7,62	100ARC10LV	9,72
0ARC10LV	6,93	50ARC10LV	7,78	100ARC10LV	9,75
0ARC10LV	6,96	50ARC10LV	-	100ARC10LV	10,05
0ARC15LV	6,07	50ARC15LV	8,37	100ARC15LV	9,66
0ARC15LV	7,55	50ARC15LV	8,43	100ARC15LV	9,87
0ARC15LV	-	50ARC15LV	8,45	100ARC15LV	9,90
0ARC15LV	-	50ARC15LV	8,85	100ARC15LV	9,92

APÊNDICE V – ÍNDICE DE VAZIOS

Quadro com os dados brutos dos ensaios de índice de vazios das amostras de concreto

Grupo	Índice de Vazios (%)	Grupo	Índice de Vazios (%)	Grupo	Índice de Vazios (%)
0ARC0LV	12,83	50ARC0LV	13,99	100ARC0LV	17,52
0ARC0LV	13,54	50ARC0LV	14,42	100ARC0LV	18,33
0ARC0LV	15,66	50ARC0LV	14,42	100ARC0LV	18,82
0ARC0LV	-	50ARC0LV	14,63	100ARC0LV	18,84
0ARC5LV	13,70	50ARC5LV	15,50	100ARC5LV	19,54
0ARC5LV	13,89	50ARC5LV	16,43	100ARC5LV	19,90
0ARC5LV	14,04	50ARC5LV	17,23	100ARC5LV	20,14
0ARC5LV	15,20	50ARC5LV	17,21	100ARC5LV	20,67
0ARC10LV	14,75	50ARC10LV	15,66	100ARC10LV	19,12
0ARC10LV	14,88	50ARC10LV	15,77	100ARC10LV	19,65
0ARC10LV	15,04	50ARC10LV	16,04	100ARC10LV	19,75
0ARC10LV	15,03	50ARC10LV	-	100ARC10LV	20,16
0ARC15LV	13,41	50ARC15LV	17,45	100ARC15LV	19,52
0ARC15LV	16,26	50ARC15LV	17,54	100ARC15LV	19,95
0ARC15LV	-	50ARC15LV	17,58	100ARC15LV	19,84
0ARC15LV	-	50ARC15LV	18,25	100ARC15LV	19,91

APÊNDICE VI – ANÁLISE ESTATÍSTICA

Descrição da análise: Os dados foram analisados quando a sua normalidade por meio do teste de Shapiro-Wilk, e quanto a sua homocedasticidade por meio do teste de Levene, caso os dados apresentassem uma distribuição normal e homogeneidade das variâncias, estes foram comparados utilizando-se Anova de uma via com análise múltipla de Tukey, por haver mais de duas condições experimentais, e representação gráfica de barras representando a média com as barras de erros representando \pm o desvio padrão, caso contrário, os dados foram analisados utilizando-se Anova de Kruskal-Wallis com comparação múltipla de Simes-Hochberg, com representação gráfica de diagrama de caixas. Foram consideradas diferenças estatísticas quando $P < 0,05$.

1. COMPRESSÃO (GRUPO 0% ARC)

Análise de normalidade da resistência à compressão por meio do teste de Shapiro-Wilk. Grupo controle, com 0% de agregado reciclado de concreto (0ARC) e substituição do cimento por lama vermelha (LV).

Tabela 1. Análise de normalidade para as amostras de concreto ensaiada a compressão. A família de concreto com 15% de substituição do cimento por lama vermelha não apresentou uma distribuição normal.

Família	Testes	Estatísticas	P-valores	Parecer
0ARC0LV	Shapiro - Wilk	0,959379355	0,7749	OK
0ARC5LV	Shapiro - Wilk	0,924827307	0,3285	OK
0ARC10LV	Shapiro - Wilk	0,866372616	0,0588	OK
0ARC15LV	Shapiro - Wilk	0,755866078	0,0031	NÃO OK

Análise da homocedasticidade por meio do teste de Levene. Grupo controle, com 0% de agregado reciclado de concreto (0ARC) e substituição do cimento por lama vermelha (LV).

Tabela 2. Teste de homocedasticidade (homogeneidade das variâncias), as amostras apresentaram variâncias homogêneas. $P > 0,05$.

Informação	Valor
Levene (estatística do teste)	0,2247069
Graus de Liberdade	3
P-valor	0,8786702

Teste de hipótese.

H0: A lama vermelha não alterou a resistência à compressão.

H1: A lama vermelha alterou a resistência à compressão.

Tabela 3. Kruskal-Wallis H = 37,143, Graus de Liberdade GL = 3, P = 4,29.10⁻⁰⁸

Comparações	Diferença Observada	Estatística	Limite Inferior	Limite Superior	P-valor
0ARC0LV - 0ARC10LV	29,16666667	10,78211436	23,71490162	34,61843172	0
0ARC0LV - 0ARC15LV	26,58333333	9,827127092	21,13156828	32,03509838	0
0ARC0LV - 0ARC5LV	7,916666667	2,926573899	2,464901617	13,36843172	0,01081
0ARC10LV - 0ARC15LV	-2,583333333	0,954987272	-8,035098383	2,868431717	0,344802
0ARC10LV - 0ARC5LV	-21,25	7,855540465	-26,70176505	-15,79823495	0
0ARC15LV - 0ARC5LV	-18,66666667	6,900553193	-24,11843172	-13,21490162	0

Resumo da análise: Como um dos grupos não apresentou distribuição normal, utilizou-se Anova de Kruskal-Wallis, de acordo com valor de $P < 0,05$, rejeitou-se a hipótese nula (H_0) e aceitou-se a hipótese alternativa (H_1). A lama vermelha alterou de forma significativas a resistência à compressão das amostras de concreto. Quanto maior o teor de substituição do cimento por lama vermelha, menor a resistência à compressão.

2. COMPRESSÃO (GRUPO 50%ARC)

Análise de normalidade da resistência à compressão por meio do teste de Shapiro-Wilk. Grupo controle, com 50% de agregado reciclado de concreto (50ARC) e substituição do cimento por lama vermelha (LV).

Tabela 4. Análise de normalidade para as amostras de concreto ensaiada a compressão. Todas as amostras apresentaram uma distribuição normal.

Testes	Estatísticas	P-valores	Parecer	
50ARC0LV	Shapiro - Wilk	0,903522958	0,1761	OK
50ARC5LV	Shapiro - Wilk	0,990263082	0,9998	OK
50ARC10LV	Shapiro - Wilk	0,869834684	0,065	OK
50ARC15LV	Shapiro - Wilk	0,945155761	0,5676	OK

Análise da homocedasticidade por meio do teste de Levene. Grupo com 50% de agregado reciclado de concreto (50ARC) e substituição do cimento por lama vermelha (LV).

Tabela 5. Teste de homocedasticidade (homogeneidade das variâncias), as amostras não apresentaram variâncias homogêneas. $P < 0,05$

Informação	Valor
Levene (estatística do teste)	3,73750178
Graus de Liberdade	3
P-valor	0,01774889

Teste de hipótese.

H0: A lama vermelha não alterou a resistência à compressão.

H1: A lama vermelha alterou a resistência à compressão.

Tabela 3. Kruskal-Wallis $H = 31,101$, Graus de Liberdade $GL = 3$, $P = 8,09 \cdot 10^{-7}$

Comparações	Diferença Observada	Estatística	Limite Inferior	Limite Superior	P-valor
50ARC0LV - 50ARC10LV	25,41666667	7,397930004	18,49257766	32,34075568	0
50ARC0LV - 50ARC15LV	27,5	8,00431771	20,57591099	34,42408901	0
50ARC0LV - 50ARC5LV	10,41666667	3,031938526	3,492577655	17,34075568	0,008127
50ARC10LV - 50ARC15LV	2,083333333	0,606387705	-4,840755678	9,007422345	0,547373
50ARC10LV - 50ARC5LV	-15	4,365991478	-21,92408901	-8,075910988	0,000227
50ARC15LV - 50ARC5LV	-17,08333333	4,972379183	-24,00742234	-10,15924432	0,000042

Resumo da análise: Como os grupos não apresentaram variâncias homogêneas, utilizou-se Anova de Kruskal-Wallis, de acordo com valor de $P < 0,05$, rejeitou-se a hipótese nula (H0) e aceitou-se a hipótese alternativa (H1). A lama vermelha alterou de forma significativas a resistência à compressão das amostras de concreto. Quanto maior o teor de substituição do cimento por lama vermelha, menor a resistência à compressão.

3. COMPRESSÃO (GRUPO 100% ARC)

Análise de normalidade da resistência à compressão por meio do teste de Shapiro-Wilk. Grupo com 100% de agregado reciclado de concreto (100ARC) e substituição do cimento por lama vermelha (LV).

Tabela 6. Análise de normalidade para as amostras de concreto ensaiada a compressão. Todas as amostras apresentaram uma distribuição normal.

Testes	Estatísticas	P-valores	Parecer	
100ARC0LV	Shapiro - Wilk	0,940977247	0,5108	OK
100ARC5LV	Shapiro - Wilk	0,917303002	0,2644	OK
100ARC10LV	Shapiro - Wilk	0,987127488	0,9986	OK
100ARC15LV	Shapiro - Wilk	0,963424338	0,8314	OK

Análise da homocedasticidade por meio do teste de Levene. Grupo com 100% de agregado reciclado de concreto (100ARC) e substituição do cimento por lama vermelha (LV).

Tabela 7. Teste de homocedasticidade (homogeneidade das variâncias), as amostras não apresentaram variâncias homogêneas. $P < 0,05$

Informação	Valor
Levene (estatística do teste)	3,27047303
Graus de Liberdade	3
P-valor	0,02989459

Teste de hipótese.

H0: A lama vermelha não alterou a resistência à compressão.

H1: A lama vermelha alterou a resistência à compressão.

Tabela 8. Kruskal-Wallis $H = 29,460$, Graus de Liberdade $GL = 3$, $P = 1,79 \cdot 10^{-6}$

Comparações	Diferença Observada	Estatística	Limite Inferior	Limite Superior	P-valor
100ARC0LV - 100ARC10LV	19	5,26517918	11,72731609	26,27268391	0,000016
100ARC0LV - 100ARC15LV	24,08333333	6,673845539	16,81064942	31,35601725	0
100ARC0LV - 100ARC5LV	28,91666667	8,013233225	21,64398275	36,18935058	0
100ARC10LV - 100ARC15LV	5,083333333	1,40866636	-2,189350579	12,35601725	0,187322
100ARC10LV - 100ARC5LV	9,916666667	2,748054046	2,643982755	17,18935058	0,025978
100ARC15LV - 100ARC5LV	4,833333333	1,339387686	-2,439350579	12,10601725	0,187322

Resumo da análise: Como os grupos não apresentaram variâncias homogêneas, utilizou-se Anova de Kruskal-Wallis, de acordo com valor de $P < 0,05$, rejeitou-se a hipótese nula (H0) e aceitou-se a hipótese alternativa (H1). A lama vermelha alterou de forma significativas a resistência à compressão das amostras de concreto. As respostas relacionadas a resistência à compressão,

deram menor para todos os concretos com lama vermelha quando comparado com o concreto controle.

4. MÓDULO DE ELASTICIDADE (GRUPO 0%ARC)

Análise da homocedasticidade por meio do teste de Levene. Grupo controle, com 0% de agregado reciclado de concreto (0ARC) e substituição do cimento por lama vermelha (LV).

Tabela 9. Teste de homocedasticidade (homogeneidade das variâncias), as amostras não apresentaram variâncias homogêneas. $P < 0,05$.

Levene (estatística do teste)	4,25016793
Graus de Liberdade	3
P-valor	0,02908445

Teste de hipótese.

H0: A lama vermelha não alterou o módulo de elasticidade dos concretos.

H1: A lama vermelha alterou o módulo de elasticidade dos concretos.

Tabela 10. Kruskal-Wallis $H = 0,727$, Graus de Liberdade $GL = 3$, $P = 0,841$

Comparações	Diferença Observada	Estatística	Limite Inferior	Limite Superior	P-valor
0ARC0LV 0ARC10LV	- 2	0,544751549	-9,999290072	5,999290072	0,841557
0ARC0LV 0ARC15LV	- 0,75	0,204281831	-7,249290072	8,749290072	0,841557
0ARC0LV 0ARC5LV	- 0,75	0,204281831	-8,749290072	7,249290072	0,841557
0ARC10LV 0ARC15LV	- 2,75	0,74903338	-5,249290072	10,74929007	0,841557
0ARC10LV 0ARC5LV	- 1,25	0,340469718	-6,749290072	9,249290072	0,841557
0ARC15LV 0ARC5LV	- 1,5	0,408563662	-9,499290072	6,499290072	0,841557

Resumo da análise: Como os grupos não apresentaram variâncias homogêneas, utilizou-se Anova de Kruskal-Wallis, de acordo com valor de $P > 0,05$, aceitou-se a hipótese nula (H0) e rejeitou-se a hipótese alternativa (H1). A lama vermelha não alterou de forma significativas o módulo de elasticidade das amostras de concreto, mesmo para o maior teor de substituição de cimento por lama vermelha.

5. MÓDULO DE ELASTICIDADE (GRUPO 50%ARC)

Análise da homocedasticidade por meio do teste de Levene. Grupo com 50% de agregado reciclado de concreto (50ARC) e substituição do cimento por lama vermelha (LV).

Tabela 11. Teste de homocedasticidade (homogeneidade das variâncias), as amostras apresentaram variâncias homogêneas. $P > 0,05$.

Levene (estatística do teste)	0,2498875
Graus de Liberdade	3
P-valor	0,8598848

Teste de hipótese.

H0: A lama vermelha não alterou o módulo de elasticidade dos concretos.

H1: A lama vermelha alterou o módulo de elasticidade dos concretos.

Tabela 12. Análise de variância de uma via $F = 0,275$. $P = 0,841$.

Comparações	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	P-valor
50ARC10LV- 50ARC0LV	-1,61975	-12,48101371	9,241513714	0,9697802
50ARC15LV- 50ARC0LV	-3,26725	-14,12851371	7,594013714	0,8085784
50ARC5LV- 50ARC0LV	-1,11025	-11,97151371	9,751013714	0,9897944
50ARC15LV- 50ARC10LV	-1,6475	-12,50876371	9,213763714	0,9682977
50ARC5LV- 50ARC10LV	0,5095	-10,35176371	11,37076371	0,9989798
50ARC5LV- 50ARC15LV	2,157	-8,704263714	13,01826371	0,9333102

Resumo da análise: O teste de homocedasticidade mostrou que as variâncias são homogêneas, por conta disso, utilizou-se análise variância de uma via complementada pela análise múltipla de Tukey. De acordo com a análise, aceitou-se a hipótese nula (H0) e rejeitou-se a hipótese alternativa (H1). A lama vermelha não alterou de forma significativas o módulo de elasticidade das amostras de concreto, mesmo para o maior teor de substituição de cimento por lama vermelha.

6. MÓDULO DE ELASTICIDADE (GRUPO 100%ARC)

Análise da homocedasticidade por meio do teste de Levene. Grupo com 100% de agregado reciclado de concreto (100ARC) e substituição do cimento por lama vermelha (LV).

Tabela 13. Teste de homocedasticidade (homogeneidade das variâncias), as amostras apresentaram variâncias homogêneas. $P > 0,05$.

Levene (estatística do teste)	0,2103639
Graus de Liberdade	3
P-valor	0,8872819

Teste de hipótese.

H0: A lama vermelha não alterou o módulo de elasticidade dos concretos.

H1: A lama vermelha alterou o módulo de elasticidade dos concretos.

Tabela 14. Análise de variância de uma via. $F = 3,479$. $P = 0,0503$

Comparações	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	P-valor
100ARC10LV- 100ARC0LV	1,145	-8,6150564	10,9050564	0,984779
100ARC15LV- 100ARC0LV	9,28575	-0,4743064	19,0458064	0,0640601
100ARC5LV- 100ARC0LV	0,859	-8,9010564	10,6190564	0,993414
100ARC15LV- 100ARC10LV	8,14075	-1,6193064	17,9008064	0,1148198
100ARC5LV- 100ARC10LV	-0,286	-10,0460564	9,4740564	0,99975
100ARC5LV- 100ARC15LV	-8,42675	-18,1868064	1,3333064	0,099488

Resumo da análise: O teste de homocedasticidade mostrou que as variâncias são homogêneas, por conta disso, utilizou-se análise variância de uma via complementada pela análise múltipla de Tukey. De acordo com a análise, aceitou-se a hipótese nula (H0) e rejeitou-se a hipótese alternativa (H1). A lama vermelha não alterou de forma significativas o módulo de elasticidade das amostras de concreto, mesmo para o maior teor de substituição de cimento por lama vermelha.

7. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL (GRUPO 0%ARC)

Análise da homocedasticidade por meio do teste de Levene. Grupo controle, com 0% de agregado reciclado de concreto (0ARC) e substituição do cimento por lama vermelha (LV).

Tabela 15. Teste de homocedasticidade (homogeneidade das variâncias), as amostras apresentaram variâncias homogêneas. $P > 0,05$.

Levene (estatística do teste)	0,9551632
Graus de Liberdade	3
P-valor	0,4451391

Teste de hipótese.

H0: A lama vermelha não alterou a resistência à tração das amostras de concreto.

H1: A lama vermelha alterou a resistência à tração das amostras de concreto.

Tabela 16. Análise de variância de uma via. $F = 2,321$. $P = 0,126$

Comparações	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	P-valor
0ARC10LV-0ARC0LV	-0,179795414	-0,709027156	0,349436329	0,747589908
0ARC15LV-0ARC0LV	-0,311272619	-0,840504362	0,217959123	0,343786725
0ARC5LV-0ARC0LV	0,123437535	-0,405794207	0,652669278	0,898009195
0ARC15LV-0ARC10LV	-0,131477205	-0,660708948	0,397754537	0,880119818
0ARC5LV-0ARC10LV	0,303232949	-0,225998793	0,832464692	0,364743372
0ARC5LV-0ARC15LV	0,434710154	-0,094521588	0,963941897	0,122098131

Resumo da análise: O teste de homocedasticidade mostrou que as variâncias são homogêneas, por conta disso, utilizou-se análise variância de uma via complementada pela análise múltipla de Tukey. De acordo com a análise, aceitou-se a hipótese nula (H0) e rejeitou-se a hipótese alternativa (H1). A lama vermelha não alterou de forma significativas a resistência à tração das amostras de concreto.

8. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL (GRUPO 50%ARC)

Análise da homocedasticidade por meio do teste de Levene. Grupo com 50% de agregado reciclado de concreto (50ARC) e substituição do cimento por lama vermelha (LV).

Tabela 17. Teste de homocedasticidade (homogeneidade das variâncias), as amostras não apresentaram variâncias homogêneas. $P < 0,05$.

Levene (estatística do teste)	3,59409057
Graus de Liberdade	3
P-valor	0,04630589

Teste de hipótese.

H0: A lama vermelha não alterou a resistência à tração das amostras de concreto.

H1: A lama vermelha alterou a resistência à tração das amostras de concreto.

Tabela 18. Kruskal-Wallis $H = 11,977$, Graus de Liberdade $GL = 3$, $P = 0,007$

Comparações	Diferença Observada	Estatística	Limite Inferior	Limite Superior	P-valor
50ARC0LV - 50ARC10LV	10,25	6,067142571	6,569052793	13,93094721	0,000337
50ARC0LV - 50ARC15LV	9	5,327247136	5,319052793	12,68094721	0,000901
50ARC0LV - 50ARC5LV	3,75	2,219686307	0,069052793	7,430947207	0,092929
50ARC10LV - 50ARC15LV	-1,25	0,739895436	-4,930947207	2,430947207	0,473591
50ARC10LV - 50ARC5LV	-6,5	3,847456265	-10,18094721	-2,81905279	0,009283
50ARC15LV - 50ARC5LV	-5,25	3,107560829	-8,930947207	-1,56905279	0,027185

Resumo da análise: Como os grupos não apresentaram variâncias homogêneas, utilizou-se Anova de Kruskal-Wallis, de acordo com valor de $P < 0,05$, rejeitou-se a hipótese nula e aceitou-se a hipótese alternativa. A lama vermelha alterou de forma significativas a resistência à tração das amostras de concreto.

9. RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL (GRUPO 100%ARC)

Análise da homocedasticidade por meio do teste de Levene. Grupo com 100% de agregado reciclado de concreto (100ARC) e substituição do cimento por lama vermelha (LV).

Tabela 19. Teste de homocedasticidade (homogeneidade das variâncias), as amostras apresentaram variâncias homogêneas. $P > 0,05$.

Levene (estatística do teste)	0,1081446
Graus de Liberdade	3
P-valor	0,953709

Teste de hipótese.

H0: A lama vermelha não alterou a resistência à tração das amostras de concreto.

H1: A lama vermelha alterou a resistência à tração das amostras de concreto.

Tabela 20. Análise de variância de uma via. $F = 1,889$. $P = 0,185$

Comparações	Centro	Limite Inferior	Limite Superior	P-valor
100ARC10LV- 100ARC0LV	-0,406411942	-1,031161128	0,218337245	0,266325716
100ARC15LV- 100ARC0LV	-0,354728115	-0,979477301	0,270021072	0,372062646
100ARC5LV- 100ARC0LV	-0,445679268	-1,070428455	0,179069918	0,202299848
100ARC15LV- 100ARC10LV	0,051683827	-0,57306536	0,676433013	0,994510301
100ARC5LV- 100ARC10LV	-0,039267326	-0,664016513	0,58548186	0,997563721
100ARC5LV- 100ARC15LV	-0,090951153	-0,71570034	0,533798033	0,971769958

Resumo da análise: O teste de homocedastidade mostrou que as variâncias são homogêneas, por conta disso, utilizou-se análise variância de uma via complementada pela análise múltipla de Tukey. De acordo com a análise, aceitou-se a hipótese nula (H0) e rejeitou-se a hipótese alternativa (H1). A lama vermelha não alterou de forma significativas a resistência à tração das amostras de concreto.

APENDICE VII – ARTIGO

SUBMETIDO

Artigo submetido para defesa da tese

Construction and Building Materials

Utilization of red mud of the Brazilian Amazon to produce civil construction materials
--Manuscript Draft--

Manuscript Number:	CONBUILDMAT-D-20-11703
Article Type:	Research Paper
Keywords:	Waste; Bauxite; Thermal analysis; reuse
Corresponding Author:	Maurílio Gomes-Pimentel, M.D. Universidade Federal do Pará: Universidade Federal do Para Belém, PA BRAZIL
First Author:	Maurílio Gomes-Pimentel, M.D.
Order of Authors:	Maurílio Gomes-Pimentel, M.D. Agostinho Alves de Oliveira Júnior, M.D. Thayná Silva Marcelo de Souza Picanço, Dr Woshigton Silva Brito, M.D. André Mileo Alcebíades Negrão Macêdo, Dr
Abstract:	Currently there is a valorization of industrial waste, not only because of the environmental aspect, but also to aim a possible economic gain through its reuse. Red mud - a residue of alumina refined by the Bayer process- is part of this scenario, since the most common destinations cause damage to the environment, and in that sense there are studies that already explore some alternative applications. However, these works show some flaws in the use of the waste. Thus, this work seeks to evaluate the effects of calcined red mud, in order to promote improvements in the microstructural properties. With the analysis of the obtained characterization we observed that the calcination induced the appearance of a new mineralogical phase, increased the specific weight and the particle-size distribution, and it also decreased the surface area and caused a change in the loss on ignition. From these results, we deduced some applications of this waste in the construction industry: using its chemical compounds in a mix with Portland cement, or benefiting from the physical properties generated from the calcined red mud to increase geopolymeric cements. As well as, the evaluation for environmentally favorable application and industrial uses, due to its large amount of Fe and Al present, red mud can be used as a catalyst, and because of its alkalinity it can be applied as a desulphurant, or as an adsorbent and an inorganic dye.
Suggested Reviewers:	Jorge Carneiro, Dr. Professor, University of Aveiro jcameiro@ua.pt He has already researched and published in this study field. Huixin Jin, Dr. Professor, Guizhou University of Technology: Guizhou University hxjin@gzu.edu.cn He has already researched and published in this study field. Maria Alba Cincotto, Dr. Professor, Universidade de Sao Paulo Campus de Sao Paulo: Universidade de Sao Paulo maria.cincotto@poli.usp.br She has already conducted and published research in this study area. Rui Novais, Dr. Professor, University of Aveiro: Universidade de Aveiro ruimnovais@ua.pt He has already researched and published in this study field.

Construction and Building Materials

Utilization of red mud of the Brazilian Amazon to produce civil construction materials

--Manuscript Draft--

Manuscript Number:	
Article Type:	Research Paper
Keywords:	waste; Bauxite; Thermal analysis; reuse
Corresponding Author:	Maurílio Gomes-Pimentel, M.D. Universidade Federal do Pará: Universidade Federal do Para Belém, PA BRAZIL
First Author:	Maurílio Gomes-Pimentel, M.D.
Order of Authors:	Maurílio Gomes-Pimentel, M.D. Agostinho Alves de Oliveira Júnior, M.D. Thayná Silva Marcelo de Souza Picanço, Dr Woshigton Silva Brito, M.D. André Mileo Alcebiádes Negrão Macêdo, Dr
Abstract:	<p>Currently there is a valorization of industrial waste, not only because of the environmental aspect, but also to aim a possible economic gain through its reuse. Red mud - a residue of alumina refined by the Bayer process- is part of this scenario, since the most common destinations cause damage to the environment, and in that sense there are studies that already explore some alternative applications. However, these works show some flaws in the use of the waste. Thus, this work seeks to evaluate the effects of calcined red mud, in order to promote improvements in the microstructural properties. With the analysis of the obtained characterization we observed that the calcination induced the appearance of a new mineralogical phase, increased the specific weight and the particle-size distribution, and it also decreased the surface area and caused a change in the loss on ignition. From these results, we deduced some applications of this waste in the construction industry: using its chemical compounds in a mix with Portland cement, or benefiting from the physical properties generated from the calcined red mud to increase geopolymeric cements. As well as, the evaluation for environmentally favorable application and industrial uses, due to its large amount of Fe and Al present, red mud can be used as a catalyst, and because of its alkalinity it can be applied as a desulphurant, or as an adsorbent and an inorganic dye.</p>
Suggested Reviewers:	<p>Jorge Carneiro, Dr. Professor, University of Aveiro jcarneiro@ua.pt He has already researched and published in this study field.</p> <p>Huixin Jin, Dr. Professor, Guizhou University of Technology: Guizhou University hxjin@gzu.edu.cn He has already researched and published in this study field.</p> <p>Maria Alba Cincotto, Dr. Professor, Universidade de Sao Paulo Campus de Sao Paulo: Universidade de Sao Paulo maria.cincotto@poli.usp.br She has already conducted and published research in this study area.</p> <p>Rui Novais, Dr. Professor, University of Aveiro: Universidade de Aveiro ruimnovais@ua.pt He has already researched and published in this study field.</p>

	<p>Dong-yan Liu, Dr. Professor, Chongqing University cqdyliu@yahoo.com.cn He has already researched and published in this study field.</p>
--	--

Dr. I. Michael C. Forde

Editor-in-Chief, Journal of Cleaner Production

December 15, 2020

Dear Dr. I. Michael C. Forde:

I am pleased to submit an original research article entitled "**UTILIZATION OF RED MUD OF THE BRAZILIAN AMAZON TO PRODUCE CIVIL CONSTRUCTION MATERIALS**" by Agostinho Alves Oliveira Jr., Thayná Silva, Maurílio Pimentel, Marcelo de Souza Picanço, Woshigton Silva Brito, André Mileo and Alcebíades Negrão Macêdo for consideration for publication in Journal of Cleaner Production.

This manuscript has not been published and is not under consideration for publication elsewhere. We have no conflicts of interest to disclose.

Thank you for your consideration!

Sincerely,

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Agostinho', with a large, sweeping horizontal stroke underneath.

Agostinho Alves de Oliveira Jr.

Master in Civil Engineering, Department of Structures and Materials, Federal University Of Pará -Brazil

Utilization of red mud of the Brazilian Amazon to produce civil construction materials

Agostinho Alves de Oliveira Jr.^(a), Thainá Silva^(a), Maurílio Gomes-Pimentel^{(a)(*)}, Marcelo de Souza Picanço^(a), Woshigton Silva Brito^(a), André Mileo^(a), Alcebíades Negrão Macêdo^(a)

^a *Institute of Technology, Federal University Of Pará – Belém, Pará 66055-490, Brazil*

**Corresponding author: mauriliogp@ufpa.br, R. Augusto Corrêa, 01 - Guamá, Belém - PA, 66075-110, Brazil. Tel +55 91 980301394*

Abstract

Currently there is a valorization of industrial waste, not only because of the environmental aspect, but also to aim a possible economic gain through its reuse. Red mud - a residue of alumina refined by the Bayer process- is part of this scenario, since the most common destinations cause damage to the environment, and in that sense there are studies that already explore some alternative applications. However, these works show some flaws in the use of the waste. Thus, this work seeks to evaluate the effects of calcined red mud, in order to promote improvements in the microstructural properties. With the analysis of the obtained characterization we observed that the calcination induced the appearance of a new mineralogical phase, increased the specific weight and the particle-size distribution, and it also decreased the surface area and caused a change in the loss on ignition. From these results, we deduced some applications of this waste in the construction industry: using its chemical compounds in a mix with Portland cement, or benefiting from the physical properties generated from the calcined red mud to increase geopolymeric cements. As well as, the evaluation for environmentally favorable application and industrial uses, due to its large amount of Fe and Al present, red mud can be used as a catalyst, and because of its alkalinity it can be applied as a desulphurant, or as an adsorbent and an inorganic dye.

Keywords: waste, bauxite, thermal analysis, reuse

1. Introduction

The production of alumina by the Bayer process generates large amounts of an insoluble waste, known as red mud, and for each ton of alumina, 1.6 tons of this material are generated (Kumar and Kumar, 2013). Currently, the most used destinations of red mud are storage in ponds or dry stacking. However, due to its high alkalinity it can cause problems in soil fertility, it can also pollute water resources and cause a negative impact on living organisms (Nikbin et al., 2016).

Each year the production of this waste has been increased, which causes concern to develop methods and to find alternatives for the proper disposal and use of this material. Another important factor to be highlighted is that the recovery of waste has increased in the recent decades, not only due to environmental concerns, but also because of the recognition that natural resources are limited and the transformation of a material once considered unusable in a raw material involve economic gains.

There are already many studies regarding the reuse of this material, however it appears that there are flaws in the actual application, for example, according to Tang et al., (2018) the incorporation of red mud causes a negative impact on the properties of fresh concrete, which requires the use of more superplasticizer. The aforementioned author used in his study the material in natura and disintegration and drying were the only treatments carried out, there was no procedure performed in order to improve the performance, since it has a porous nature that will consequently absorb more water and decrease the fluidity.

Regarding the composition of red mud, it consists mainly of aluminum oxide (Al_2O_3), ferric oxide (Fe_2O_3), silicon dioxide (SiO_2) and titanium dioxide (TiO_2) (Dodoo-Arhin et al., 2017). Thus, it is proposed to perform a thermal treatment at different temperatures on this residue, looking to achieve improvements in its properties for more effective applications.

Because of this, the present study aims to evaluate the effects of calcination at temperatures

of 600°C, 800°C and 1000°C of the red mud of the Amazon region, then, by analyzing its physical, chemical and mineralogical characteristics point out some suggestions for application and/or reuse of this material.

2 Materials and methods

2.1 Red mud processing

The red mud was analyzed both in natura (dried at 105 ° C), such as in calcined state at temperatures of 600°C, 800°C and 1000°C. The calcination procedure took place in a muffle furnace with a heating rate: 15°C/min, as soon as it reached the desired temperature, the material remained in the furnace for 2 hours and subsequently, it went through natural cooling. Then, each red mud sample was disaggregated until they passed through a sieve with an opening equal to 75 µm. These described procedures are synthetically represented in figure 1.

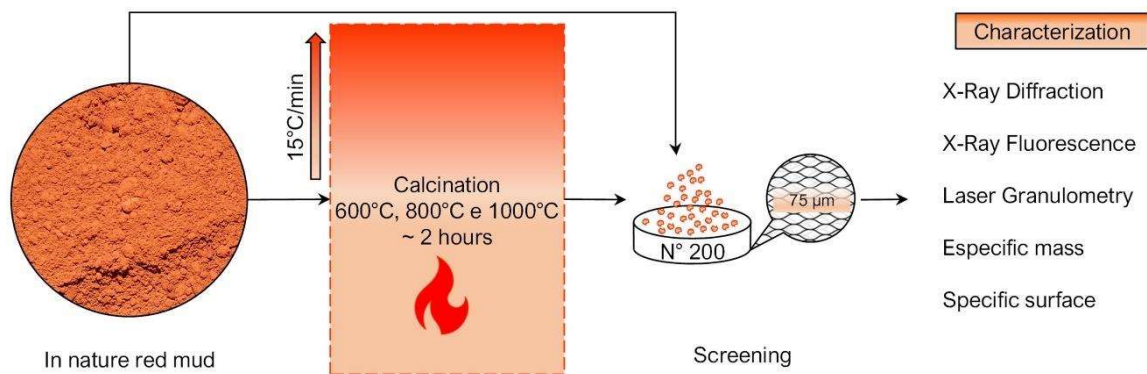


Figure 1: Experimental design: summary of the procedures carried out for the processing and the characterization of the red mud.

2.2 Characterization

The test of specific weight was performed based on the standard procedures for determining the specific gravity of soils (DNER-ME - 093/94, 1994). X-ray diffraction analysis (XRD) was performed using a divergent beam diffractometer equipped with an θ - θ goniometer, a Cu X-ray tube with Cu radiation (K-alpha = 1.540598 Å) and a Ni K β filter . The conditions of the instrument were as follows: 40kV and 40mA; 2.5 ° soller slit both incident and refracted beam); angular range (2θ) from 5 ° to 75 °. The collection of the diffractograms was executed with a 0.02° angular step and 0.5 s° per step, divergent gap of 0.6 mm. The particle size analysis was conducted by laser diffraction, the speed of ultrasound was 60s, the measures were 60/60/4 and the material samples were immersed in water. The chemical compositions' ratios were determined using a sample with anhydrous lithium tetraborate fusion, in the ROC-1 calibration (Rocks), X-ray fluorescence spectrometer, by PANalytical, model Zetium; loss on ignition (PF) was out at 1020 ° C for 2 hours. The red mud surface area was calculated by the BET method (Brunauer-Emmett-Teller Theory that explains physical adsorption of gas molecules on a solid surface) using the Nova Station A instrument, it is determined by the nitrogen adsorption at 77K, with a density of 1g / cc. The analysis time for the fresh sample was 24.8 min, as for the sample calcined at 600 ° C it was 23.3 min, the one at 800 ° C it was 22.9 min and, finally, at 1000 ° C it was 20.3 min.

The scanning electron microstructure (SEM) analysis of red mud and the metakaolin were performed in a SEM equipped with energy dispersive spectroscopy (EDS) operated for analysis of scattered retro electrons. During the analysis, it was noticed that the volume of the SEM interaction contains signals from several phases, for example, the x-rays generate results where it is possible to perform the chemical characterization of the elements at a certain point in the image. The SEM was operated with an electron beam current of 80 μ A, constant acceleration voltage of 20 kV, the working distance was 8.5 mm.

3 Results

3.1 Specific weight

The specific weight of red mud changes depending on the mineralogy of the rock that it is generated from. For the tested sample of red mud, there was an increase in the specific weight increasing the calcination temperature (Table 1).

Table 1: Specific weight results of red mud in g/cm³: the calcination of red mud increased the specific weight according to the temperature increase.

In natura	600°C	800°C	1000°C
2,741	3,007	3,012	3,028

3.2 X-ray diffraction

According to the mineralogical analysis (Figure 2), the red mud, in natura, contains peaks, which are gibbsite (Al(OH)₃), goethite (FeO(OH)), anatase (TiO₂), hematite (Fe₂O₃) and sodalite (Na₄Al₃(SiO₄)₃Cl). When this material is put under the calcination procedure at 600 ° C, sodalite does not undergo transformation, as well as goethite, hematite and anatase, however, the peak of gibbsite disappears. In calcination at 800 ° C, there is no noticeable change, which means that the minerals found at 600 ° C remain. When red mud is calcined at 1000 ° C, there is a decomposition of sodalite, anatase and goethite, as well as the appearance of nepheline (NaAlSiO₄) and that the permanence of the hematite without any restructuring.

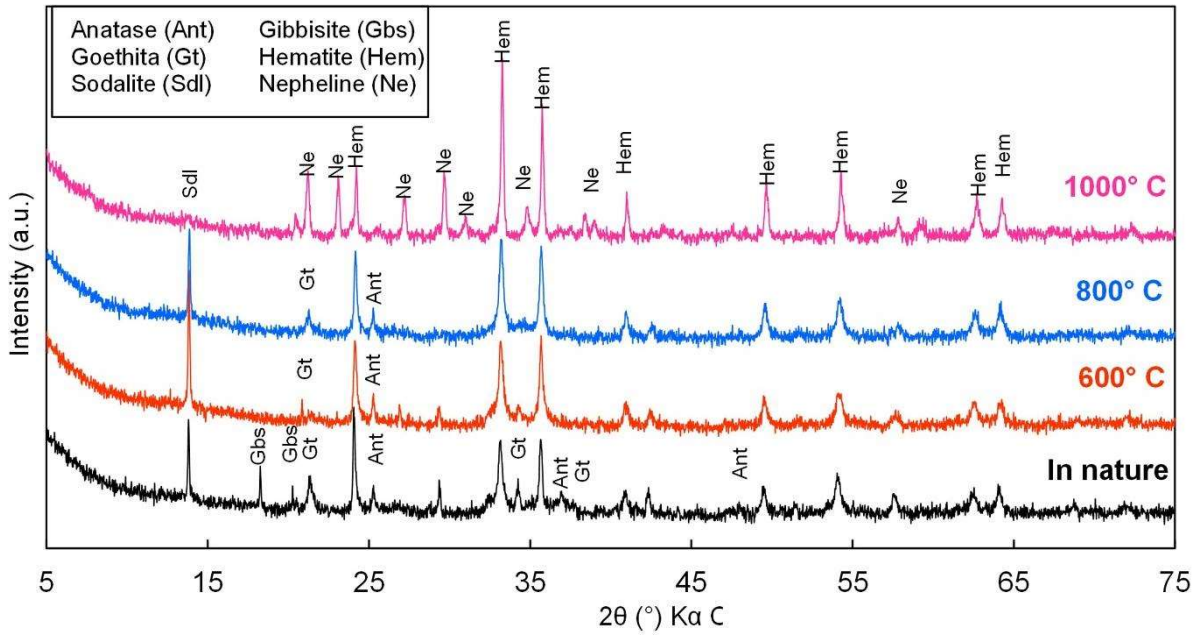


Figure 2: Diffractograms obtained from the red mud: the heat treatment of red mud has disrupted its mineralogical composition, which has formed new phases: at 1000 ° C only the hematite has preserved and the nepheline has appeared.

3.3 X-ray fluorescence (XRF)

The chemical composition of red mud depends on the origin of bauxite, however it is common that it contains iron, titanium, silica and part of aluminum that are present in the bauxite (Kim et al., 2017), which was observed for this analyzed red mud (Table 2). The presence of Na₂O is due to the addition of sodium hydroxide during the digestion step in the Bayer process.

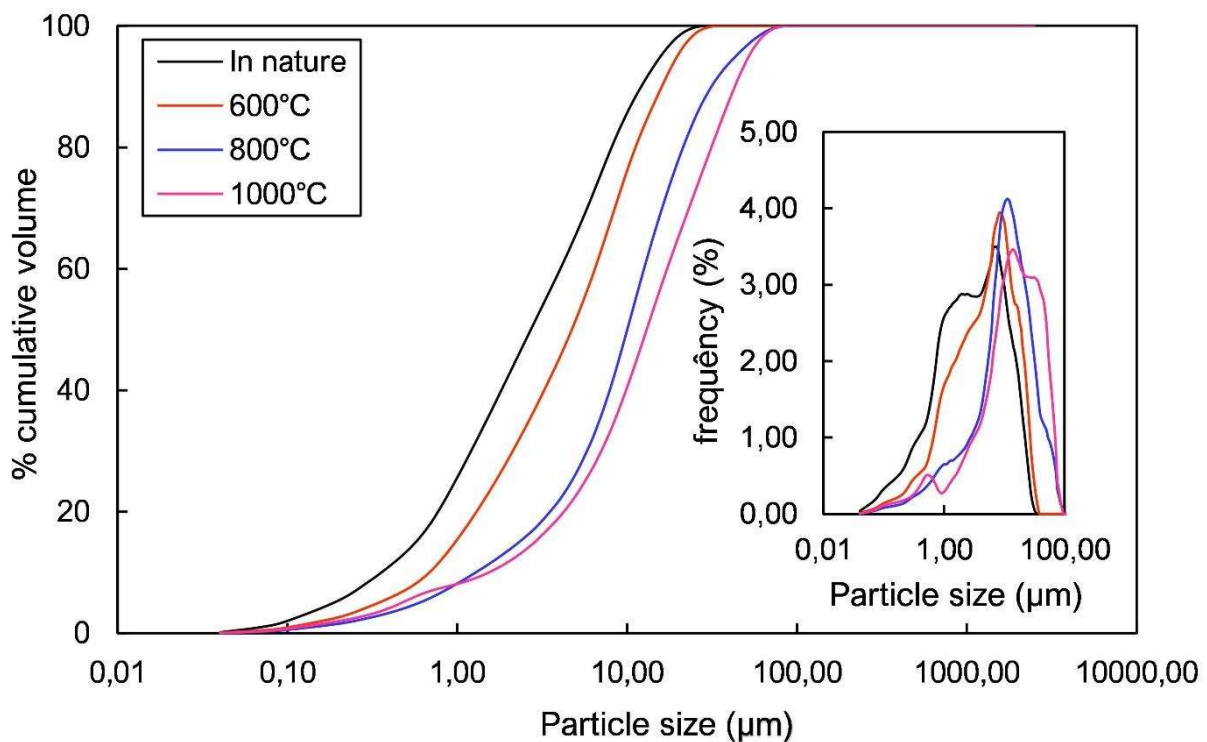
Table 2: The XRF of red mud in natura and calcined at temperatures of 600°C, 800 ° C and 1000 ° C: the chemical compounds predominant in the analyzed material are silica, alumina and hematite and the amount of each compound does not vary significantly, only the percentage of loss on ignition (LOI).

Composition %	In natura	600°C	800°C	1000°C
SiO ₂	18,2	18,3	18,7	18,2
Al ₂ O ₃	21,6	22,6	23,0	22,4

Fe ₂ O ₃	30,4	31,0	31,7	30,9
MnO	0,15	0,16	0,16	0,15
MgO	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10
CaO	1,47	1,47	1,51	1,48
Na ₂ O	10,9	11,2	11,4	11,1
K ₂ O	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10
TiO ₂	5,79	6,10	6,23	6,07
P ₂ O ₅	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10
LOI	9,73	6,94	4,74	7,84

3.4 Granulometry

The increase in temperature can promote the aggregation of grains through drying and heating of the particles (Jiang et al., 2017), this aggregation causes an increase in the size of the particles. As with this analyzed red mud, as the calcination temperature increased, the material had an increase in the particle size distribution of its particles (Figure 3).



1 **Figure 3** - Particle size analysis of red mud: The increase in calcination temperature led
2 to an increase in the particle size distribution of red mud, although in all temperatures they
3
4 had a very continuous particle size distribution.
5
6

7 **3.5 The BET method**

8
9
10 Calcination on high temperatures can lead to producing some sintered components, and
11 it acts on the surface area decreasingly (Kurtoğlu et al., 2016) and by filling the existing
12 voids, this process reduces the amount of pores. Thus, as the temperature that the red mud is
13 calcined gets higher, the surface area gets smaller (Table 3). What can also be proven by
14 analyzing the particle size distribution of the material, once the particle size is increased by
15 the calcination and the material became thicker, therefore the surface area value presented a
16 decrease.
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26

27 **Table 3:** Surface areas of red mud in fresh and calcined states at different temperatures: by
28 increasing temperature, the material has suffered a decrease in the specific surface area.
29
30
31

In natura	600°C	800°C	1000°C
24,921 m ² /g	19,085 m ² /g	15,327 m ² /g	7,515 m ² /g

32 33 34 35 36 37 38 39 **3.5 Scanning electronic microstructure**

40
41
42 The scanning electron image of the microstructure of red mud generated by
43 backscattered electrons allowed to confirm that the particles of red mud in natura are finer
44 than the ones of calcined red mud (Figure 4A and 4B). An enlargement of the sample of
45 calcined red mud at 600°C allows a better visualization of the particle size distribution
46 (Figure 4C). Hematite particles are found in red mud, both fresh (Figure 4D) and calcined
47 (Figure 4E), an EDS analysis allows the confirmation of solid presence of hematite in red
48 mud (Figure 4F). These results are in accordance with the laser and BET particle size
49 distribution data.
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

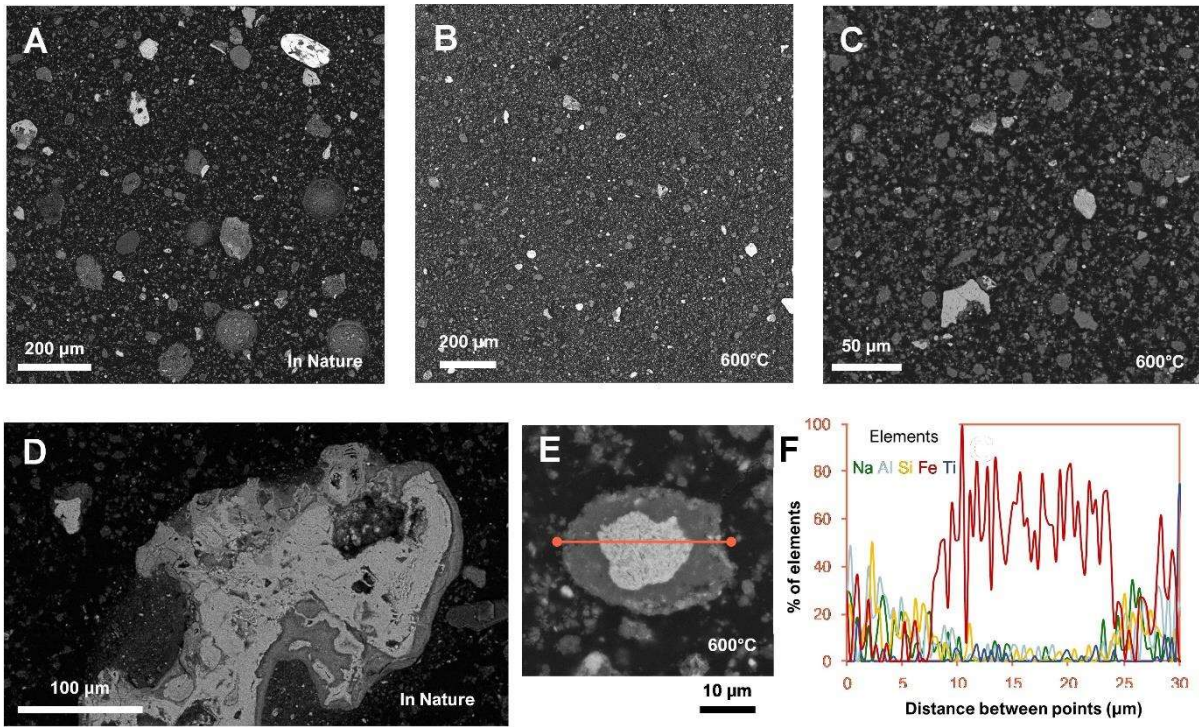


Figure 4: Microstructure of fresh and calcined red mud: (A) SEM of fresh red mud. (B and C) SEM of the red mud that is calcined at 600°C. (D) Hematite particle in fresh red mud. (E) enlargement of a red mud particle composed mostly of Fe, the orange line of E is scanned by EDS and shown in F.

4 Discussion

The sintering process of a material reduces its porosity, which reduces the reactivity accessibility of the alkaline solution. Furthermore, this process increases the particle size distribution and reduces the external surface area (Dietel et al., 2017), and depending on the temperature of calcination, the specific weight may also vary (Wu and Liu, 2012), these discussed characteristics contribute to the results obtained in this work. The increase in the specific weight may also have been caused by the melting effects of sodium oxide (Na_2O) that is present in the chemical composition and also by the more dense and stable crystal structure.

1 By analyzing the DRX it is observable the appearance of a new phase: the nepheline,
2 which was caused by the heat treatment at a temperature of 1000 ° C. This mineral is resistant
3 to high temperatures and its use in the industry of aggregates for civil construction has been
4 much discussed (CETEM, 2008). Furthermore, by analyzing the diffractogram of red mud it
5 is not possible to detect the gibbsite at temperatures above 600°C, which is due to the
6 pyrolysis (Wu and Liu, 2012), which means that it decomposes due to high temperatures and
7 the absence of oxygen.
8
9

10
11
12
13
14
15
16
17 The high content of Al₂O₃ tends to increase the refractory property of the material,
18 which implies that it becomes more resistant to high temperatures (Pinheiro and Holanda,
19 2010). As well as the alkaline oxide K₂O and the alkaline earth promoters CaO and MgO also
20 characterize the high refractoriness of red mud, despiting the fact they have low percentage
21 values in the red mud's mineral composition. Alongside the iron oxide, this alkaline oxide and
22 the alkaline earth oxides act as melting materials (Helena et al., 2004), and they have great
23 influence during the burning process, which favors the sintering and densification processes
24 (Silva et al., 2005).
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35

36
37 The loss on ignition test presents the presence of molecular water and organic matter in
38 the material, and it is used to measure volatile species, unburned carbon and humidity in solid
39 materials, it can result from the partial water loss from the structure and the decomposition of
40 some unstable minerals (Mu et al., 2017), for this reason the results decreased due to the
41 calcination of red mud at 600 ° C and 800 ° C and increased at 1000 ° C because of the
42 appearance of nepheline, which is a more resistant mineral.
43
44
45
46
47
48
49
50

51 ***4.1 Red mud as a sustainable raw material used in the production of construction materials***

52
53
54 Red mud is a material characterized by a complex composition that depends on the
55 origin of bauxite, and there are not many recent reports in the literature about characterization
56 such as the one performed in this work. The results present changes in the chemical
57
58
59
60
61
62
63
64
65

1 composition of this material caused by different temperatures of calcination, however the
2 most significant change was not in relation to the compounds, but to the loss on ignition that
3 presented a great variation. In addition, we verified changes in the physical properties and in
4 the mineralogy of the material, like the decomposition of some minerals suffer and the
5 appearance of more resistant phases.
6
7
8
9
10

11 As seen in the results regarding the chemical compounds present in red mud, silica
12 (SiO_2), alumina (Al_2O_3) and iron oxide (Fe_2O_3) are the main components, as well as
13 presenting an important percentage of sodium oxide (Na_2O) and titanium dioxide (TiO_2). The
14 silica that is present is a compound that improves the mechanical responses of the mixes after
15 hardening due to the accelerated heterogeneous nucleation, the better packaging of the
16 mixtures and the greater reactivity of the particles since they are fine (Flores et al., 2017).
17
18
19
20
21
22
23
24
25

26 Similarly to silica, alumina also increases the compressive strength of Portland cement
27 pastes on account of its ability to refine the pores of the mixture and it also accelerates the
28 hydration and decreases the workability (Gowda et al., 2017). Furthermore, alumina
29 improves the properties of refractory concrete, and it has a high melting point and good
30 mechanical properties, which makes it suitable for high-temperature applications (Kumar et
31 al., 2014).
32
33
34
35
36
37
38
39
40

41 Titanium dioxide, on the other hand, accelerates the formation of the C-S-H gel and it
42 improves the microstructure of the concrete, which leads to improved durability and
43 increased strength (Jalal et al., 2013). However, this compound does not behave as a
44 pozzolanic material, so it does not increase the consumption of free building lime (Essawy
45 and Abd, 2014). In addition, anatase (TiO_2) is widely employed as a catalyst, pigment and in
46 electronic materials, but these applications require high-purity titanium, so for that reason it is
47 necessary to control the size, morphology and texture of the crystal particles (Hsiang and Lin,
48 2006).
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

Regarding the physical properties of the red mud analyzed after calcination, such as reduced porosity, increased granulometry and lower surface area, less binder is needed to produce a highly compressive geopolymer cement due to the aforementioned characteristics (Dietel et al., 2017). Geopolymer cement is an innovative alternative to conventional Portland cement and it is manufactured with natural materials or industrial by-products, such as red mud, aiming to reduce carbon stocks. This cement is produced by mixing an aluminosilicate material, such as red mud, an easy-to-use alkaline reagent and water. This type of cement has a faster curing process, it reaches most of the resistance in 24 hours and makes a strong bond with all types of rock-based aggregates, and also it has good degree of fire resistance (Davidovits, 2015). It is also considerable that the manufacturing energy consumption is low and it causes a low CO₂ emission (Essaidi et al., 2013).

4.2 Red mud used for environmentally friendly and industrial applications

Red mud also has a promising application as a low-cost adsorbent in the water treatment to remove heavy metals, inorganic anions, metalloid ions, organic compounds and bacteria (Liu et al., 2011). This can be achieved after specific heat or chemical treatment on the material (Liu et al., 2009). In order to remove boron from an aqueous solution, for example, red mud needs to be neutralized to obtain a better use, which can be done by performing a treatment with sea water that reduces the alkalinity of the material without decreasing the capacity of adsorption (Liu et al., 2011). This material can also be neutralized with an acid, such as HCL (H₂SO₄), which can increase the surface area and the pore volume, what favors the adsorption (Wang et al., 2008).

Another possibility of using red mud is to absorb and to purificate acidic gases, such as SO₂. The bauxite residue can be carried out as a desulfurant because it has high alkaline capacity. The waste that results from this process can be reused as a raw material for manufacturing cement (Liu et al., 2009).

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

Furthermore, the bauxite waste after calcination at high temperatures can produce inorganic dyes, once the obtained materials present new crystalline structures when they are mixed with ceramic pigments as additives, they produce pigments with stable and high intensity colors (Carneiro et al., 2018a). The use of red mud as a pigment is acceptable when it brings advantages of performance and also improvements in environmental and economic aspects. According to Carneiro et al. (2018b), the addition of 3% weight in this calcined material accomplishes a better performance than the dry one in natura and it is a more stable coloring agent than commercial hematite.

Another possibility of using red mud is in absorption and purification of acidic residual gases, such as SO₂. The bauxite residue can be applied as a desulfurant due to its high alkaline capacity. The waste resulting from this process can be reused as a raw material for cement production (Liu et al., 2009).

5 Conclusions

By characterization analysis obtained by the heating treatment of bauxite waste from the Amazon region, it was observed changes in its physical properties, such as increase in specific weight and in particle-size distribution and decrease in the surface area, which were caused by the sintering of the material. Moreover, the mineralogical composition has changed from the decomposition of some minerals and the appearance of nepheline, and also it was noticeable the permanence of hematite at all temperature indices. Regarding the chemical compounds, there were percentage changes, however they were not as significant as the changes in the percentage values of loss on ignition - what was consequence of the partial loss of water in the structure and the decomposition of some unstable minerals.

The results suggest several applications to reuse this material since this process upgrades its properties, such as the manufacture of Portland cement or geopolymer cement, a

1 low cost adsorbent for water treatment, a catalyst for industrial applications, and absorption
2 and purification of acidic gases.
3
4

5 **Acknowledgements**

6

7
8 The authours like to thank the Ceramic Materials Laboratory (LACER) of the
9
10 Universidade Federal do Rio Grande do Sul for the chemical analysis, the BET analysis and
11
12 the laser particle size analysis; to Kelly Oliveira from the Laboratory of X-rays, Thermal and
13
14 Dielectric Analysis of PPGF of UFPA, to the Laboratory of Civil Engineering at the
15
16 Universidade Federal do Pará in the specific weight test. Similarly, to the company Hydro
17
18 Alunorte for the donation of red mud and the Chemical Engineering Laboratory of UFPA for
19
20 calcinating and processing red mud.
21
22
23
24

25 **References**

26

27
28 CARNEIRO, J.; CAPELA, M. N.; TOBALDI, D. M.; NOVAIS, R. M.; SEABRA, M. P.;

29
30
31 LABRINCHA, J. A. Red mud and electroplating sludge as coloring agents of distinct
32
33 glazes: The influence of heat treatment. *Materials Letters*, v. 223, p. 166-169, 2018.

34
35
36 doi: 10.1016/j.matlet.2018.04.013
37

38
39 CARNEIRO, J.; TOBALDI, D. M.; HAJJAJI, W.; CAPELA, M. N.; NOVAIS, R. M.;

40
41 SEABRA, M. P.; LABRINCHA, J. A. Red mud as a substitute coloring agent for the
42
43 hematite pigment. *Ceramics International*, v. 44, p. 4211-4219, 2018. doi:

44
45
46 10.1016/j.ceramint.2017.11.225
47

48 **DANTAS**, A. P. A. ACCHAR, W., LEITE, J. Y. P., ARAÚJO, F. S. D. Utilization of residue

49
50 of ornamental rocks in the porcelainized stoneware, v. 1, p. 92-108, 2010. Doi:

51
52
53 <https://doi.org/10.15628/holos.2010.309>
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

1 DAVIDOVITS, J. Geopolymer cement: a review. Available at:

2 <<http://www.geopolymer.com.br/PDF/GPCimento2013.pdf>>. Accessed on: July 26,
3
4 2020.
5

6
7 DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. Soils - determination of
8
9 the actual density (in Portuguese). DNER-ME 093/94. 1994.
10

11 DIETEL, J.; WARR, L. N.; BERTMER, M.; STEUDEL, A.; GRATHOFF, G. H.;

12
13 EMMERICH, K. The importance of specific surface area in the geopolymerization of
14
15 heated illitic clay. Applied Clay Science, v. 139, p. 99-107, 2017. Doi:
16
17 10.1016/j.clay.2017.01.001
18
19

20
21
22 ESSAIDI, N.; SAMET, B.; BAKLOUTI, S.; ROSSIGNOL, S. Effect of calcination

23
24 temperature of Tunisian clays on the properties of geopolymers. Ceramics-Silikáty, v.
25
26 57, p. 251-257, 2013.
27

28
29 FLORES, Y.C.; CORDEIRO, G.C.; TOLEDO FILHO, R. D.; TAVARES, L.M. Performance
30
31 of Portland cement pastes containing nano-silica and diferente types of sílica.

32
33 Construction and Building Materials, v. 146, p. 524-530, 2017. Doi:
34
35 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.069
36
37

38
39 GOWDA, R.; NARENDRA, H.; RANGAPPA, D.; PRABHAKAR, R. Effect of nano-

40
41 alumina on workability, compressive strenght and residual strenght at elevated
42
43 temperature of Cement Mortar. Materials today: Proceedings, v. 4, p. 12152-12156,
44
45 2017. Doi: 10.1016/j.matpr.2017.09.144
46
47

48
49 JIANG, C.; SÉQUARIS, J.; VEREECKEN, H.; KLUMPP, E. Effects of temperature and

50
51 associated organic carbon on the fracionation of water-dispersible colloids from their
52
53 loam topsoils under diferente land use. Geoderma, v. 299, p. 43-53, 2017. Doi:
54
55 10.1016/j.geoderma.2017.03.009
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

1 KIM, S. Y.; JUN, Y.; JEON D.; OH, J. E. Synthesis of structural binder for red brick
2 production based on red mud and fly ash activated using $\text{Ca}(\text{OH})_2$ and Na_2CO_3 .
3
4 Construction and Building Materials, v. 147, p. 101–116, 2017. Doi:
5
6 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.171
7
8

9 KUMAR, A.; KUMAR, S. Development of paving blocks from synergistic use of red mud
10 and fly ash using geopolymerization. Construction and Building Materials, v. 38, p.
11
12 865-871, 2013. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.09.013
13
14
15

16 KUMAR, P. H.; SRIVASTAVA, A.; KUMAR, V.; SINGH, V. K. Implementation of
17 industrial waste ferrochrome slag in conventional and low cement castables: Effect of
18
19 calcined alumina. Journal of Asian Ceramic Societies, v. 2, p. 371-379, 2014. Doi:
20
21 10.1016/j.jascer.2014.08.001
22
23
24

25 KURTOGLU, S. F.; UZUN, S. S.; UZUN, A. Tuning structural characteristics of red mud by
26 simple treatments. Ceramics International, v. 42, p. 17581-17593, 2016. Doi:
27
28 10.1016/j.ceramint.2016.08.072
29
30
31

32 LIU, W.; YANG J.; XIAO, B. Review on treatment and utilization of bauxite residues in
33
34 China. International Journal of Mineral Processing, v. 93, p. 220-231, 2009. Doi:
35
36 10.1016/j.minpro.2009.08.005
37
38
39

40 LIU, Y.; NAIDU, R.; MING, H. Red mud as an amendment for pollutants in solid and liquid
41
42 phases. Geoderma, v. 163, p. 1-12, 2011. Doi: 10.1016/j.geoderma.2011.04.002
43
44
45

46 MU, Y.; SAFFARZADEH, A.; SHIMAOKA, T. Influence of ignition process on mineral
47
48 phase transformation in municipal solid waste incineration (MSWI) fly ash:
49
50 Implications for estimating loss-on-ignition (LOI). Waste Management, v. 59, p. 222-
51
52 228, 2017. Doi: 10.1016/j.wasman.2016.09.028
53
54
55

56 NIKBIN, I. M.; ALIAGHAZADEH, M.; CHARKHTAB, SH.; FATHOLLAHPOUR, A.
57
58 Environmental impacts and mechanical properties of lightweight concrete containing
59
60
61
62
63
64
65

1 bauxite residue (red mud). *Journal of Cleaner Production*, v. 172, p. 2683-2694, 2016.

2 Doi: 10.1016/j.jclepro.2017.11.143

3
4 PINHEIRO, B. C. A.; HOLANDA, J. N. F. Effect of the firing temperature on some

5 mechanical properties of red ceramic. *Cerâmica*, v. 56, p. 237-243, 2010. Doi:

6
7 10.1590/S0366-69132010000300005

8
9
10
11 SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A.; BRAGA, P. F. A. Nefelina Sienito. In: DA LUZ, A.

12 B.; LINS, F. A. F. Rochas e minerais industriais: usos e especificações. CETEM/MCT,

13
14 2008. Cap. 30, p. 663 – 680.

15
16
17
18 SILVA, J. B.; HOTZA, D.; SEGADÃES, A. M.; ACCHAR, W. Incorporation of marble and

19 granite sludge in clay materials. *Cerâmica*, v. 51, p. 325-330, 2005. Doi:

20
21 10.1590/S0366-69132005000400004

22
23
24
25 TANG, W. C.; WANG, Z.; LIU, Y.; CUI, H. Z. Influence of red mud on fresh and hardened

26 properties of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, v. 178, p.

27
28 288-300, 2018. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.05.171

29
30
31
32 WANG, S.; ANG, H. M.; TADÉ, M. O. Novel applications of red mud as coagulant,

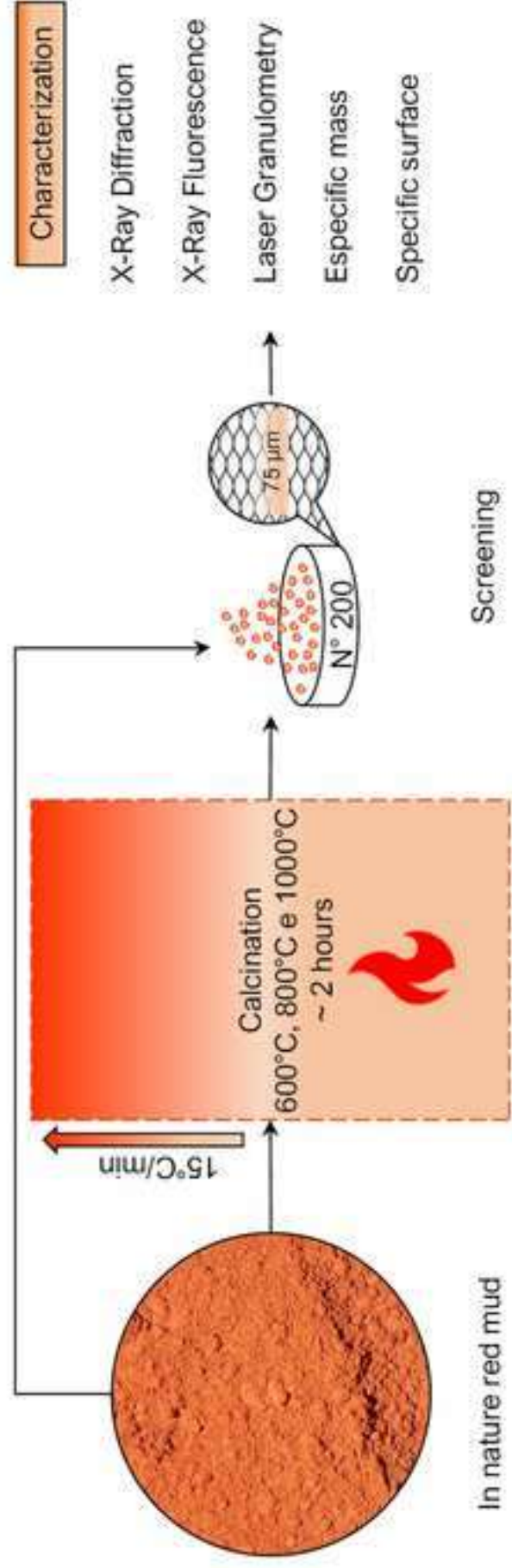
33 adsorbent and catalyst for environmentally benign processes. *Chemosphere*, v. 72, p.

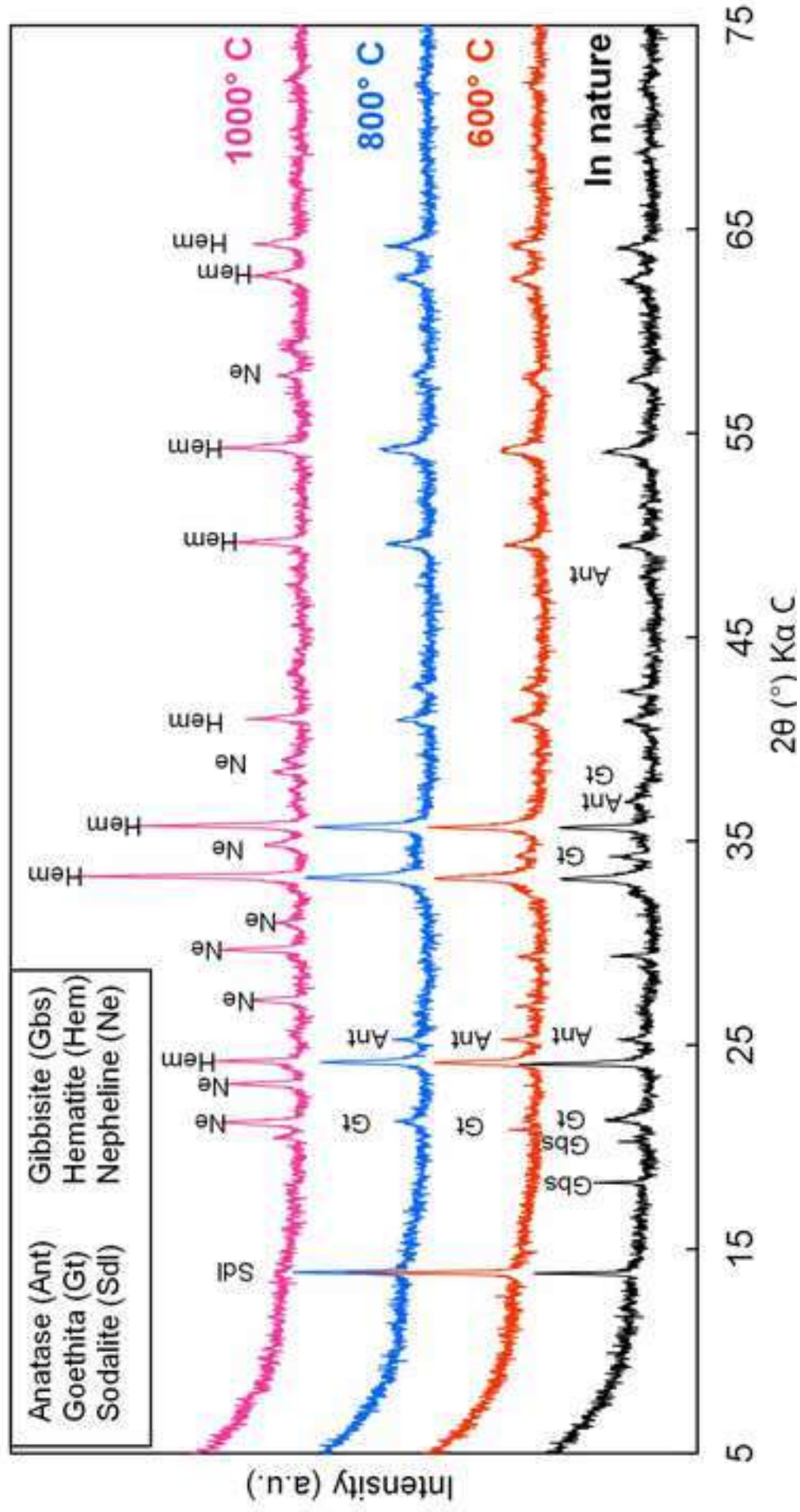
34
35 1621-1635, 2008. Doi: 10.1016/j.chemosphere.2008.05.013

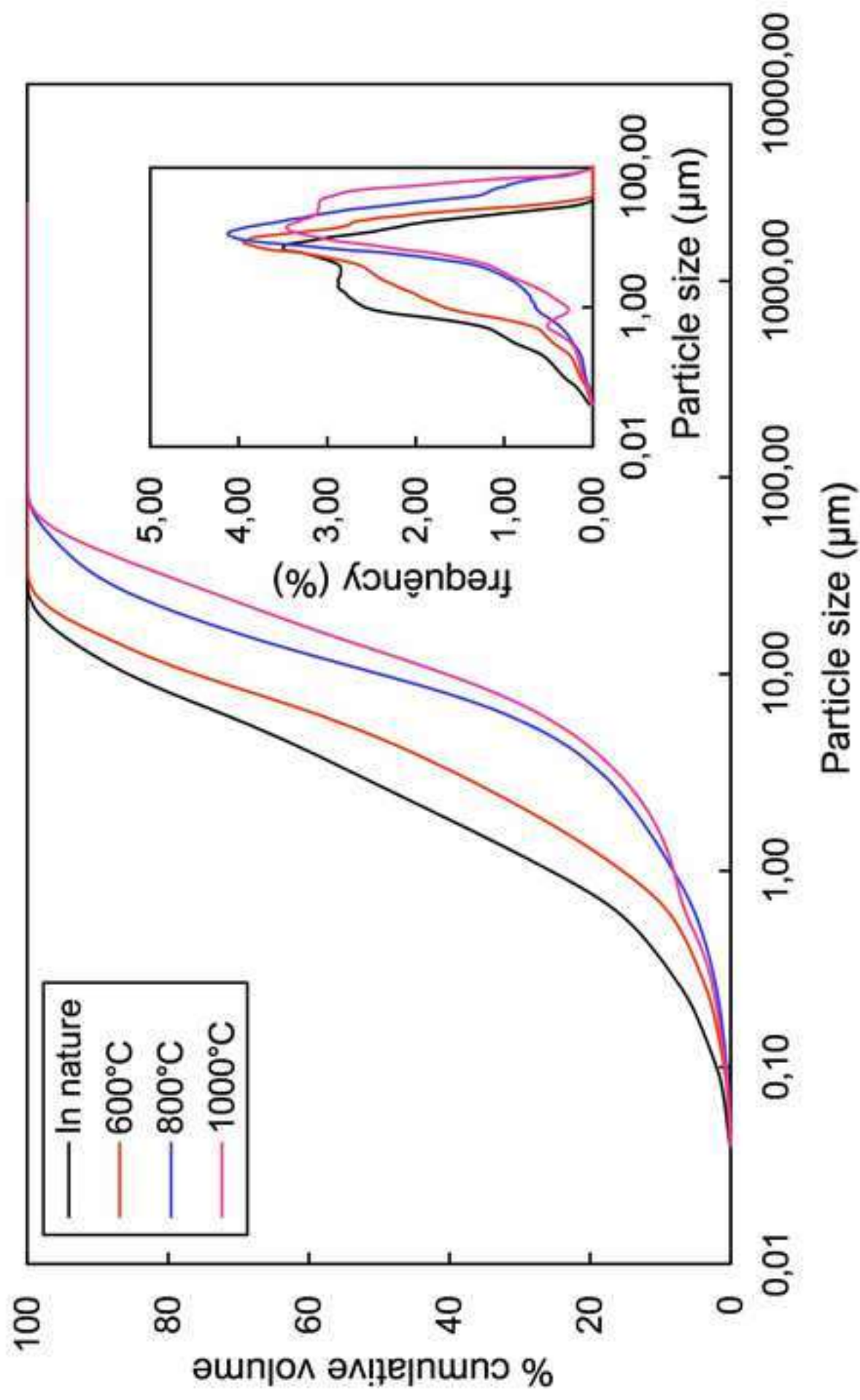
36
37
38
39 WU, C. S.; LIU, D. Y. Mineral phase and physical properties of red mud calcined at different

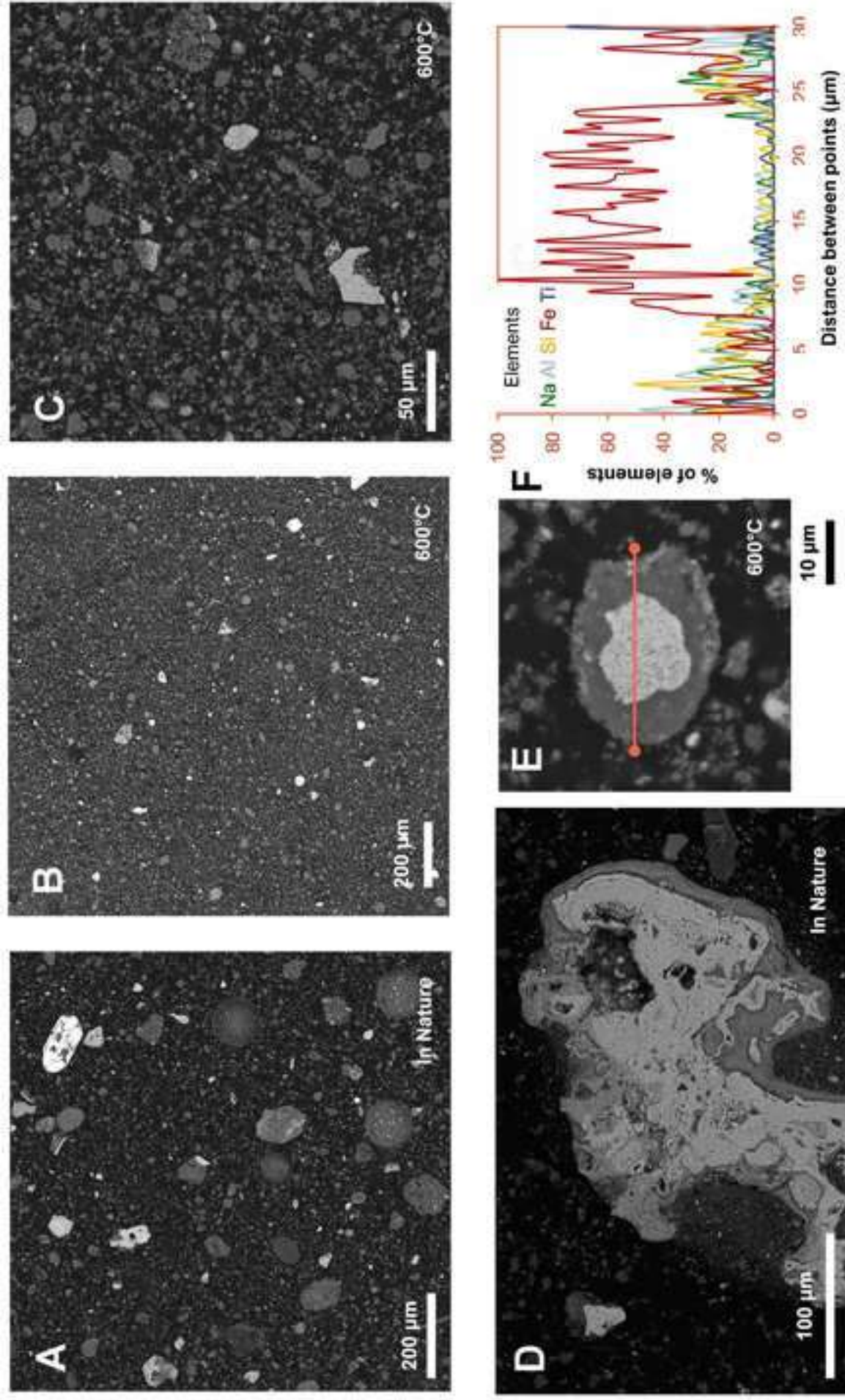
40 temperatures. *Journal of Nanomaterials*, v. 2012, n. 3, 2012. Doi: 10.1155/2012/628592

41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65









HIGHLIGHTS

- The heat treatment of red mud generated a new mineralogical phase.
- By increasing the calcination temperature of red mud it changes in the specific weight.
- Calcination benefits the material, so it can be used for the production of geopolymeric binders.
- Red mud is a low-cost material that is used as a catalyst.

Declaration of interests

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

The authors declare the following financial interests/personal relationships which may be considered as potential competing interests:

Authors' information

Agostinho Alves de Oliveira Jr, Master in Civil Engineering, Department of Structures and Materials, Federal University Of Pará – Brazil.

Thainá Silva, Civil Engineering, Department of Structures and Materials, Federal University Of Pará – Brazil.

Maurílio Gomes-Pimentel, Master in Civil Engineering, Department of Structures and Materials, Federal University Of Pará – Brazil.

Marcelo de Souza Picanço, Doctor in Civil Engineering, Professor, Department of Structures and Materials, Federal University Of Pará – Brazil.

Woshigton Silva Brito, Master in Chemical Engineering, Department of Structures and Materials, Federal University Of Pará – Brazil.

André Mileo, Doctor in Engineering of Natural Resources of the Amazon, Department of Structures and Materials, Federal University Of Pará – Brazil.

Alcebíades Negrão Macêdo, Doctor in Civil Engineering, Professor, Department of Structures and Materials, Federal University Of Pará – Brazil.

Authors' contributions

MGP, WSB, AAOJ and AM initiated the research idea under supervision of MSP and ANM. TS and MGP organized the whole research of this study and wrote the manuscript. MGP, WSB, AM, TS and AAOJ ran the experimental research program. All authors read and approved the final manuscript.