



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE ANANINDEUA  
FACULDADE DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

RODRIGO NASCIMENTO MARINHO

**INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA E DO PATAMAR DE SINTERIZAÇÃO NA  
PRODUÇÃO DE AGREGADOS SINTÉTICO PRODUZIDOS A PARTIR DO  
RESÍDUO DO PROCESSO BAYER COM ADIÇÃO DE BIOMASSA**

ANANINDEUA-PA  
2022

RODRIGO NASCIMENTO MARINHO

**INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA E DO PATAMAR DE SINTERIZAÇÃO NA  
PRODUÇÃO DE AGREGADOS SINTÉTICO PRODUZIDOS A PARTIR DO  
RESÍDUO DO PROCESSO BAYER COM ADIÇÃO DE BIOMASSA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à banca examinadora da Faculdade de Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Pará, Campus Ananindeua, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Edinaldo José de Sousa Cunha

Coorientador: Eng. Me. Maílson Batista de Vilhena

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD  
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará  
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a)  
autor(a)**

---

M337i Marinho, Rodrigo Nascimento.  
Influência da temperatura e do patamar de sinterização  
na produção de agregados sintético produzidos a partir do  
resíduo do processo Bayer com adição de biomassa /  
Rodrigo Nascimento Marinho. — 2022.  
82 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Edinaldo José de Sousa Cunha  
Coorientador(a): Eng. Me. Maílson Batista de Vilhena  
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) -  
Universidade Federal do Pará, Campus Universitário de  
Ananindeua, Curso de Engenharia de Materiais, Ananindeua,  
2022.

1. Lama Vermelha. 2. Carçoço do açai. 3. Agregado  
sintético. I. Título.

RODRIGO NASCIMENTO MARINHO

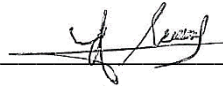
**INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA E DO PATAMAR DE SINTERIZAÇÃO NA  
PRODUÇÃO DE AGREGADOS SINTÉTICO PRODUZIDOS A PARTIR DO  
RESÍDUO DO PROCESSO BAYER COM ADIÇÃO DE BIOMASSA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à banca examinadora da Faculdade de Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Pará, Campus Ananindeua, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Aprovado em : 08/07/2022

Conceito: excelente

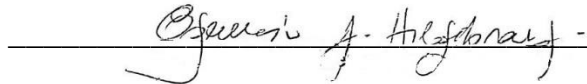
**BANCA EXAMINADORA**



Prof. Dr. Edinaldo José de Sousa Cunha  
(FEMat/CAMPANANIN/UFPA – Orientador)



Eng. Me. Maílson Batista de Vilhena  
(PRODERNA/ITEC/UFPA – Coorientador)



Prof. Dr. Edemarino Araújo Hildebrando  
(FEMat/CAMPANANIN/UFPA – Examinador interno)



Prof. Me. Pedro Paulo Guimarães Ribeiro  
(FEMat/CAMPANIN/UFPA – Examinador interno)

ANANINDEUA-PA  
2022

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a toda a minha família que sempre me incentivou e me deu suporte para que o estudo viesse em primeiro lugar.

A todos os meus amigos que contribuíram de alguma forma para mais esta conquista.

A minha mãe Clementina Silva pelo incentivo e suporte que foi dado neste anos de graduação.

Ao meu Pai Fernando Marinho pelos incentivos e conselhos.

A Juliana Araujo que sempre esteve ao meu lado, me apoiando e incentivando e tornou esta etapa da vida um tanto quanto especial.

A minha fiel amiga Haianny Beatriz que sempre esteve ao meu lado nos bons momentos e principalmente nos momentos mais conturbados, tornando a graduação um momento especial e com certeza inesquecível.

Ao meu orientador Prof. Dr. Edinaldo Cunha pela orientação e apoio na realização deste trabalho.

Ao meu coorientador Me. Mailson Batista pelos ensinamentos, companheirismos e pela ajuda na realização deste trabalho.

A minha amiga Ana Paula Souza por surtar e estudar comigo nos momentos de maior pressão.

Aos meus companheiros de profissão, os engenheiros Carlos Eduardo e Rodolfo Lira, por toda ajuda e incentivo na realização deste estudo, e principalmente pelos momentos de descontração.

Ao PRODERNA/ITEC/UFPA pela oportunidade e apoio na realização deste trabalho.

Ao professor Dr. José Antonio por compartilhar seu vasto conhecimento e pelos ensinamentos.

Ao Laboratório de Engenharia Química (LEQ) pelo uso dos equipamentos.

E a todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

## RESUMO

A mineração é uma importante atividade para obtenção de matérias-primas para a indústria assim como para a economia de um país, no entanto são gerados toneladas de resíduos sólidos todo o ano, que muitas das vezes não tem uma destinação adequada. Como é o caso do resíduo gerado no beneficiamento da bauxita conhecido como lama vermelha, no qual são gerados de 1 a 2 toneladas deste resíduo para cada tonelada de alumina, o fato é que a quantidade remanescente deste resíduo é muito grande ao passo que um percentual muito pequeno do mesmo é reaproveitado. Resíduos urbanos também causam diversos problemas para o meio ambiente, como é o caso do resíduo do beneficiamento da polpa do açaí, mais especificamente o caroço, que é descartado de forma indevida nos centros urbanos. Nos dias atuais a preocupação com a preservação do meio ambiente é eminente, o que alavanca pesquisas com o intuito de reaproveitar os mais diversos resíduos da indústria. O resíduo em questão (lama vermelha) pode gerar um material com características mecânicas interessantes para serem usados na construção civil. Pesquisas apontam que o seu uso em concretos estruturais é uma saída economicamente viável para a destinação do mesmo, pois o volume de agregado natural usado diariamente na construção civil é muito grande. Ao passo que se tem uma destinação adequada para este resíduo, também se atenua a exploração de recursos naturais como a brita e o seixo rolado, no qual a sua exarcebada procura acarreta em passivos ambientais. O objetivo deste trabalho foi sintetizar agregados sintéticos a partir destes dois resíduos, simultaneamente ao uso de argila e areia. O percentual das matérias-primas foram fixados em 60, 20, 15 e 5 % de lama vermelha, sílica, carvão feito a partir do caroço do açaí e argila respectivamente, com o intuito de analisar os efeitos da temperatura e do patamar de queima nas reações de estado sólido no agregado. As matérias-primas passaram por um processo de beneficiamento: secagem, britagem e peneiramento em malha 100 mesh Tyler, posteriormente foi adicionado um percentual de 15 a 20 % de água para processo de extrusão, em seguida foram feitas queimas nas temperaturas de 1100 e 1200 °C com os patamares de sinterização de 3 e 4,5 horas. Em seguida os agregados foram caracterizados para se determinar as propriedades físicas e morfológicas. Os agregados sinterizados a 1100 °C apresentaram massa específica aparente de 2,13 g/cm<sup>3</sup> com o patamar de 3h e 1,87 g/cm<sup>3</sup> com o patamar de 4,5h, enquanto os agregados sinterizados a 1200 °C apresentaram os resultados de 2,01 g/cm<sup>3</sup> com o patamar de 3h e 2,19 g/cm<sup>3</sup> com o patamar de 4,5h. Nos resultados de microscopia eletrônica de varredura foi possível identificar a presença da fase múltipla secundária que apresenta uma estrutura que lembram agulhas em todas as amostras, onde a presença desta fase é de suma importância para conferir uma boa resistência mecânica ao material. Em suma, o uso da lama vermelha na produção de agregados sintéticos é uma importante alternativa para o uso deste resíduo que foi acumulado durante décadas, assim como traz benefícios econômicos para a indústria e principalmente para o meio ambiente.

**Palavras chave:** Lama Vermelha; Caroço de Açaí; Agregado Sintético.

## ABSTRACT

Mining is an important activity for obtaining raw materials for industry as well as for the economy of a country, however, tons of solid waste are generated every year, usually without an appropriate destination. As is the case of the residue generated from bauxite beneficiation called red mud, which generates about 1 to 2 tons of this residue for every ton of bauxite beneficiated, the fact is that the amount remaining of this residue is very large while a very small percentage of it is reutilized. Urban residues also cause various problems for the environment, like the residue from the processing of the açai pulp, more specifically the stone fruit, which is inappropriately discarded in urban centers. Nowadays the preoccupation with the preservation of the environment is eminent, leveraging researches with the objective of reusing the most diverse residues of the industry. The residue in question (red mud) can be used to generate a material with interesting mechanical characteristics to be used in civil construction. Research indicates using it in structural concrete is an economically viable alternative, considering the volume of natural aggregate used daily in civil construction is very large. While having an adequate destination for this waste, it also reduces the exploitation of natural resources such as gravel and rolled pebble, which, due to their excessive exploration, cause environmental liabilities. The objective of this work was to synthesize synthetic aggregates from those two residues, in conjunction with the use of clay and sand. The percentages of raw materials were fixed at 60, 20, 15 and 5 % of red mud, silica, coal made from the stone of the açai and clay respectively, intending to analyze the effects of temperature and burning level on the solid state reactions in the aggregate. The raw materials were submitted to a beneficiation process: drying, brittling and screening on 100 mesh Tyler, subsequently a percentage of 15% to 20% of water was added for the extrusion process, and then burning was done at the temperature of 1100 and 1200 °C with sintering levels of 3 and 4.5 hours. The aggregates were then characterized to determine their physical and morphological properties. The aggregates sintered at 1100 °C presented apparent specific mass of 2.13 g/cm<sup>3</sup> at 3h and 1.87 g/cm<sup>3</sup> at 4.5h, while the aggregates sintered at 1200 °C presented results of 2.01 g/cm<sup>3</sup> at 3h and 2.19 g/cm<sup>3</sup> at 4.5h. In the scanning electron microscopy it was possible to identify the presence of the secondary mullite phase presenting a structure that resembles needles in all materials, where the presence of this phase is fundamental importance to confer a good mechanical resistance to the material. In conclusion, the use of red mud in the production of synthetic aggregates is an important alternative for the use of this waste that has been accumulated for decades, as well as bringing economic benefits to the industry and especially to the environment.

**Key-words:** Red Mud; Açai Seed; Synthetic Aggregate.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Fluxograma simplificado do processo Bayer para produção de alumina.....	26
Figura 2 – Lagoa de deposição de lama vermelha da Alumar (Ilha de São Luís - Maranhão).....	27
Figura 3 - Lagoa de resíduos sólidos da Alunorte Barcarena – PA em 2006.....	29
Figura 4 - Lagoa de resíduos sólidos da Alunorte Barcarena – PA em 2018.....	29
Figura 5 - Esquema do lago de deposição de resíduos.....	31
Figura 6 - Membrana que reveste um dos lagos de deposição da ALUNORTE, Barcarena/PA.....	31
Figura 7 - Depósito de resíduos sólidos da mineradora Hydro.....	32
Figura 8 - Vazamento da barragem de lama vermelha na Hungria.....	35
Figura 9 - Vazamento da bacia de rejeitos da mineradora Hydro Alunorte.....	35
Figura 10 - Diagrama de fases $\text{SiO}_2$ .....	37
Figura 11 - Microestrutura da mulita com densidade relativa >99%.....	39
Figura 12 - Formação de pescoços entre partículas durante o processo de sinterização.....	40
Figura 13 - Microestrutura cerâmica característica após o processo de sinterização, evidenciando fases como a mulita e o quartzo.....	42
Figura 14 - Modelo esquemático das reações de vitrificação na sinterização de materiais cerâmicos com o aumento da temperatura: (a) partículas soltas de pó; (b) estágio inicial; (c) estágio intermediário; (d) estágio final.....	43
Figura 15 - Descarte do caroço do açaí em vias públicas na região metropolitana de Belém.....	50
Figura 16 - Matérias-primas: a) lama vermelha; b) argila; c) sílica; d) carvão.....	55
Figura 17 - a) Britador; b) Moinho de bolas; c) Moinho de discos.....	56
Figura 18 - a) Lama Vermelha; b) Sílica após beneficiamento.....	56
Figura 19 - a) Homogeneização das misturas; b) Após adicionar água.....	57

Figura 20 - Mistura extrudada (a); britagem do material (b); adequação dimensional (c).....	58
Figura 21 - Agregados após o processo de sinterização, (a) 1100 °C (3h); (b) 1100 °C (4,5h); (c) 1200 °C (3h).....	59
Figura 22 - Fluxograma do processo de beneficiamento e produção.....	60
Figura 23 - Amostras com a superfície parcialmente submersa em HF.....	62
Figura 24 – Aparato utilizado para a medição das massas imersas.....	63
Figura 25 – Análise de raio x da lama vermelha.....	65
Figura 26 – Análise de raio x da argila de São Miguel.....	66
Figura 27 – Micrografias das amostras sinterizadas.....	70

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química da lama vermelha (%) gerada em diferentes países.....	33
Tabela 2 – Quantidade produzida na extração vegetal de açaí (toneladas); valor da produção na extração vegetal (mil reais) .....	48
Tabela 3 – Composição química do resíduo de bauxita.....	66
Tabela 4 – Composição química da argila de São Miguel.....	67
Tabela 5 – Resultados dos ensaios físicos.....	68

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AA	Absorção de água
ABAL	Associação Brasileira de Alumínio
ABCERAM	Associação Brasileira de Cerâmica
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
ATM	Atmosfera
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
DRX	Difração de Raio X
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FRX	Fluorescência de Raio X
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ISO	International Organization for Standardization
ITEC	Instituto de Tecnologia
LV	Lama vermelha
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MEA	Massa Específica Aparente
MI	Massa Imersa
MU	Massa Úmida
MS	Massa Seca
NBR	Norma Brasileira
PA	Pará
Pa	Porosidade Aparente
PEVS	Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PRODENA	Programa de Pós-graduação de Recursos Naturais da Amazônia
UFPA	Universidade Federal do Pará

## LISTA DE SÍMBOLOS

Å	Angstrom
°C	Grau Celsius
g	Gramma
g/cm <sup>3</sup>	Unidade da massa específica aparente
h	Hora
kV	Quilovolt
mm	Milímetro
$\rho$	Massa específica
s	Segundo
t	Tonelada
T <sub>m</sub>	Temperatura de fusão
$\mu\text{m}$	Micrómetro
$\mu$	Micro

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>15</b>
1.1	<b>Objetivos</b>	<b>17</b>
1.1.1	Objetivo Geral	17
1.1.2	Objetivos Específicos	17
1.2	<b>Justificativa</b>	<b>17</b>
1.3	<b>Estrutura do trabalho</b>	<b>18</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA</b>	<b>19</b>
2.1	<b>Agregados</b>	<b>19</b>
2.1.1	Classificação dos Agregados Quanto a Origem	19
2.1.2	Classificação quanto a dimensão dos grãos	20
2.1.3	Agregado Sintético	20
2.1.4	Agregado leve	21
2.2	<b>Processo Bayer</b>	<b>23</b>
2.2.1	Lama Vermelha (LV)	27
2.2.2	Deposição e estocagem	29
2.2.3	Composição Química da Lama Vermelha	32
2.2.4	Questão Ambiental	33
2.3	<b>Sílica</b>	<b>36</b>
2.3.1	Reações de Sinterização	37
2.3.2	Reações de vitrificação	42
2.3.3	Mulita	43
2.4	<b>Argila</b>	<b>45</b>
2.4.1	Argilominerais	46
2.5	<b>Açaí</b>	<b>47</b>
2.5.1	Produção e comercialização	48
2.5.2	Questão ambiental	49
2.5.3	Potencial do reaproveitamento do caroço de açaí	51
2.6	<b>Trabalhos desenvolvidos com resíduo de bauxita</b>	<b>52</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>55</b>

<b>3.1 Materiais .....</b>	<b>55</b>
<b>3.2 Beneficiamento das matérias-primas.....</b>	<b>55</b>
<b>3.3 Processo de produção dos agregados .....</b>	<b>57</b>
<b>3.4 Sinterização dos agregados.....</b>	<b>58</b>
<b>3.5 Caracterização das matérias-primas e dos agregados .....</b>	<b>61</b>
3.5.1 Difração de Raios X (DRX) .....	61
3.5.2 Análise Química.....	61
3.5.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	61
3.5.4 Determinação das propriedades cerâmicas dos agregados .....	62
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>64</b>
<b>4.1 Caracterização das matérias-primas.....</b>	<b>64</b>
4.1.1 Difração de Raios X.....	64
4.1.2 Análise Química Resíduo de Bauxita.....	66
4.1.2 Análise química da argila .....	67
<b>4.2 Propriedades cerâmicas dos agregados .....</b>	<b>67</b>
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>71</b>
<b>5.1 Conclusão.....</b>	<b>71</b>
<b>5.2 Sugestões para trabalhos futuros .....</b>	<b>72</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>73</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A indústria e suas diversas atividades estão cada vez mais gerando um grande número de subprodutos, que muitas das vezes são resíduos que apresentam perigos ao meio ambiente. Por causa disso, existe um grande foco na promoção de pesquisas sobre reciclagem e reaproveitamento destes muitos detritos e rejeitos proveniente de atividades industriais.

Os setores públicos e privados são cobrados cada vez mais pela sociedade por meio de legislações mais severas com relação a questões ambientais e ao desenvolvimento sustentável. Em vista disso as empresas devem adotar programas ou sistemas de gerenciamento que promovam uma preocupação adequada com o meio ambiente, controlando os impactos das atividades industriais, produtos e serviços no meio ambiente (MORO et. al., 2016).

O ministério do meio ambiente define a reciclagem como o conjunto de técnicas que tem como principal foco aproveitar os resíduos reintroduzindo-os no processo de produção. Desse modo preservando os recursos naturais, ao passo que previne a destruição da fauna e da flora. Este conceito se aplica ao que diz respeito a cadeia produtiva do alumínio.

No estado do Pará uma das atividades industriais mais relevantes é a mineração, sendo considerado um dos principais viés econômicos do estado. Dentre estas, se destaca o setor de beneficiamento e produção mineral, que conseqüentemente geram toneladas de resíduos todos os anos. Como é o caso do resíduo gerado no processo Bayer, conhecido como lama vermelha (ROSÁRIO, 2013).

Não existe uma proporção exata para a quantidade de alumina produzida e quantidade de lama vermelha gerada, isso depende muito da qualidade do minério, do teor de Alumínio presente no mesmo, o tipo de processamento ao qual o minério foi submetido, gerando assim diferenças entre os resíduos remanescentes (BRUNORI et al., 2005; PRADO et al., 2006). Geralmente são produzidos de 1 a 2 toneladas de lama vermelha por tonelada de alumina. O fato é que a quantidade gerada anualmente é gigantesca e que um resíduo gerado na ordem de milhões de toneladas representa um sério problema ambiental.

O resíduo gerado pelo processo de produção da alumina (processo Bayer) é conhecida como lama vermelha, após o início deste processo a produção anual de

lama vermelha foi estimada em mais de 70 milhões de toneladas no mundo todo, onde, as áreas de disposição deste resíduo contêm aproximadamente 2,7 bilhões de toneladas em todo o mundo, o que posteriormente acarreta transtornos ambientais e econômicos (LEMOUGNA, 2017).

Esta lama não tem valor comercial, por isso é interessante que pesquisas sejam desenvolvidas para mitigar seu impacto no meio ambiente, e posteriormente agregar algum valor econômico. Além disso, deve-se notar que o uso desses resíduos tende a ser minimizar problemas ambientais, uma vez que sua principal característica é a alta alcalinidade (pH 10-13).

No que se refere a política de reaproveitamento de resíduos, destaca-se a incorporação da mesma na produção de cerâmica, com ênfase na incorporação desta na produção de agregados sintéticos, com o intuito de aplica-los na construção civil (QUARESMA et. al., 2017).

Uma das principais destinação da lama é a produção de agregado sintético, pois o volume destes usados na construção civil é enorme o que implica em dizer que a utilização de seixo rolado extraído da natureza é muito grande. Na região Amazônica, pela sua formação geológica de origem sedimentar, não se dispõe de rochas de fácil acesso para uso na construção civil, principalmente nas proximidades dos maiores centros consumidores como Belém, Manaus e Santarém (SANTOS, 2019).

Em vista disso o seixo rolado é obtido através da drenagem de leitos de rios, ou extraído próximos as margens com escavações, o que também acarreta em impactos ambientais, como por exemplo o assoreamento de rios (SANTOS, 2019).

O trabalho tem como objetivo produzir agregado sintético a partir deste resíduo juntamente com outras matérias-primas, avaliar a influência da temperatura e do patamar de queima dos agregados com adição de biomassa feita a partir do caroço de açaí, e avaliar as propriedades físicas e morfológicas dos agregados sintetizados.

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivo Geral

- Produzir e caracterizar agregados sintéticos reutilizando o resíduo do processo Bayer (lama vermelha), em conjunto com outras matérias-primas, assim como o resíduo do processo de beneficiamento da poupa do açaí.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Avaliar a influência da temperatura e do patamar de sinterização nas propriedades físicas dos agregados com adição de biomassa;
- Produzir agregados sintéticos com massa específica inferior a 2 g/cm<sup>3</sup>;
- Analisar a microestrutura do agregado, para evidenciar a fase mulita secundária.

## 1.2 Justificativa

Nos dias atuais, a preocupação com a preservação do meio ambiente, combinada com a falta de algumas matérias-primas naturais, está impulsionando as pesquisas para reutilização ou adição dos rejeitos em processos industriais (BASEGIO et al., 2001).

Dentre as muitas indústrias situadas no estado do Pará, destaca-se as indústrias de beneficiamento da bauxita para a produção de alumina, no entanto, este processo gera cerca 1 a 2 toneladas de resíduos sólidos por tonelada de alumina, gerando sérios problemas ambientais de modo que intensifica o risco de poluição ambiental, contaminação do ar, rios e lençol freático das comunidades onde a refinaria de alumina ocorre. Ao passo que o armazenamento destes resíduos gera elevados custos econômicos para as indústrias (DAUVIN, 2010).

Outro problema recorrente, está associado ao beneficiamento da poupa do açaí, no qual o estado do Pará é o maior produtor e consumidor do fruto do país, tendo um consumo diário 440 toneladas do fruto. Belém gera cerca de 365

toneladas de lixo orgânico, no qual a grande parte deste está associado ao caroço do açaí, que por sua vez são descartados de forma indevida pela cidade (BENTES, 2017; IBGE, 2017).

O presente trabalho tem uma grande importância na reutilização destes resíduos que geram sérios problemas ambientais e socioeconômicos, dando para os mesmos uma destinação final, o qual ao final do processo se atribui um valor econômico no material cerâmico chamado de agregado sintético. Que além de ser uma saída economicamente viável para a destinação destes resíduos, também irá promover a preservação de matérias-primas que são retiradas da natureza como é o caso da brita e do seixo rolado.

### **1.3 Estrutura do trabalho**

O presente trabalho de conclusão de curso mostra a viabilidade da produção de agregados sintéticos para uso na construção civil, a partir de dois resíduos (lama vermelha e caroço do açaí) conjuntamente a adição de outras matérias-primas como argila e sílica, onde o trabalho foi dividido em 5 sessões.

A sessão 1 aborda os tópicos de introdução, objetivos da pesquisa, e breve justificativa e estrutura do desenvolvimento do trabalho, que tem como principal objetivo contextualizar o estudo realizado, a fim de mostrar o potencial do uso destes resíduos para a produção de agregado.

A sessão 2 disserta sobre a revisão da literatura que dá a base para que o estudo seja realizado, mostrando os principais pontos sobre Argilas, Processo Bayer, Agregados com ênfase em agregados sintéticos, Sílica e as reações de sinterização e formação da fase mulita, assim como o resíduo do beneficiamento da poupa do açaí.

A sessão 3 aborda a metodologia que foi usada para a realização do trabalho, descrevendo os materiais e os processos que foram usados tais como: beneficiamento das matérias-primas, caracterizações morfológicas e físicas dos agregados sintéticos produzidos.

A sessão 4 aborda os resultados obtidos assim como as discussões acerca das análises feitas no material.

E por último, a sessão 5, trata-se das conclusões que foram tiradas do estudo e das análises feitas, assim como sugestões para trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 Agregados

A NBR 9935 define agregados como sendo material granular, geralmente inerte, com dimensões e propriedades adequadas para argamassa ou concreto. Pode-se citar como exemplos de agregados a brita ou pedra britada, areias naturais ou obtidas por moagem de rochas, além das argilas e dos substitutivos como resíduos inertes reciclados, escórias de aciaria, produtos industriais, entre outros (ROSÁRIO, 2013).

A princípio os agregados desempenhavam um papel secundário na fabricação de concretos, devido a sua abundância e baixo custo, no entanto a crescente demanda da produção de concretos no cenário da construção civil evidenciou a sua real importância, pois ocupa cerca de  $\frac{3}{4}$  do volume do concreto (em torno de 60 a 80 %), economizando assim o consumo de cimento que também acarreta em outro passivo ambiental, como a extração de calcário, além de reduzir custos em projetos de engenharia. Devido ao seu grande volume utilizado sua qualidade é de grande importância para atender as especificações desejadas (ROSÁRIO, 2013; SANTOS, 2019).

#### 2.1.1 Classificação dos Agregados Quanto a Origem

De acordo com a NBR 9935 (2011) os agregados podem ser classificados quanto a sua origem como:

- a) Agregado natural: material pétreo granular que pode ser utilizado tal e qual encontrado na natureza, sem necessidade de beneficiamento, como por exemplo, areia e seixo obtidos nos leitos dos rios.
- b) Agregado artificial: material granular resultante de processo industrial envolvendo alteração mineralógica, química ou físico-química da matéria-prima original, como por exemplo: argila expandida e peletizada, o folhelho expandido por tratamento térmico, a vermiculita expandida, entre outros.
- c) Agregado reciclado: material granular obtidos de processos de reciclagem de rejeitos ou subprodutos da produção industrial, mineração ou construção civil, como por exemplo: escória de alto forno, entulhos de

construção/demolição, resíduos cerâmicos provenientes de olarias entre outros.

### 2.1.2 Classificação quanto a dimensão dos grãos

Conforme a norma ABNT NBR 7211 (2009) os agregados se classificam quanto ao diâmetro de partículas como miúdos e graúdos.

- a) Agregados miúdos: Agregado cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 150 µm, em ensaio realizado de acordo com a ABNT NBR NM 248, com peneiras definidas pela ABNT NBR NM ISO 3310-1.
- b) Agregados graúdos: Agregado cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 4,75 mm, em ensaio realizado de acordo com a ABNT NBR NM 248, com peneiras definidas pela ABNT NBR NM ISO 3310-1.

### 2.1.3 Agregado Sintético

Entende-se por agregado artificial, aquele proveniente da transformação de solo, folhelho argiloso, resíduo sílico-aluminoso ou argila, previamente processado, em um material inerte e com resistência mecânica satisfatória para uma determinada finalidade. Essas características são normalmente obtidas através da queima deste material em temperaturas elevadas. A qualidade do produto acabado depende fundamentalmente da matéria-prima utilizada, da temperatura de queima e do processo de conformação da massa cerâmica como normalmente são chamados os solos argilosos destorroados, misturados, umedecidos, laminados que são a base do processo cerâmico (CABRAL et. al., 2008).

A produção dos agregados sintéticos é feita por meio do aquecimento da matéria-prima, triturada ou moída, e na maioria das vezes pelletizada, fazendo-se o uso geralmente de um forno rotativo. Desse modo, o material bem umedecido é transportado em uma esteira, sob queimadores, de modo que o calor atinge gradualmente toda a espessura da camada (SOUZA, 2010).

O objetivo de usar materiais calcinados como agregado sintético vem sendo alvo de vários estudos, além de ser uma alternativa para o setor construção civil,

visa reduzir os impactos ambientais do uso excessivo de matérias-primas retiradas da natureza, como por exemplo, o seixo rolado (ROSÁRIO, 2013).

A maior parte das terras da região amazônica foi formada no interior de uma bacia intracratônica, que ao longo do tempo foi gerando sedimentos tais como areia, silte e argila. Desse modo, é mais comum o uso de agregados naturais como seixo rolado e pedra britada na construção civil, devido ao fato de nas proximidades das principais capitais amazônicas não haver áreas cobertas por rochas.

Nas maiores capitais da Amazônia como Belém e Manaus, são consumidos cerca de 600.000 m<sup>3</sup> de agregado graúdo por ano, e desse total, cerca de 90 % é de agregado na forma de seixo rolado. E essa grande demanda de matéria-prima natural acarreta em vários passivos ambientais como assoreamento de rios e esgotamentos de jazidas, além de elevar os custos de produção e comercialização, devido as jazidas estarem cada vez mais distantes dos grandes centros comerciais. Devido a isso o estudo na produção de agregados sintéticos vem ganhando cada vez mais relevância com intuito de encontrar materiais alternativos para a utilização na construção civil (BACELLAR, 2001; SANTOS, 2019).

#### 2.1.4 Agregado leve

Agregado leve sintético é definido como um conjunto de grãos naturais processados ou manufaturados, que apresentam diferentes tamanhos e que são interligados por material aglomerante. Os agregados sintéticos são produzidos através de argilas ou subproduto de resíduos, que normalmente geram um produto com peso específico inferior ao da pedra britada e com elevada absorção de água.

Os agregados leves podem ser obtidos pelo processo de queima em forno rotativo e apresentam granulometria variada, formato arredondado regular e estrutura interna formada por uma massa esponjosa, envolto por uma camada com baixa permeabilidade, que diminui significativamente a absorção de água. Sua sinterização é feita entre 1100 e 1350° C, e sua matéria-prima podem ser divididas em três grupos: matéria-prima natural, como a argila do tipo vermiculita, ardósia, folhelhos, os resíduos diversos ou mistura de resíduos e matérias-primas naturais com a incorporação de aditivos. Essas matérias-primas em geral contêm de 7 a 8 % de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, no máximo 25 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e cerca de 1 % de carbonatos, além de apresentar sulfatos e matéria orgânica, e um pH superior a 5 (ROSSIGNOLO, 2006).

De acordo com Rossignolo (2011) os agregados leves podem ser classificados quanto a origem como:

- a) Agregado leve natural: são obtidos por meio de extração direta em jazidas, seguida de classificação granulométrica. Esse tipo de agregado leve tem pouca aplicação em concretos estruturais em função da grande variabilidade de suas propriedades e da localização e disponibilidade das jazidas. Como exemplos: a pedra-pomes e o tufo vulcânico.
  
- b) Agregado leve artificial: são obtidos em processos industriais e, normalmente, são classificados com base na matéria-prima utilizada e no processo de fabricação, como a argila expandida e a escória sinterizada.

Os agregados leves podem apresentar massa unitária que pode chegar a 2000 kg/m<sup>3</sup> enquanto nos agregados pesados a densidade ultrapassa esse mesmo valor. São chamados de agregados leves, que normalmente também são conhecidos como argila expandida, o produto obtido pelo aquecimento de argila ou folhelhos argilosos na temperatura em torno de 1200°C (CABRAL *et. al.*, 2008; ROSSIGNOLO, 2011).

Próximo desta temperatura, uma parte dos constituintes do material se funde gerando uma massa viscosa, enquanto a outra parte se decompõe quimicamente liberando gases que são incorporados por esta massa sinterizada que é expandida. Os gases retidos no interior do agregado de argila, não podem escapar para seu exterior devido à fase líquida, proporcionada pelos elementos fundentes, que envolvem a partícula.

A estrutura celular, ou seja, os vazios internos estão isolados entre si por paredes impermeáveis, que se mantêm após o resfriamento, de modo que a massa específica do agregado resultante se torna menor do que antes do aquecimento, podendo ser utilizado como agregado graúdo na fabricação de concretos leves, com o objetivo de reduzir o peso próprio das estruturas (CABRAL *et. al.*, 2008; SANTOS, 2019).

Os agregados leves têm ampla aplicação na fabricação de concreto com o fim de redução do peso da estrutura ou como elemento de proteção acústica, ou ainda tem aplicação em pavimentação asfáltica. Em estudos recentes, o agregado sintético calcinado tem sido investigado para utilização em concreto para atender a

necessidade de regiões em que a brita não está disponível (MORAVIA *et. al.*, 2006; CABRAL *et. al.*, 2008; SANTIS e ROSSIGNOLO, 2013; FROTA e SILVA, 2013).

De modo geral, na produção de agregados é valorizado o reaproveitamento de resíduos diversos. O processamento de resíduos industriais é um tema importante não só do ponto de vista para redução da poluição ambiental perigosa, mas também devido à potencialidade para reaproveitamento. Diversos autores têm se empenhado na pesquisa de reaproveitamento de resíduos, como vidros, cinzas e lamas diversas (CHRISTOGEROU e KAVAS, 2016; KALIRAJAN *et. al.*, 2016; YU-LING, SHAO-HSIAN, GUAN-WEI, 2016).

## **2.2 Processo Bayer**

O Brasil é o décimo quinto produtor de alumínio primário, precedido pela China, Rússia, Índia, Canadá, Emirados Árabes, Austrália, Bahrein, Vietnã, Noruega, Estados Unidos, Arábia Saudita, Malásia, Islândia e África do Sul; quarto produtor de bauxita, atrás da Austrália, Guiné e China e terceiro produtor de alumina, atrás de China e Austrália (ABAL, 2020)

A alumina é obtida por meio do processamento químico da bauxita, conhecido como processo Bayer. Esse processo consiste na dissolução dos hidróxidos de alumínio presentes nas bauxitas mediante o ataque deste mineral com uma solução alcalina de NaOH em temperatura e pressão. As condições em que se processa a digestão (concentração, temperatura e pressão) variam de acordo com a bauxita (HIND *et al.*, 1999; SILVA FILHO *et al.*, 2007).

Entre 250 minerais contendo alumínio conhecidos, o minério de alumínio é considerado como sendo: bauxita, argilas caulínicas, nefelina e alunita. O minério mais usado é a bauxita; dois processos são usados: o processo Le Chatelier, no qual a bauxita e o carbonato de sódio são calcinados para formar aluminato de sódio; e o processo Bayer desenvolvido pelo químico soviético Karl Josef Bayer, que é particularmente adequado para bauxitos gibbsíticos (SOUZA SANTOS, 1989).

Segundo Barrant e Gadeau (1967) Os pontos básicos essenciais do processo Bayer são:

- a) Dissolução da alumina da bauxita a alta temperatura, e baixa pressão, mediante lixívia de soda concentrada.

b) Após a separação dos resíduos insolúveis é feita a precipitação parcial da alumina em solução mediante a diminuição da temperatura e a dissolução da lixívia de alumínio de sódio.

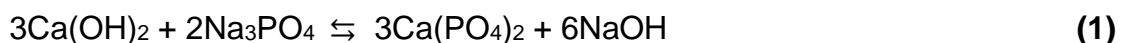
O processo Bayer para produção de alumina a partir da bauxita percorreu um longo caminho desde o final do século dezenove quando Karl Joseph Bayer descobriu que uma carga de semente de tri-hidrato de alumina previamente precipitada reduz o tempo necessário para precipitação e permite uma medida de controle sobre o tamanho de partícula do produto (KIMMERLE, 2004).

No processo Bayer, é explorada uma importante propriedade química comum nas formas hidratadas de alumina, gibsita ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ), e os isômeros bohemita ( $\text{AlO}(\text{OH})$ ) e diásporo ( $\text{AlO}(\text{OH})$ ). Esses compostos se dissolvem em solução de hidróxido de sódio ( $\text{NaOH}$ ), sob condições moderadas de pressão e temperatura, diferentemente da maioria dos demais constituintes da bauxita (KIMMERLE, 2004).

Na planta da Hydro Alunorte, situada em Barcarena no Pará, utiliza-se antes da digestão, a adição de  $\text{CaO}$  para estabilizar essa reação, o qual reagindo com íons carbonato e fosfato dissolvidos no meio, controla a concentração de fosfato no licor e evitando a precipitação de hidrato.

Kimmerle (2004) enfatizou que a adição de  $\text{CaO}$  antes da digestão tem o objetivo principal de promover o aumento de íons carbonato e fosfato por meio da precipitação de íons carbonato e fosfato dissolvidos no meio, durante o processo de decantação, ou seja, a presença de íons cálcio ajuda a estabilizar o líquido da solução e evita a precipitação de hidratos e isso é usado para controlar a concentração de fosfato na solução. A principal reação do  $\text{CaO}$  com fosfato leva à formação de fosfato de cálcio, que reage com o excesso de  $\text{CaO}$ , junto com o carbonato de sódio e outros sais, formando o carbonato de apatita insolúvel.

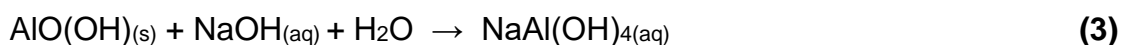
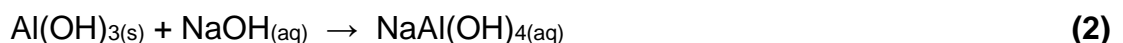
A cal reage com a água produzindo uma polpa de hidróxido de cálcio, conhecida como cal extinta, a equação a seguir mostra que o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  será dosado nos digestores, com a polpa de bauxita, para aumentar a estabilidade do licor rico e reagir com fósforo na bauxita de acordo com a reação a seguir:



A produtividade química de uma planta que utiliza esse processo torna se cada vez mais um fator diferencial de competitividade. Sendo assim, é importante otimizar o rendimento da extração de gibbsita da bauxita (KIMMERLE, 2004).

O processo Bayer começa a partir da britagem da bauxita, de maneira geral, com granulometria abaixo de 208 microns, com uma razão de massa ( $\text{Al}_2\text{O}_3 / \text{SiO}_2$ ) maior que 10, que reage no reator sob pressão e temperatura (digestor). Nessas condições, a bauxita se dissolve para formar soluções de aluminato de sódio ( $\text{Na}(\text{Al}(\text{OH})_4)$ ). Enquanto as impurezas permanecem na fase sólida normalmente conhecida como "lama vermelha". Outras impurezas consistem na presença de certos minerais nos concentrados de bauxita, mesmo em concentrações pequenas, que ainda afetam a operação do processo Bayer e a qualidade da alumina (MACFIE e CARNEIRO, 1993).

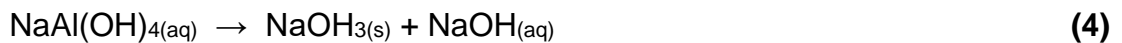
A fase inicial é chamada de digestão e envolve inicialmente a trituração e moagem da bauxita, seguida pela digestão propriamente dita usando uma solução de hidróxido de sódio ( $\text{NaOH}$ ) sob determinada pressão e temperatura. Na qual esses parâmetros da digestão podem variar de acordo com as propriedades da bauxita, plantas modernas comumente operam em temperaturas entre 200 e 240 °C, e pressão em torno de 30 atm. Em virtude dessas condições grande parte das espécies contendo alumínio são dissolvidas que dão origem a um licor verde, conforme as reações a seguir (WAO, 2021).



A clarificação é uma das etapas mais importantes do processo, na qual ocorre a separação das fases sólida (resíduo insolúvel ou lama vermelha) e líquida (líquido rico contendo aluminato de sódio). As técnicas comumente usadas incluem decantação e filtração (MISRA, 1970). O espessamento é um processo de decantação, em que o resíduo proveniente da digestão é encaminhado para unidades denominadas de espessadores/lavadores. O objetivo dessas unidades é densificar o resíduo, aumentando seu conteúdo sólido para recuperar o máximo de  $\text{NaOH}$  possível e fornecer "Overflow" para filtragem. Nesta etapa é comum se adicionar polímeros (como hidroxamato e Poliacrilamida) para induzir a floculação de

partículas nos espessadores, e até mesmo usar processo de separação usando membrana polimérica (HIND et al., 1999; GÓIS et al., 2003; IOM3, 2021).

Então, a etapa de precipitação ocorre quando o líquido rico esfria. Após o resfriamento, uma pequena quantidade de cristais de alumina (semeadura) são adicionados na operação de digestão reversa para promover a precipitação de acordo com a reação a seguir (KIMMERLE, 2004).

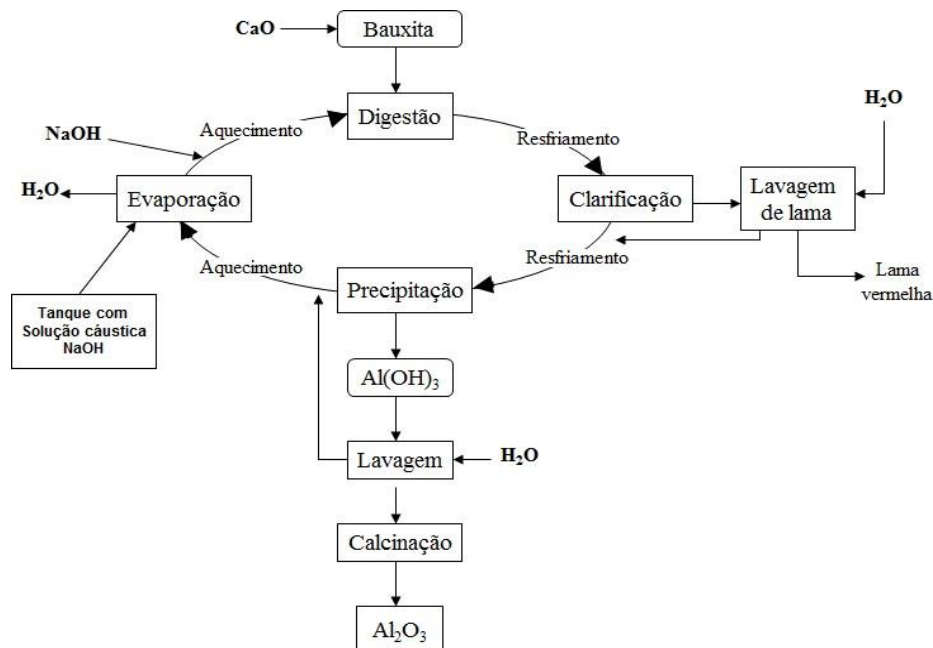


A alumina cristalizada é transportada para a calcinação e o licor pobre (pobre em alumina) é recirculado para a etapa de digestão. A calcinação é a etapa final do processo, em que a alumina é lavada para remover o hidróxido de sódio. Em seguida a alumina é calcinada a aproximadamente 1000 °C para desidratar os cristais, formando cristais de alumina, de aspecto arenoso e branco conforme a reação a seguir (CONSTANTINO et al., 2002; HIND et al., 1999; WAO, 2021).



A Figura 1 apresenta um esquema simplificado do processo Bayer que foram descritas anteriormente.

**Figura 1** – Fluxograma simplificado do processo Bayer para produção de alumina



Fonte: CONSTANTINO et al., 2002.

### 2.2.1 Lama Vermelha (LV)

O subproduto do processo Bayer, denominado de lama vermelha, é um resíduo que tem como principal característica uma elevada alcalinidade (pH 10-13), constituído de partículas muito finas sendo cerca de 95 % menor que 44  $\mu\text{m}$  (PRADO et al., 2006).

A lama vermelha faz parte de um grupo de rejeitos conhecidos como “*tailings*”, resultantes do processamento de minérios pela indústria extrativista mineral. Estes resíduos são solos que continham o mineral de interesse ou resultam da moagem de rochas. Dependendo do processo de extração, podem ser adicionadas substâncias químicas como, por exemplo, a soda cáustica empregada no refino da alumina. Os “*tailings*” caracterizam-se por serem lamas formadas por partículas muito finas (FAHEY et al., 2002; VICK, 1983).

Lama vermelha é o termo geral para o resíduo insolúvel produzido durante a etapa de clarificação do processo Bayer, e geralmente é depositada em tanques especialmente projetados para este fim (SILVA FILHO et al., 2007). Como é possível observar na Figura 2.

**Figura 2** – Lagoa de deposição de lama vermelha da Alumar (Ilha de São Luís - Maranhão)



**Fonte:** Silva Filho et. al., 2007.

No mundo todo as plantas de produção de alumina, possui rendimentos em termos de geração de lama vermelha de cerca de 1 a 1,5 t de lama/t de alumina produzida. Atualmente cerca de 90 milhões de toneladas de lama vermelha são

produzidas por ano em todo o mundo, das quais apenas 2 % a 3 % são reaproveitados. (KOCSEHA et al., 2018; SONG et al., 2021). Esse material ainda tem em média cerca de 3 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e 40 % de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , e o resto são silicatos e aluminossilicatos, geralmente baseados em zeólitas conhecidas e alto teor de álcali residual com uma concentração de até 6%.

Não existe uma proporção exata para a quantidade de alumina produzida e quantidade de lama vermelha gerada, isso depende muito da qualidade do minério, do teor de alumínio presente no mesmo, o tipo de processamento ao qual o minério foi submetido, gerando assim diferenças entre os resíduos remanescentes. Segundo Brunori et al., (2005) e Prado et al., (2006), geralmente são produzidos de 1 a 2 toneladas de lama vermelha por tonelada de alumina. O fato é que a quantidade gerada anualmente é gigantesca e que um resíduo gerado na ordem de milhões de toneladas representa um sério problema ambiental.

Em virtude da grande quantidade com que é gerada no processo de fabricação da alumina metalúrgica, a lama vermelha passa a ser matéria-prima interessante para diferentes aplicações, porém a maioria do foco sempre está ligada à indústria cerâmica, pelo fato do material não ser quimicamente inerte ( $\text{pH} > 12$ ), necessitando de transformação química para estabilizar os compostos, principalmente de sódio, que estão na forma de hidróxido (SOUZA, 2010).

Ribeiro e Morelli (2008), com base no procedimento descrito pela NBR 10004 (2004), classificou a lama vermelha brasileira como resíduo perigoso - Classe I por causa de sua corrosividade incompatível com as restrições aceitas referente a padronização brasileira. As Figuras 3 e 4 mostram uma imagem da superfície da lagoa de rejeito e da área da indústria situada no município de Barcarena, no Pará, fazendo uma comparação da imagem de Souza (2006), e Santos (2019).

**Figura 3** – Lagoa de resíduos sólidos da Alunorte Barcarena – PA em 2006



**Fonte:** SOUZA et. al., 2006.

**Figura 4** - Lagoa de resíduos sólidos da Alunorte Barcarena – PA em 2018



**Fonte:** SANTOS, 2019.

### 2.2.2 Deposição e estocagem

Lama vermelha (e lamas produzidas por outros processos industriais) devem ter seus lagos para deposição construídos quando a parte líquida leva componentes prejudiciais ao meio ambiente. O impacto dos lagos no meio ambiente pode ser expresso de várias maneiras. No entanto, o maior perigo é a poluição da água e a poluição do solo, especialmente no caso de terras cultiváveis ou áreas densamente povoadas. Há também um certo perigo de poluição do ar pelo pó oriundo da parte seca dos lagos (HILDEBRANDO, 1998).

Segundo Salopek e Strazisar (1993) após o enxágue e compactação da Lama vermelha, ela é normalmente transportada ao lago de deposição com uma

quantidade de óxido de sódio que varia de 3,5 a 5 %, podendo chegar até 7 %. E caso ocorra a infiltração de água com esse conteúdo, muitas vezes eleva a basicidade de água subterrânea de forma que o índice de pH pode ficar maior que 11,5.

No século passado alguns países como França, Grã Bretanha, Jamaica, Japão, Itália e Estados Unidos, despejavam a LV diretamente no mar. Já o resíduo produzido em plantas não costeiras, eram depositadas em represamentos confinados, os quais ocupavam grandes áreas (YANG e XIAO, 2007).

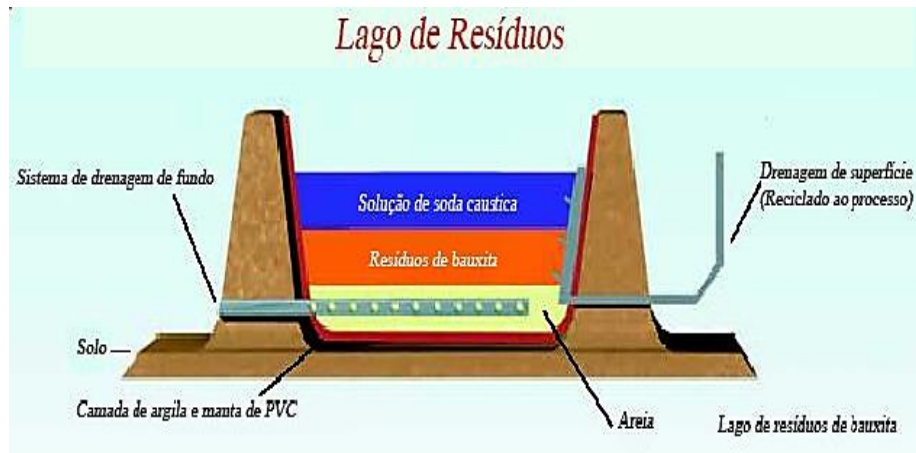
A construção da barragem de lama vermelha ainda é um empreendimento complicado, cara e perigoso, devido à complexidade do seu método de construção. E para proteger todo o ecossistema que está sujeito aos impactos provocados pela lama vermelha se torna indispensável acompanhar regularmente a qualidade de águas subterrâneas como indicador mais preciso de confiabilidade do lago (SALOPEK e STRAZISAR, 1993).

Devido os elevados custos de construção, monitoramento e recultivação, esforços comuns adicionais de tecnólogos, projetistas e ecologistas para encontrar soluções ecológicas mais favoráveis e também economicamente aceitáveis, são inevitáveis para um ótimo projeto dos lagos de lama vermelha (SALOPEK e STRAZISAR, 1993).

Os métodos convencionais ou úmidos têm esse nome devido a grande quantidade de água utilizada, que segue para a lagoa junto ao resíduo sólido, que consiste em um grande dique com um baixo teor de material sólido. Posteriormente esse sólido sedimenta dando origem a um sobrenadante alcalino.

Entretanto os custos desse processo são altos pois onde existe o potencial para a contaminação de lençol freático, devem ser instaladas camadas impermeáveis. A camada pode estar na forma de uma membrana plástica ou uma cobertura adequada de argila impermeável, ou de LV se a impermeabilidade da LV é adequada e a cobertura é posta corretamente em lugar para estabelecer uma selagem satisfatória (SILVA FILHO et al., 2007; NUNN, 1998). As Figuras 5 e 6 mostram o esquema de uma lagoa de deposição e a membrana utilizada para revestir, respectivamente.

**Figura 5** - Esquema do lago de deposição de resíduos



Fonte: ABAL, 2007.

**Figura 6** – Membrana que reveste um dos lagos de deposição da ALUNORTE, Barcarena/PA



Fonte: LIMA, 2006.

Na Hydro Alunorte, quando a alumina é extraída da bauxita, o processo produz a mesma quantidade de resíduo. Essa lama deve ser tratada de maneira adequada visando proteger o meio ambiente, tal processo representa um desafio a produção de alumina. O armazenamento de lama que anteriormente era realizado em lagoas, está sendo substituída por métodos de empilhamento a seco, que é muito mais eficiente e seguro, tal método já vem sendo empregado pela mineradora (HYDRO ALUNORTE, 2021). A Figura 7 mostra o depósito de resíduos sólidos da empresa Hydro Alunorte nos dias atuais.

**Figura 7** – Depósito de resíduos sólidos da mineradora Hydro



**Fonte:** Hydro Alunorte, 2021.

### 2.2.3 Composição Química da Lama Vermelha

A composição química da lama vermelha varia muito, dependendo da natureza da bauxita e da técnica utilizada no processo Bayer em cada planta. Normalmente, a lama vermelha retém todo o ferro, o titânio e a sílica presentes na bauxita, bem como o alumínio que não é extraído durante o processo de refino, combinado com o sódio sob a forma de um silicato hidratado de alumínio e sódio de natureza zeolítica (REESE e CUNDIFF, 1955; MCCONCHIE et al., 2002).

Podem posteriormente ser encontrados traços de outros elementos como óxidos de V, Ga, P, Mn, Mg, Zn, Th, Cr, Nb (PRADHAN et al., 1996). As fases minerais mais comuns são a hematita ( $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), a goetita ( $\alpha$ -FeOOH), a magnetita (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>), a boemita ( $\gamma$ -AlOOH), o quartzo (SiO<sub>2</sub>), a sodalita (Na<sub>4</sub>Al<sub>3</sub>Si<sub>3</sub>O<sub>12</sub>Cl) e a gipsita (CaSO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O), com menor presença de calcita (CaCO<sub>3</sub>) e gibisita (Al(OH)<sub>3</sub>) (BRUNORI et al., 2005; PRADHAN et al., 1996; YALÇIN et al., 2000).

Segundo Pradhan et al (1996), Hind et al (1999) a lama vermelha é constituída por partículas muito finas (cerca de 95 % < 44  $\mu$ m, i.e. 325 mesh), apresenta uma área superficial de 13-22 m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup> e tem como principal característica uma elevada alcalinidade (pH 10-13). Como a lama vermelha não tem uma composição química definida, é importante fazer um comparativo da sua composição que varia para uma mesma região e para países diferentes, com isso a Tabela 1 mostra as composições em termos de percentuais adaptados de Wang et. al., (2005); Park e Jun, (2005); Souza, (2010); Lemougna et. al., (2017); Santos,

(2019); Viegas et. al., (2020) e nela podemos constatar o que foi descrito anteriormente.

**Tabela 1** - Composição química da lama vermelha (%) gerada em diferentes países

Referências	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	CaO	K <sub>2</sub> O	P.F	País
Viegas et. al., (2020)	28,68	22,76	18,29	13,44	5,63	1,62	<0,10	9,10	Brasil
Lemounga et. al., (2017)	33,99	18,47	9,39	5,11	5,42	14,19	<0,10	-	China
Santos, (2019)	29,53	22,53	17,28	12,50	4,56	1,08	0,027	12,03	Brasil
Souza, (2010)	34,9	22,6	18,3	9,31	5,56	1,32	0,13	-	Brasil
Park e Jun, (2005)	16,60	23,70	22,90	11,60	6,70	6,70	-	-	Coréia
Wang et. al., (2005)	60	15	5	16	5	-	-	-	Austrália

**Fonte:** Próprio autor, 2021.

#### 2.2.4 Questão Ambiental

As indústrias de mineração e metalurgia concentram-se principalmente na produção de metais, cerâmica e construção civil, respondendo por cerca de 90 % do volume de mineração na Amazônia. Devido à crescente geração de resíduos sólidos, o setor enfrenta problemas em escala global. Muitos desses resíduos são produzidos em grandes quantidades, o que tem causado grandes transtornos no armazenamento, porém, uma parte considerável desses resíduos apresenta alguma poluição física e química, que são devido aos reagentes agregados nos processos de separação e produção, como na manipulação destes materiais (SOUZA, 2010).

Em qualquer caso, é sempre difícil armazenar esses resíduos. No qual estes podem ter um tamanho de partícula muito fina e podem formar uma emulsão gasosa com a atmosfera, exigindo sistemas de coleta de alto custo, como precipitadores eletrostáticos, utilizados no tratamento dos gases efluentes, na maioria dos processos de calcinação em sistemas contínuos, geram particulados abaixo de 2 microns (SOUZA, 2010).

A mineração é uma das atividades industriais mais importantes e necessárias, apesar dos impactos ambientais que estão associadas a ela, que estão ligados

principalmente as etapas de extração do minério, beneficiamento, refino e o posterior fechamento da mina.

Devido a implantação em larga escala de projetos de mineração na Amazônia em municípios próximos a grandes centros urbanos, há uma preocupação eminente dos impactos ambientais que ela pode trazer. Principalmente em relação ao descarte de grandes quantidades de resíduos oriundos desses processos.

A lama vermelha gera riscos ao meio ambiente devido ao grande volume que é gerado e sua reatividade, entretanto, não é particularmente tóxico. É classificado como resíduo classe II no Brasil (resíduo não inerte) não sendo também classificado como resíduo perigoso pela agência de proteção ambiental dos Estado Unidos (VENÂNCIO, 2013).

Alguns casos de acidentes ambientais provocados pela disposição inadequada da lama vermelha em vários países são relatados na literatura. Problemas relacionados com o encerramento das atividades sem a adequada proteção do meio ambiente também são reportados. Como por exemplo, o ocorrido no município de Barcarena, no Pará, onde, grande quantidade de lama vermelha vazou, devido o transbordamento das barragens ocasionado pelas chuvas, sempre presentes na região.

Como foi o caso do município de Barcarena (PA), no qual houve um vazamento de lama vermelha, atingindo as nascentes do rio Murucupi. da nascente a foz do rio houve mudança na tonalidade das águas, com o aumento nos teores de alumínio e sódio e possível contaminação do aquífero (DE JESUS et al., 2004).

Em São Paulo ocorreu um vazamento em 2004, de cerca de 900.000 litros de lama vermelha, atingindo o córrego do Bugre, rio Varzão e Pirajibu, na bacia do Rio Sorocaba. Como consequência houve alteração da qualidade das águas tornando-as impróprias (ofensivas à saúde), além de provocar danos à fauna (mortalidade de peixes) e à vegetação (CETESB, 2021; RONDON, 2021).

Na Hungria, em outubro de 2010, quando houve o transbordamento de cerca de 1 milhão de m<sup>3</sup> de suspensão de lama vermelha como é possível observar na Figura 8. Outro exemplo, foi o acontecido em agosto de 2016, onde duas aldeias na província de Henan, na China, foram cobertas com lama vermelha após o colapso de uma barragem liberando 2 milhões de m<sup>3</sup> de resíduo (SANTOS, 2019).

**Figura 8** – Vazamento da barragem de lama vermelha na Hungria



**Fonte:** Santos, 2019.

Recentemente em fevereiro de 2018 houve um vazamento da bacia de resíduos da mineradora norueguesa Hydro Alunorte, no município de Barcarena – Pa, devido ao grande volume de chuvas na região, onde a população foi atingida pela contaminação de comunidades próximas e rios da região, especialmente a comunidade “Bom Futuro” que se localiza a cerca de 100 metros da bacia de rejeito (BARBOSA, 2020). A Figura 9 mostra o vazamento ocorrido no município de Barcarena – Pa.

**Figura 9** - Vazamento da bacia de rejeitos da mineradora Hydro Alunorte



**Fonte:** BARBOSA, 2020.

Na Jamaica, a não utilização de técnicas adequadas de disposição da lama vermelha resultou na contaminação de aproximadamente 200 milhões de m<sup>3</sup> de águas subterrâneas (FERNANDEZ, 2021).

Por muito tempo, a lama vermelha foi considerada um resíduo inutilizável, mas com custo econômico e risco ambiental relacionados ao tratamento dessa lama têm motivado empresas e pesquisadores a procurar alternativas mais seguras para o meio ambiente, com o objetivo de reduzir a quantidade desses resíduos enviados para o descarte final.

### 2.3 Sílica

A sílica é um material utilizado extensivamente na indústria cerâmica, pois é a matéria-prima principal usada nos vidros, esmaltes e abrasivos. Seu uso extensivo é devido a dureza, seu ponto de fusão, baixo custo e a habilidade de formar vidros. A formação da sílica, um dos materiais mais puros que se encontra, é o resultado da combinação de silício e oxigênio, originando a segunda molécula mais abundante na terra (MAGALHÃES, 2012).

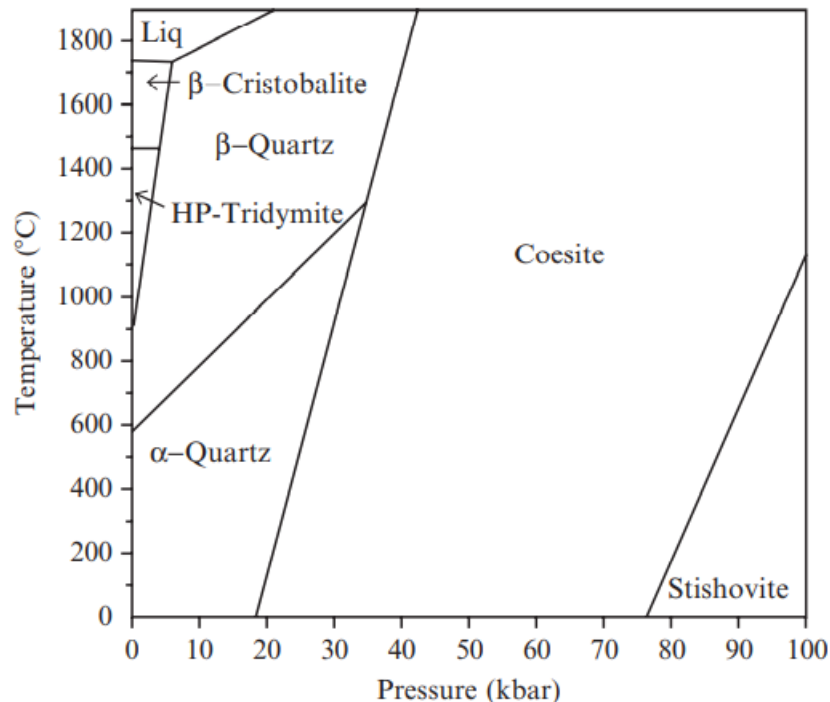
Segundo Eitel (1954) a sílica é material muito utilizado na indústria cerâmica devido a sua facilidade de exploração e abundância na crosta terrestre, que corresponde cerca de 2/3 da sua composição, existindo em uma ampla variedade de formas cristalinas e não cristalinas devido à flexibilidade da ligação entre os tetraedros de SiO<sub>4</sub>.

É um material polimorfo pois existe em três principais formas cristalinas: quartzo, tridimita e cristobalita, a forma termodinamicamente estável à temperatura ambiente da sílica é o quartzo, que por si só é um mineral e ingrediente amplamente utilizado em muitas cerâmicas e vidros comerciais. e apesar de apresentarem composições químicas idênticas, as propriedades físicas e químicas se diferem (CHAM, 2003; GREEN e STEWART, 1953).

A Figura 10 apresenta o diagrama de fases SiO<sub>2</sub>, e nele é possível observar que sob condições ambiente a forma polimórfica termodinamicamente favorecida é o quartzo- $\alpha$ , no entanto em temperaturas superiores a 573 °C o quartzo- $\alpha$  é transformado em quartzo- $\beta$ , que são basicamente semelhantes no que diz respeito a estrutura, no entanto com menos distorção (KLEIN, 2012; KINGERY, 1976).

Quando aquecido a temperaturas acima de 867 °C o quartzo- $\beta$  sofre outra transformação polimórfica para tridimita- $\beta$ , que envolve a quebra das ligações Si-O para permitir que o tetraedro de oxigênio se reorganize entre si de maneira mais simples, em uma estrutura hexagonal mais aberta de baixa densidade. Se continuar o processo de aquecimento a tridimita- $\beta$  se transforma em cristobalita- $\beta$  em 1470 °C, se assemelhando a estrutura do diamante, e o aquecimento adicional da cristobalita resulta na fusão a 1723 °C, a sílica fundida é facilmente transformada em sílica vítrea sob um resfriamento, o que resulta em uma perda da ordem de longo alcance do tetraedro de silício, mas mantendo a ordem de curto alcance (KLEIN, 2012; KINGERY, 1976).

**Figura 10** – Diagrama de fases SiO<sub>2</sub>



Fonte: KINGERY, 1976.

### 2.3.1 Reações de Sinterização

A sinterização é um processo em que a temperatura de processamento é sempre inferior à temperatura de fusão, neste processo pequenas partículas do material são combinadas por difusão sólida para transformar o material compacto e poroso em um produto resistente e denso. À medida que os grãos se tornam maiores com o tempo de sinterização, a porosidade do compacto diminui, atingindo o tamanho de grão de equilíbrio (NORTON, 1973).

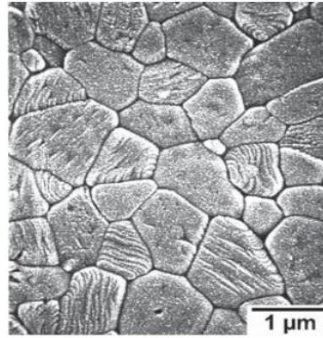
Durante o processo de sinterização em estado sólido a porosidade dos pós compactos é reduzida de 40 a 60 % em corpos verdes (não queimados) para valores próximos a zero em peças acabadas. Enquanto a porosidade diminui, o volume da peça também diminui, enquanto que o módulo e a resistência mecânica aumentam. Essas reações do estado sólido são impulsionadas pela redução da energia livre de superfície, que ocorre quando as interfaces sólido-vapor de alta energia (como por exemplo as superfícies de partículas) são substituídas por interfaces sólido-sólido de menor energia (tal como os limites de grão) (KINGERY, 1976; YAN, 1991).

A taxa de sinterização, a densidade relativa final e a granulometria final são afetadas pelas particularidades químicas de cada óxido que compõe o compacto, o tamanho inicial das partículas, e a eficiência do empacotamento de partículas após a consolidação. De modo geral, a efetividade das reações no estado sólido é limitada aos pós com partículas relativamente finas (em torno de 10  $\mu\text{m}$  ou menor) (KINGERY, 1976; YAN, 1991; GERMAN, 1996).

Essa densificação do compacto requer o transporte de massa, onde na sinterização de estado sólido o material é transportado do maior volume do corpo ou da superfície das partículas para os poros. Para superar as limitações cinéticas e promover a mobilidade dos átomos, no qual esse pó compacto é aquecido a uma fração significativa da sua temperatura de fusão ( $T_m$ ), para óxidos de uma fase, as temperaturas de sinterização caem em uma faixa em torno de 0,75 a 0,90 da temperatura de fusão (KINGERY, 1976; YAN, 1991; GERMAN, 1996).

Como por exemplo a mulita (com um ponto de fusão em torno de 1890  $^{\circ}\text{C}$ ) com um tamanho inicial da partícula de aproximadamente 0,2  $\mu\text{m}$  pode ser sinterizado para 98 % de densidade relativa por um aquecimento a 1600  $^{\circ}\text{C}$  por 2h. A cerâmica resultante tem uma granulometria final de aproximadamente 1  $\mu\text{m}$  e uma microestrutura típica de sólidos cerâmicos sinterizados a partir de grãos finos, como é possível observar na Figura 11, que mostra a microestrutura da mulita cerâmica sinterizado em estado sólido com uma densidade relativa >99%, que contem grãos equiaxiais com uma granulometria em torno de 1  $\mu\text{m}$  e nenhuma fase vítrea aparente (KINGERY, 1976; BERRY e HARMER, 1986; YAN, 1991; GERMAN, 1996).

**Figura 11** – Microestrutura da mulita com densidade relativa >99%



**Fonte:** SHACKELFORD, 2008.

A temperatura e a taxa de sinterização também são afetadas pelas dimensões das partículas. Pós precursores com um tamanho de grão "fino" atingem a mesma densidade em temperaturas mais baixas em comparação com pós de grãos "grossos". Partículas pequenas tem uma maior área de superfície específica e, portanto, uma maior força motriz para a densificação, o que pode reduzir a temperatura necessária para a densificação (KINGERY, 1976; BERRY e HARMER, 1986; YAN, 1991; GERMAN, 1996).

O sistema de partículas heterogêneas utilizado para a sinterização de materiais cerâmicos é geralmente formado por partículas, aglomerados e poros de diferentes tamanhos, formas e afinidades químicas. As transições entre essas etapas de sinterização ocorrem em taxas diferentes e ocorrem em diferentes regiões microscópicas das partículas (NORTON, 1973).

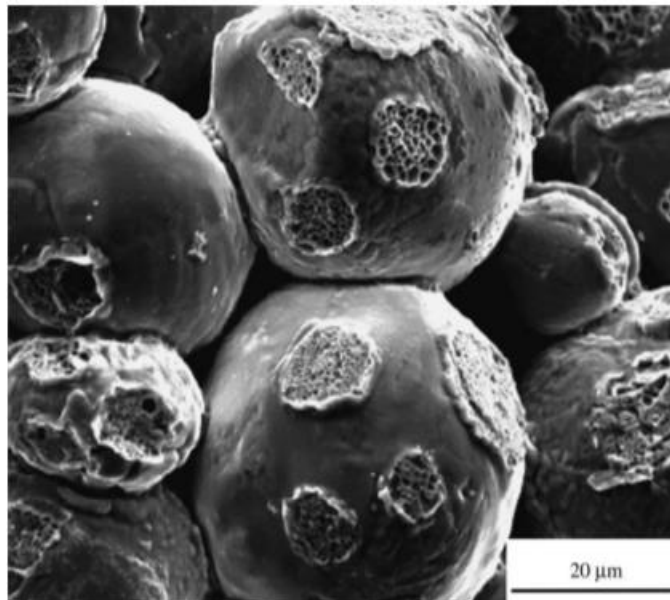
A redução da área superficial específica dos grãos é resultado de alterações que ocorrem durante o processo de sinterização, como a interação entre as partículas e a redução dos poros com o surgimento da fase amorfa. Na síntese convencional, a diminuição da energia livre do sistema se deve à diminuição da área superficial específica dos grãos. A identificação do produto cerâmico durante a sinterização ocorre através dos mecanismos de transporte de massa (NORTON, 1973).

Entre os mecanismos existente de transporte de massa, alguns não causam identificação diretamente, que é o caso da difusão de superfície, onde ela é responsável pela união das partículas e arredondamentos dos poros, entretanto não gera diretamente contração de volume ou identificação. O principal mecanismo que também não causa identificação é o transporte de massa ao longo do volume dos grãos (NORTON, 1973).

Existem dois principais mecanismos de difusão que causam a contração, um deles é a difusão do contorno dos grãos, que produz um crescimento do pescoço entre as partículas (fase amorfa), onde esse pescoço gera a redução do tamanho dos vazios e os desloca para regiões côncavas do granulado. O outro mecanismo é o de difusão de rede, e ele faz com que os vazios sejam transportados para a superfície, com um concomitante escoamento de átomos em direção oposta. E o efeito conjunto desses dois mecanismos acarreta na contração dos interstícios, promovendo um empacotamento mais denso e uniforme do material cerâmico sinterizado (NORTON, 1973).

O processo de sinterização em estado sólido ocorre em 3 estágios: estágio inicial, intermediário e estágio final. No estágio inicial ocorre o aparecimento de pescoços ao longo da superfície de contato das partículas, que faz com que elimine a interface de contato sólido-vapor e cria áreas de fronteiras de grão. A difusão de superfície no estado inicial em baixas temperaturas não contribui para a densificação, no entanto terá forte influência na formação dos pescoços, em virtude da sua baixa energia de ativação (GERMAN, 1996; SONG et al., 2006). A Figura 12 mostra o aparecimento dos pescoços.

**Figura 12** - Formação de pescoços entre partículas durante o processo de sinterização



**Fonte:** SONG et. Al., 2006.

No estágio intermediário ocorre o arredondamento dos poros formando uma estrutura cilíndrica interconectada, este estágio se caracteriza pelo arredondamento

dos poros, densificação e crescimento dos grãos. Onde tal densificação acompanha a difusão por volume e difusão por contorno de grão, que elimina os espaços vazios existente entre partículas, sobretudo os poros que estão localizados sobre os contornos de grãos desaparecem com maior facilidade que os que se localizam de maneira isolada (GERMAN, 1996; CHIANG; BIRNIE; KINGERY, 1997).

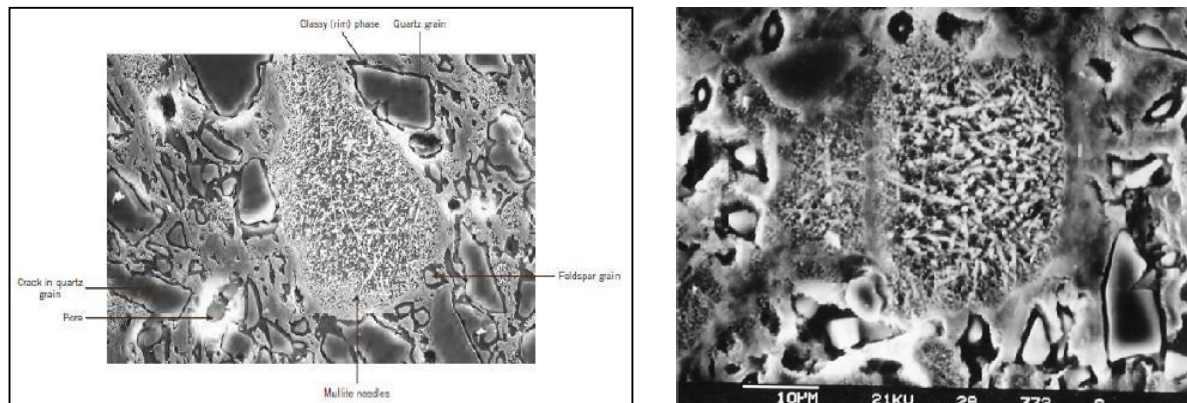
No estágio final a geometria dos poros depende da sua localização: Os poros localizados dentro dos grãos são esféricos, aos passos que os poros localizados nas faces e arestas dos grãos tenda à forma lenticular, e os poros situados nos cantos tendem à forma de tetraedros arredondados.

Poros isolados podem ser eliminados por mecanismos de transporte de matéria, o que vai depender da sua posição no grão. Se a mobilidade do poro for mais lenta do que a mobilidade do contorno de grão em crescimento, o poro isolado no interior do grão promove uma lenta densificação, porque a eliminação do poro é dominada por sua velocidade de difusão (GERMAN, 1996).

Segundo Oel (1985), Mörtel e Heimstadt (1994), associa-se o fechamento dos poros (sinterização), e o aumento da resistência mecânica nos materiais cerâmicos, com a efetividade das reações no estado sólido que ocorrem no interior do material que são responsáveis pela formação da fase mulita e do vidro (fase amorfa). No qual essas transformações podem ser controladas variando os seguintes parâmetros: composição da mistura, granulometria da matéria-prima, temperatura de queima e tempo de exposição a esta temperatura.

A maioria dos materiais cerâmicos oriundos de aluminossilicatos após o processo de sinterização, apresenta uma microestrutura característica onde é possível perceber a presença da fase mulita e quartzo, que é possível observar a esquerda da Figura 13, e a direita a transformação de mulita primária em mulita secundária de morfologia acicular descrita por Mörtel (1978).

**Figura 13** – Microestrutura cerâmica característica após o processo de sinterização, evidenciando fases como a mulita e o quartzo



**Fonte:** CALLISTER, 2008; MÖRTEL, 1978.

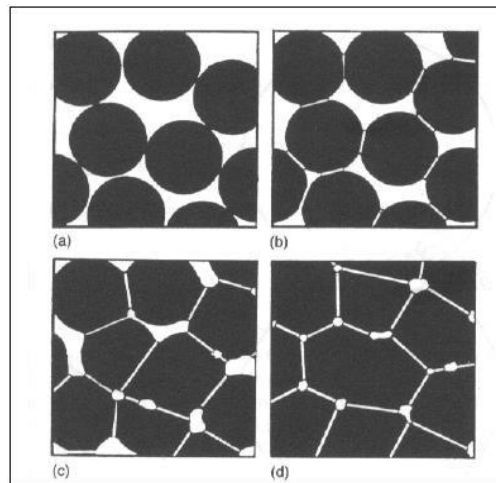
### 2.3.2 Reações de vitrificação

O material na sinterização deve possuir um teor de vidro suficiente em baixa viscosidade na temperatura de formação, com o objetivo de preencher grande parte dos poros e dessa forma reter os gases que são liberados. O NaOH presente na lama vermelha é responsável pela maioria da fase vítrea formada, através das reações de vitrificação (formação de fase amorfa), como é possível observar na reação 6 (BRINDLEY e NAKAHIRA, 1958).



De acordo com Mörtel e Heimstadt (1994), as reações de vitrificação são responsáveis pelo preenchimento dos poros na estrutura das cerâmicas, no qual essa transformação de fases é diretamente influenciada pela diminuição da viscosidade da fase vítrea, onde os metais alcalinos como sódio e potássio tem grande influência nesta etapa. A Figura 14 mostra um modelo esquemático das etapas de sinterização, com a formação da fase vítrea e posterior redução da sua viscosidade, o que acarreta no fechamento dos poros do material e consequente aumento da sua resistência mecânica.

**Figura 14** – Modelo esquemático das reações de vitrificação na sinterização de materiais cerâmicos com o aumento da temperatura: (a) partículas soltas de pó; (b) estágio inicial; (c) estágio intermediário; (d) estágio final



Fonte: NORTON, 1973.

Peçanha Junior (2006) ressalta que a vitrificação não é atribuição exclusiva dos fundentes (papel desempenhado pela lama vermelha), grande quantidade de fundentes associada à granulometria fina das argilas eleva a velocidade de vitrificação da cerâmica. Como o óxido de sódio e potássio ( $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ ) que desempenham papel de fundentes, o óxido de sódio encontra-se na faixa de 0,5%, enquanto o óxido de potássio entre 1,5 % e 4 %.

Em argilas caulínicas, onde os percentuais destes óxidos somados não chegam a 2 %, a temperatura de queima varia entre 900 e 1000 °C. Enquanto que, nas argilas ílíticas os percentuais superam 5% e as temperaturas variam entre 825 e 850 °C. A vitrificação dos óxidos  $\text{Na}_2\text{O}$  e  $\text{K}_2\text{O}$  iniciam a temperaturas relativamente baixas (700 °C), formando um vidro viscoso. A vitrificação prossegue gradualmente com o aumento da temperatura, acompanhada de uma retração proporcional (ABAJO, 2000).

### 2.3.3 Mulita

A mulita é um material promissor para aplicações tanto em cerâmicas tradicionais quanto em cerâmicas avançadas. O grande interesse nos últimos anos pelo estudo das cerâmicas muliníticas e compósitos de matriz mulinítica se deve as propriedades únicas que este material apresenta, tais como, baixa densidade ( $3,17 \text{ g.cm}^{-3}$ ), baixa condutividade térmica ( $k=2.0 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ), baixa expansão térmica

( $20/200\text{ }^\circ\text{C} = 4 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$ ), baixa constante dielétrica ( $\epsilon = 6.5$  em MHz), boa estabilidade química, alta refratariedade, e boas propriedades a altas temperaturas (SCHNEIDER, 1990).

A mulita de composição elementar  $\text{Al}_{4+2x}\text{Si}_{2-2x}\text{O}_{10-x}$  tem sido preparada a partir de uma grande variedade de matérias-primas naturais ou sintéticas, no qual diferentes rotas e temperaturas de mulitização são observadas (OKADA, 2008).

As reações de formação da mulita são de extrema importância no processo de sinterização, pois a mesma tem influência direta na resistência mecânica do material. A mulita secundária (de morfologia acicular), é a grande responsável pela melhoria nas propriedades mecânicas do material cerâmico que juntamente com a fase amorfa irão determinar as características mecânicas do mesmo (SOUZA, 2010). A reação de formação da mulita pode ser observada na Reação 7.

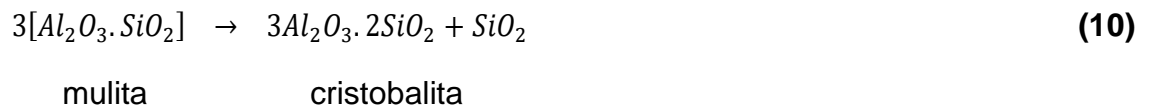
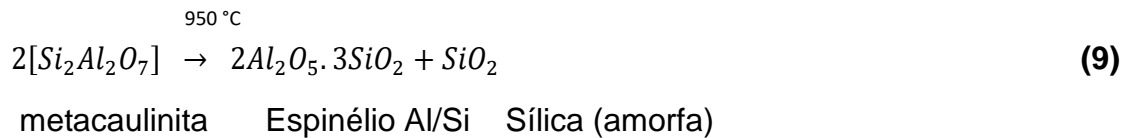
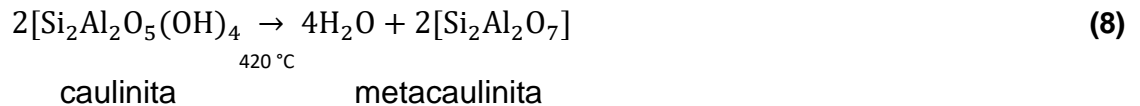


A nucleação e o crescimento da mulita dependem diretamente da viscosidade da fase vítrea para ser finalizada. Também pode ser constatado pela viscosidade que as diferentes fases amorfas produzidas por diversos cátions vitrificantes como o ferro e o cálcio afetam diretamente o crescimento e a nucleação da mulita. A partir de  $1200\text{ }^\circ\text{C}$ , a maioria dos processos de sinterização de aluminossilicatos tem mulita secundária em forma de agulhas.

A reação no estado sólido de transformação de mulita primária em mulita secundária acicular também necessita da fase vítrea para se completar, e como na lama vermelha é possível encontrar cátions como Na e Fe é possível produzir vidro com uma baixa viscosidade. O que torna possível a nucleação e o crescimento da mulita secundária no material (MÖRTEL e BOUBACAR, 1977).

Devido à presença principalmente de íons como ferro, sódio e cálcio, a formação de mulita pode ocorrer em temperaturas abaixo de  $1250\text{ }^\circ\text{C}$ , a partir de sílico-aluminatos, como argilas ou misturas de sílica e alumina (SOUZA, 2010).

Na sucessão de reações que podem dar origem à formação de mulita juntamente com cristobalita, ocorre a formação intermediária de metacaulinita, conforme as reações a seguir (SANTOS, 1989):



## 2.4 Argila

As argilas são definidas como um material natural, terroso, de granulação fina, constituídas essencialmente por argilominerais, que por sua vez são formados quimicamente por silicatos hidratados de alumínio e ferro, podendo ainda conter outros elementos acessórios (impurezas) e matéria orgânica (SOUZA SANTOS, 1989; ABCERAM, 2016).

Do ponto de vista da tecnologia cerâmica, o conceito de argila mais aceito no âmbito científico é o de Souza Santos (1989) que a define como um sedimento de granulometria fina com partículas inferiores a 2  $\mu\text{m}$  que é constituída por argilominerais podendo conter impurezas, e quando em contato com a água desenvolve certa plasticidade que é perdida após a secagem, com uma posterior queima em torno de 1000  $^\circ\text{C}$ , adquire dureza considerável.

As argilas são comumente encontradas em toda superfície, no entanto as suas propriedades podem variar de maneira significativa, dependendo da zona de onde são encontradas. Algumas podem ser utilizadas tal como são extraídas, enquanto outras devem ser purificadas e misturadas para se tornarem moldáveis. Sendo usada na indústria cerâmica em larga escala na confecção de telhas, tijolos, blocos, ladrilhos, elementos vazados entre muitos outros (RACANELLI, 2019; CHRISPIM et al, 2010).

### 2.4.1 Argilominerais

Os argilominerais são filossilicatos hidratados que se apresentam na forma de cristais muito pequenos ( $< 4 - 8 \mu\text{m}$ ) como lâminas hexagonais ou fibras. A estrutura cristalina desses minerais, com poucas exceções, consiste de um arranjo de folhas, formando as camadas, o que justifica a denominação de silicatos em folhas ou filossilicatos. As camadas individuais são compostas de duas, três ou quatro folhas com estruturas tetraédricas de  $\text{SiO}_2$  e estruturas octaédricas de brucita  $[\text{Mg}(\text{OH})_2]$ . São os argilominerais que definem as propriedades de uma argila, e quando em presença de água adquirem algumas propriedades importantes tais como: plasticidade, tixotropia e viscosidade de suspensões aquosas (CÂNDIDO, 2012; MOORE e REYNOLDS, 1989).

Segundo Souza Santos (1989), os grupos fundamentais que constituem todos as estruturas cristalinas dos argilominerais conhecidos são os grupos tetraédricos e octaédricos de átomos ou íons de oxigênio e de íons hidroxila ao redor de pequenos cátions, geralmente nos grupos tetraédricos encontra-se íons de  $\text{Si}^{4+}$  e  $\text{Al}^{3+}$  e ocasionalmente  $\text{Fe}^{3+}$  e  $\text{Fe}^{2+}$ , já nos grupos octaédricos encontra-se  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  e  $\text{Ti}^{4+}$ , e ocasionalmente encontra-se  $\text{Cr}^{3+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$  e  $\text{Li}^+$ .

Ainda segundo o mesmo autor, a maioria das estruturas dos argilominerais tem a sua origem a partir do reajuste ou do encaixe das folhas tetraédricas e octaédricas que se arranjam de diversas formas dando origem a maioria das estruturas cristalinas fundamentais.

Os principais grupos de argilominerais são vermiculita, illita, montmorilonita e caulinita, e o que diferencia esses argilominerais é basicamente o tipo de estrutura e as substituições que podem ocorrer, do alumínio por magnésio ou ferro e do silício por alumínio ou ferro, principalmente, e consequente neutralização das cargas residuais geradas pelas diferenças de cargas elétricas dos íons por alguns cátions (ABCERAM, 2016).

Existem mais de 45 tipos diferentes de argilominerais catalogados (Bayle, 1980). Os principais argilominerais são filossilicatos e podem ser classificados de acordo com a sua estrutura cristalina e química. De acordo com o Comitê de Nomeclatura da Associação internacional pour l'Etude des Argiles os filossilicatos podem ser classificados em dois grupos: os difórmicos ou camadas 1:1 e os trimórficos ou camadas 2:1.

Muitos trabalhos são realizados para avaliar o comportamento das argilas com diferentes tipos de argilominerais, WANG et. al. (2021) analisou a influência da vermiculita nos processos de secagem e sinterização na produção de tijolos, no qual adicionou um percentual de 0 e 30 % em peso deste argilomineral na mistura de argila. E constatou através de análises como Difração de Raio X (DRX), análises termogravimétricas e dilatométricas que a incorporação da vermiculita alterou as temperaturas de desidroxilação da caulinita e a formação de rutílio, além de aumentar o teor de enstatite, cordierite e conteúdo amorfo, ao passo que o quartzo, mulita e a cristobalita diminuíram. A retração de secagem, de sinterização e a densidade aumentaram com um aumento da proporção de vermiculita.

## 2.5 Açaí

Existem muitos tipos de agroindústrias na região amazônica, gerando milhares de toneladas de lixo todos os dias. A maior parte dos resíduos é gerada pela agroindústria de produtos de base vegetal, divididos em: caroço de açaí, fibra de coco verde, borra das folhas de muruci e de palma, torta de dendê, entre outros resíduos que são gerados a partir do processamento dos mais diversos frutos (ALAMAR, 2012).

Açaí como é comumente chamado na região norte do Brasil, é um fruto de uma palmeira encontrada em regiões tropicais do gênero *Euterpe*, a qual se refere a espécie *Euterpe Oleracea* Mart, é geralmente encontrada em estado silvestre fazendo parte da vegetação de matas de terra firme, várzea ou igapó (BACELLAR, 2006).

Além de aproveitar a polpa do fruto, a palmeira também tem outras possibilidades de utilizar seus componentes: o caroço, que é utilizado como fertilizante para o cultivo de hortaliças e plantas ornamentais, e o gomo terminal, que se pode extrair o palmito para consumo humano ou animal. A parte comestível do açaí (polpa) corresponde a menos de 20 % do fruto, sendo os 80 % restante composto pelo caroço. A análise química da polpa apresenta: umidade 59,73%; proteínas 2,52%; lipídios 7%; glicídios 25,52%; cinza 1,23%; cálcio 0,167%; fósforo 0,051% e ferro 0,004% (BACELLAR, 2006).

### 2.5.1 Produção e comercialização

De acordo com dados divulgados pela Produção da Extração vegetal e da silvicultura – PEVS (2019) o estado do Pará atingiu uma marca de produção de açaí a 1.012.740 toneladas no ano de 2015. Os dados da produção de açaí variam, pois depende da época do ano, onde a safra do fruto se altera de acordo com a região e época do ano. No estado do Pará, principal produtor, o período da safra do fruto varia entre os meses de agosto a novembro. Já no estado do Amazonas, o pico de maior produção se dá entre os meses de novembro a maio, enquanto que no estado do Acre essa produção se dá durante o ano todo, pois quando a colheita do fruto oriundo de terra-firme que compreende os meses de janeiro a julho, se inicia a colheita de frutos oriundos da várzea que vai de agosto a dezembro (PEVS, 2019).

Segundo dados da Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura – PEVS (2019) feita pelo IBGE que fornece informações sobre produção da extração vegetal, produção da silvicultura, valor da produção e áreas existente e colhida dos cultivos florestais, o açaí obteve a maior participação no valor de produção dentro do grupo alimentícios.

A Tabela 2 apresenta dados da quantidade produzida na extração vegetal do açaí no Brasil e o valor da produção na extração vegetal dos anos de 2015 a 2020.

**Tabela 2** - Quantidade produzida na extração vegetal de açaí (toneladas); valor da produção na extração vegetal (mil reais)

Ano	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Quantidade (t)	216 071	215 631	219 710	221 646	222 706	220 489
Valor (mil reais)	480 450	514 796	577 499	592 039	589 351	694 306

**Fonte:** Adaptado de IBGE, 2021.

A região norte do país concentra a maior parte da produção de açaí, com o Pará e o Amazonas correspondendo a 87,5 % do total. O estado do Pará é o maior produtor do mundo de açaí, onde dobrou sua produção nos últimos 10 anos e é o maior exportador do Brasil, seguido do Amazonas. Enquanto o Maranhão aumentou a sua extração nos últimos 5 anos estando em terceiro lugar no ranking nacional e

vem se consolidando como um dos maiores produtores do fruto no Brasil (CONAB, 2019).

Segundo EMBRAPA (2016) alimentos processados contendo açaí lançados no mercado mundial nos últimos 5 anos, 22 % usam o açaí em suco, 12 % energéticos e bebidas esportivas, 9 % lanches, 7 % de sobremesas e sorvetes, 5 % em laticínios e 3 % em doces e balas, os Estados Unidos (30 %), Brasil (19 %) e Canadá (8 %) são os países mais representativos no lançamento desses produtos.

Embora o açaí seja um produto originário da região amazônica do Brasil, os Estados Unidos é o maior processador e exportador do fruto. Onde ele assume o primeiro lugar em importação do produto, cerca de 77 % do total exportado vai para as indústrias de processamento norte americanas.

De tal modo o fruto vem ganhando destaques em outras regiões, tais como Países Baixos, Japão, Austrália, entre outros já estão sendo atraídos pelo fruto do estuário amazônico. Devido a essa prioridade de produtos à base de açaí, o mercado consumidor estará aquecido pela procura não só do fruto, mas também de produtos processados a base de açaí. Por outro lado, impõe um desafio para o Brasil em suprir a demanda futura, especialmente nos períodos de entressafra, e também para se consolidar como grande processador e exportador, lugar hoje ocupado pelos norte-americanos (EMBRAPA, 2016).

### 2.5.2 Questão ambiental

Com o desenvolvimento do agronegócio e inúmeras atividades relacionadas a este setor, na maioria dos casos, os resíduos gerados por essas atividades não são tratados adequadamente, sendo assim descartados de maneira irresponsável no meio ambiente, onde o volume de resíduo gerado supera a capacidade do ambiente promover a sua autodepuração (SOUZA, 2009).

A parte comestível do açaí corresponde a 17 % do fruto, sendo o restante (83 %) composto pelo caroço. A análise química da polpa apresenta: umidade 59,73 %; proteínas 2,52 %; lipídios 7 %; glicídios 25,52 %; cinza 1,23 %; cálcio 0,167 %; fósforo 0,051% e ferro 0,004 %. O valor energético de 100 gramas é de 80 calorias. A cor roxa apresentada é consequência da presença na fruta de material corante pertencente ao grupo das antocianinas (BACELLAR, 2006). O caroço (resíduo) tem

um percentual muito grande em relação ao que é de fato aproveitado, gerando desse modo, uma quantidade muito grande de resíduos sólidos.

Embora o fruto apresente muitos benefícios, tanto para a saúde quanto para a economia, o caroço gera impactos ambientais. Em torno de 80 % do total de açaí processado se transforma em resíduo sólido no qual ainda não se tem um tratamento nem destinação adequada, sendo jogados em rios, lixões, canais e até mesmo em vias públicas (FARINAS; SANTOS; NETO & PESSOA, 2009).

Esses resíduos gerados após a extração da polpa, são constituídos basicamente pelo caroço e pelas fibras e que apesar de ser uma fonte de material lignocelulósico renovável, apresenta um sério problema urbano em relação a limpeza de vias públicas devido ao seu grande volume gerado (COSTA, 2014). A Figura 15 mostra um exemplo do descarte inapropriado do caroço em vias públicas da região metropolitana de Belém.

**Figura 15** – Descarte do caroço do açaí em vias públicas na região metropolitana de Belém



**Fonte:** Próprio autor, 2021.

A Lei nº 12.305/2010 que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) define que o caroço de açaí é um resíduo de atividade comercial, e de tal modo a coleta e destinação do mesmo é de responsabilidade do seu gerador, ou seja, a responsabilidade desse resíduo é das empresas que fazem a extração da

polpa do fruto conhecido na região metropolitana de Belém como “batedores de açaí” (BRASIL, 2010).

### 2.5.3 Potencial do reaproveitamento do caroço de açaí

Como descrito anteriormente o caroço do açaí é um resíduo agroindustrial do processamento da polpa, definida como um pequeno endosperma sólido ligado a um tegumento, que quando maduro apresenta 44,5 % de celulose, 22,1 % de hemicelulose e 22,5 % de lignina (base seca) (OLIVEIRA, 2014). Embora seja possível gerar energia térmica (queima de biomassa em caldeira), produzir fertilizantes ou matéria-prima para o artesanato natural, essas aplicações não são suficientes para absorver a grande quantidade de resíduos gerados (DOMINGUES, 2017).

Para gerenciar esse problema da gestão do resíduo do ponto de vista energético, foram estudadas tecnologias como combustão, gaseificação, pirólise e digestão anaeróbia (ITAI *et. al.*, 2014).

Virmond *et. al.* (2012) realizou estudos de caracterização sobre diversos resíduos agroindustriais, entre eles o caroço de açaí, para aplicação em biocombustíveis por processos termoquímicos. E foi constatado que o mesmo apresentou um dos menores valores de poder calorífico (LHV), maior teor de cinzas e menor teor de material volátil, que são características não interessantes para este processo comparado aos demais resíduos. O estudo mostrou também que os teores de N e S contidos nas sementes geram maior probabilidade de emissão de poluentes durante a combustão, principalmente em relação a óxidos de Enxofre (SO<sub>x</sub>), onde entre os resíduos foi o que apresentou um maior teor de S.

Bufalino *et. al.* (2018) estudou a influência da separação das fibras e das sementes nos atributos energéticos, e constatou que os valores de poder calorífico tanto das fibras quanto da semente ficaram bem próximos (19,91 MJ kg<sup>-1</sup> e 19,32 MJ kg<sup>-1</sup>), assim como os teores de carbono fixo (21,39 % e 21,50 %) e sólidos voláteis (77,32 % e 76,65 %). No entanto, houve diferença nas temperaturas iniciais de degradação e taxas de perda de massa mostradas pela análise termogravimétrica. E concluiu que deve haver um processo de secagem antes do processo de combustão, em razão do alto teor de umidade presente, com o intuito de otimizar o processo.

Itai et. al. (2014) fez um estudo para avaliar o uso do caroço de açaí em sistemas de gaseificação para geração de energia, usando para isso um gaseificador cilíndrico downdraft que posteriormente foi aplicado um modelo de equilíbrio, e tais previsões feitas pelo modelo mostraram previsões satisfatórias confirmando sua aplicabilidade para avaliações preliminares de gaseificação de biomassa.

Silva et. al. (2004) fez um estudo para uma possível aplicação do caroço em gaseificadores, caldeiras para geração de energia elétrica, mecânica e gás, em fornos de padarias, fogões a biomassa. Desse modo o poder calorífico dos caroços foi medido pelo método da bomba calorimétrica, PMB-454/IBP - ABNT, 1968, que constatou um poder calorífico de 4.505 kcal/kg e o potencial energético em torno de 40.800 MWh/mês. Onde posteriormente foram feitos teste laboratoriais em um gaseificador de pequeno porte de 2 kW para geração de energia elétrica e cocção, alimentado pelos caroços, mantendo o reator sempre em 60 % da sua capacidade. Concluindo que essa é uma alternativa viável para a utilização de biocombustíveis em forma de peletes energéticos, para suprir a escassez de energia elétrica.

## **2.6 Trabalhos desenvolvidos com resíduo de bauxita**

O resíduo do processo de produção da alumina conhecido como lama vermelha, é um rejeito gerado na etapa de clarificação do processo Bayer, e como mostrado anteriormente é um resíduo sem valor agregado e causa muitos passivos ambientais. Nas últimas décadas, o cenário ambiental das produções industriais de larga escala vem se interessando pelo conceito de sustentabilidade como a maneira mais viável de minimizar os danos ambientais associados à produção e destinação de resíduos, onde a indústria da construção civil vem se consolidando como o setor mais promissor para o reaproveitamento de resíduos. Desse modo, os trabalhos a seguir são alguns exemplos de estudo de reaproveitamento desse resíduo.

- Hildebrando (1998), em seu trabalho “Aplicação do Rejeito do Processo Bayer (Lama Vermelha) Como Matéria-Prima na Indústria de Cerâmica Estrutural”, avaliou o uso do rejeito do processo Bayer como matéria-prima para aplicação na industrial de cerâmica estrutural. Confeccionando corpos de prova com 50 % e 70 % de lama vermelha

e argila respectivamente, realizando queimas em várias temperaturas (950, 1000, 1050 e 1190 °C) e avaliando as propriedades cerâmicas em comparação com a literatura.

- Souza (2010), em sua tese “Estudo e Avaliação do uso de Resíduos do Processo Bayer como Matéria-Prima na Produção de Agregados Sintéticos para a Construção Civil”, fez um estudo da reutilização da lama vermelha com outras matérias primas (argila e sílica), para produzir agregados sintéticos com a finalidade de aplica-los em concretos visando a indústria da construção civil. Em tal estudo foi possível constatar que é viável controlar perfeitamente a formação de fase vítrea, que é responsável pelas propriedades físicas dos agregados (porosidade, resistência mecânica e densidade), e concluiu que este material pode ser utilizado em concreto convencional.
- Quaresma (2013), em seu estudo “Produção de Agregados Sintéticos a Partir do Rejeito do Processo Bayer e da Cinza de Caldeira”, utilizou a lama vermelha e cinza de caldeira para produção de agregados sintéticos para a aplicação na construção civil. Variando os percentuais em peso de lama vermelha e cinza, com um máximo de 90 % e 50 % respectivamente e fixando o percentual de argila em 5 %. Os corpos de prova foram sinterizados a 1300 °C, que posteriormente foram feitos os ensaios físicos, chegando à conclusão que a utilização desses rejeitos é uma boa alternativa para a destinação dos mesmos.
- Rosário (2013), em sua dissertação “Concreto com Utilização de Agregado Sintético Produzidos a Partir da Lama Vermelha: Estudo de Dosagem, Propriedades e Microestrutura”, estudou a viabilidade de produção de um concreto por meio da utilização de um agregado sintético obtido a partir da lama vermelha. Utilizou em sua formulação (lama vermelha 60 %, areia 20%, argila 10% e biomassa 10%) a biomassa (carvão vegetal) com o intuito de gerar gases no processo de sinterização e desse modo diminuir a massa específica do agregado,

sinterizando-os a uma temperatura de 1300 °C com um patamar de queima de 180 min.

- Santos (2019), em sua tese “Influência da Sílica e Temperatura nas Propriedades Físicas dos Agregados Sintéticos Produzidos com o Resíduo do Processo Bayer”, estudou a influência do teor de sílica nas propriedades dos agregados utilizando um percentual de 10, 20 e 30 % em peso a uma temperatura de sinterização de 1200, 1250 e 1300 °C. E constatou que o teor de sílica está diretamente ligado aos valores de massa específica e porosidade, e a temperatura de 1300 °C obteve os melhores resultados no que diz respeito a relação massa específica e porosidade.
- Souza (2019), em seu estudo com o título “Utilização da lama vermelha para produção de agregado sintético”, avaliou as propriedades físicas dos agregados com diferentes proporções de lama vermelha, argila, carvão vegetal e cinza volante, sinterizados a uma temperatura de 900 °C com um patamar de queima de 3h. Constatou que a essa temperatura o material não apresentou um aspecto vítreo, não apresentando assim, característica de um agregado com desempenho para utilização estrutural, de modo que a fase mulita começa a se formar em torno de 1000 °C.
- Lira (2021), em seu trabalho de conclusão de curso “Produção e caracterização de agregados sintéticos utilizando o resíduo do processo Bayer”, realizou um estudo a fim de avaliar as possíveis mudanças nas propriedades físicas dos agregados feitos a partir de lama vermelha, utilizando um percentual maior de argila (25 %) em comparação com trabalhos anteriores. Realizou sinterizações à 1200 e 1250 °C, e constatou que nesta última temperatura obteve uma massa específica de 1,88 g/cm<sup>3</sup>, que se enquadra como agregado leve de acordo com a literatura, e com o auxílio de ensaios como DRX e MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura) confirmou a presença de mulita secundária no material sinterizado.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Materiais

As matérias-primas utilizadas foram: o resíduo do processo de produção da alumina (lama vermelha), cedida pela mineradora Hydro Alunorte situada no município de Barcarena – Pa, a argila foi retirada do município de São Miguel do Guamá – Pa, a sílica foi adquirida em empresas de materiais de construção na região metropolitana de Belém e o caroço de açaí foi doado por empresas situadas aos arredores da Universidade Federal do Pará. A Figura 16 apresenta as matérias primas usadas no trabalho.

**Figura 16** – Matérias-primas: (a) lama vermelha; (b) argila; (c) sílica; (d) carvão



Fonte: Próprio Autor, 2021.

#### 3.2 Beneficiamento das matérias-primas

As matérias-primas foram secas em estufa com recirculação de ar<sup>1</sup> por um período de 24h a uma temperatura de  $\pm 105$  °C. A argila primeiramente passou em um britador<sup>2</sup> para uma primeira desagregação e em seguida foi desagregada em um moinho de bolas<sup>3</sup>. A Figura 17 mostra a etapa de beneficiamento da argila.

<sup>1</sup> Marca: SolidSteel, Modelo: SSDc – 110L

<sup>2</sup> Marca: WEG S.A., Modelo 112M 879

<sup>3</sup> Marca: CIMAQ S.A., Modelo: Work Index

**Figura 17** – (a) Britador; (b) Moinho de bolas; (c) Moinho de discos



**Fonte:** Próprio Autor, 2021.

A lama vermelha passou apenas pelo processo de secagem em estufa por 24h, em seguida foi desagregada em moinho de bolas por um período de 20 minutos. Enquanto que a sílica passou apenas pelo moinho de discos para sua cominuição. A Figura 18 apresenta a lama vermelha após retirada do moinho de bolas e a sílica após adequação dimensional.

**Figura 18** – (a) Lama Vermelha; (b) Sílica após beneficiamento



**Fonte:** Próprio Autor, 2021.

Após os processos de beneficiamento todas as matérias-primas passaram por um processo de peneiramento utilizando peneiras de aberturas de 100 mesh Tyler (0,149 mm) afim de uniformizar as dimensões das partículas que posteriormente influenciará no processo de sinterização.

### 3.3 Processo de produção dos agregados

Para a produção dos corpos de provas as matérias-primas foram devidamente pesadas com uma composição de 60 % lama vermelha; 20 % sílica 15 % de carvão feito a partir do caroço de açaí e 5 % de argila, no qual está composição foi baseada em estudos realizados por Souza (2010); Rosário (2013) e Santos (2019). Posteriormente essa mistura foi homogeneizada em um misturador por um período de 20 minutos e em seguida foi adicionado um percentual de 15 % de água. A Figura 19 apresenta a mistura sendo homogeneizada e após o acréscimo de água. O trabalho tem como objetivo analisar a influência da temperatura e do patamar de queima nos agregados com adição de carvão feito a partir do caroço de açaí nas propriedades físicas dos mesmos.

**Figura 19** – (a) Homogeneização das misturas; (b) Após adicionar água



**Fonte:** Próprio autor, 2021

Em seguida a massa foi levada para uma extrusora onde ao final no processo adquire um formato cubico que posteriormente é cortado em porções menores de aproximadamente 10 cm. Após esse processo a massa cerâmica é levada a estufa<sup>4</sup> com o intuito de vaporizar a água de hidratação. Em seguida o material é britado de modo que a sua granulometria fique  $\leq 19$  mm pensando em uma futura aplicação em concretos. A Figura 20 apresenta a massa cerâmica extrudada (a), após a britagem do mesmo (b), e por último levados a peneira para adequação dimensional dos corpos de prova (c).

<sup>4</sup> Marca: SolidSteel modelo SSDC-110L, localizada na Faculdade de Engenharia Química- UFGA.

**Figura 20** – Mistura extrudada (a); britagem do material (b); adequação dimensional (c)



Fonte: Próprio autor, 2021

### 3.4 Sinterização dos agregados

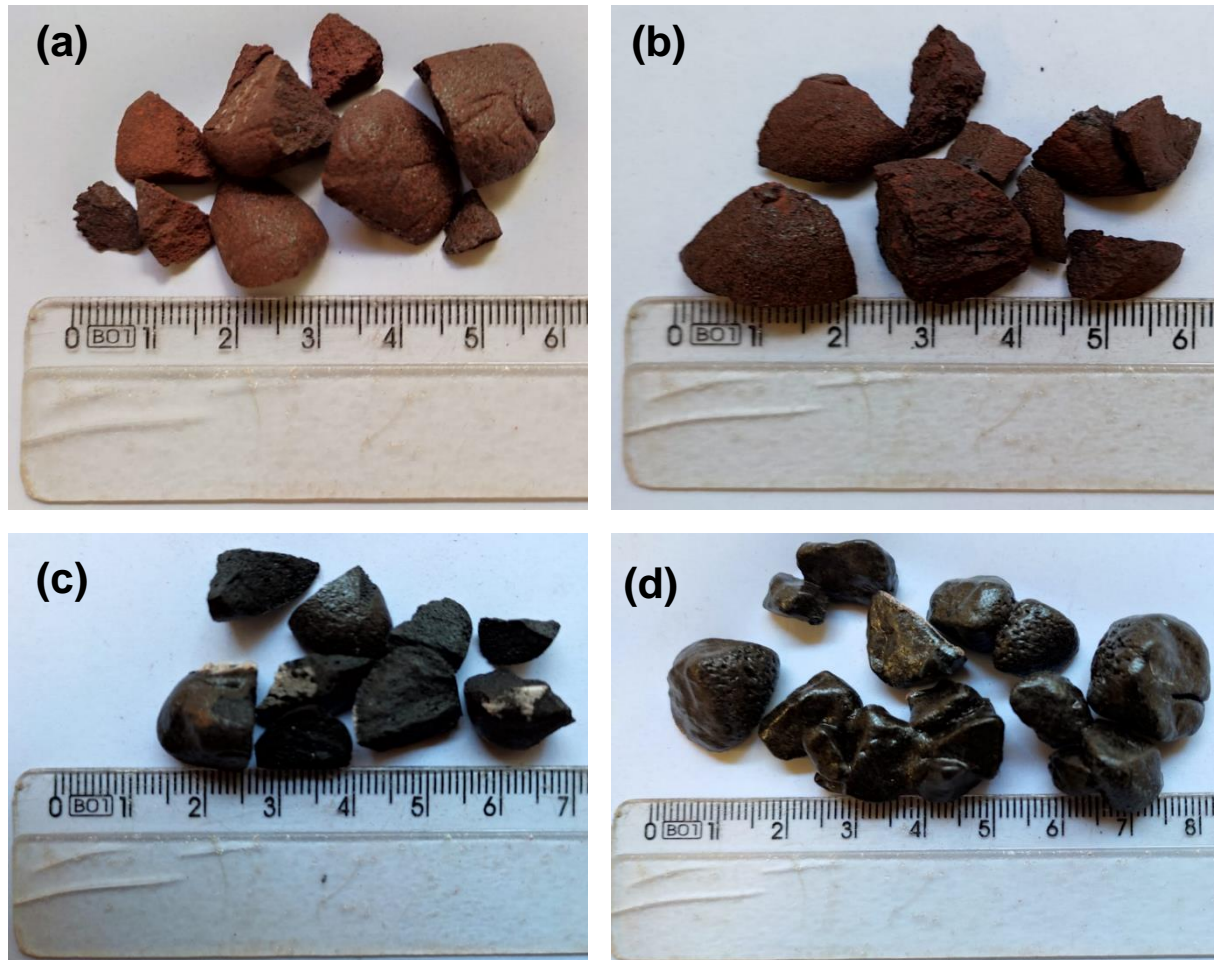
O processo de sinterização dos agregados foi realizado em forno elétrico<sup>5</sup> localizados no Laboratório de Caracterização de Materiais – ITEC/PRODERNA/UFGA, com temperaturas de 1100 e 1200 °C, na temperatura de 1100 °C se estabeleceu um patamar de queima de 3h e 4,5h em virtude da baixa temperatura o material precisa de um tempo de sinterização maior, na temperatura de 1200 °C o patamar de queima foram os mesmos citados anteriormente, todos com uma taxa de aquecimento de 10 °C/min.

A Figura 21 mostra os agregados após o processo de sinterização, e nesta figura nota-se visivelmente a formação da camada vítrea na superfície do agregado com o aumento da temperatura e do patamar de queima, chegando até a unificar

<sup>5</sup> Marca Junger, modelo SSC

agregados que estavam próximos na temperatura de 1200 °C com o patamar de 4,5h.

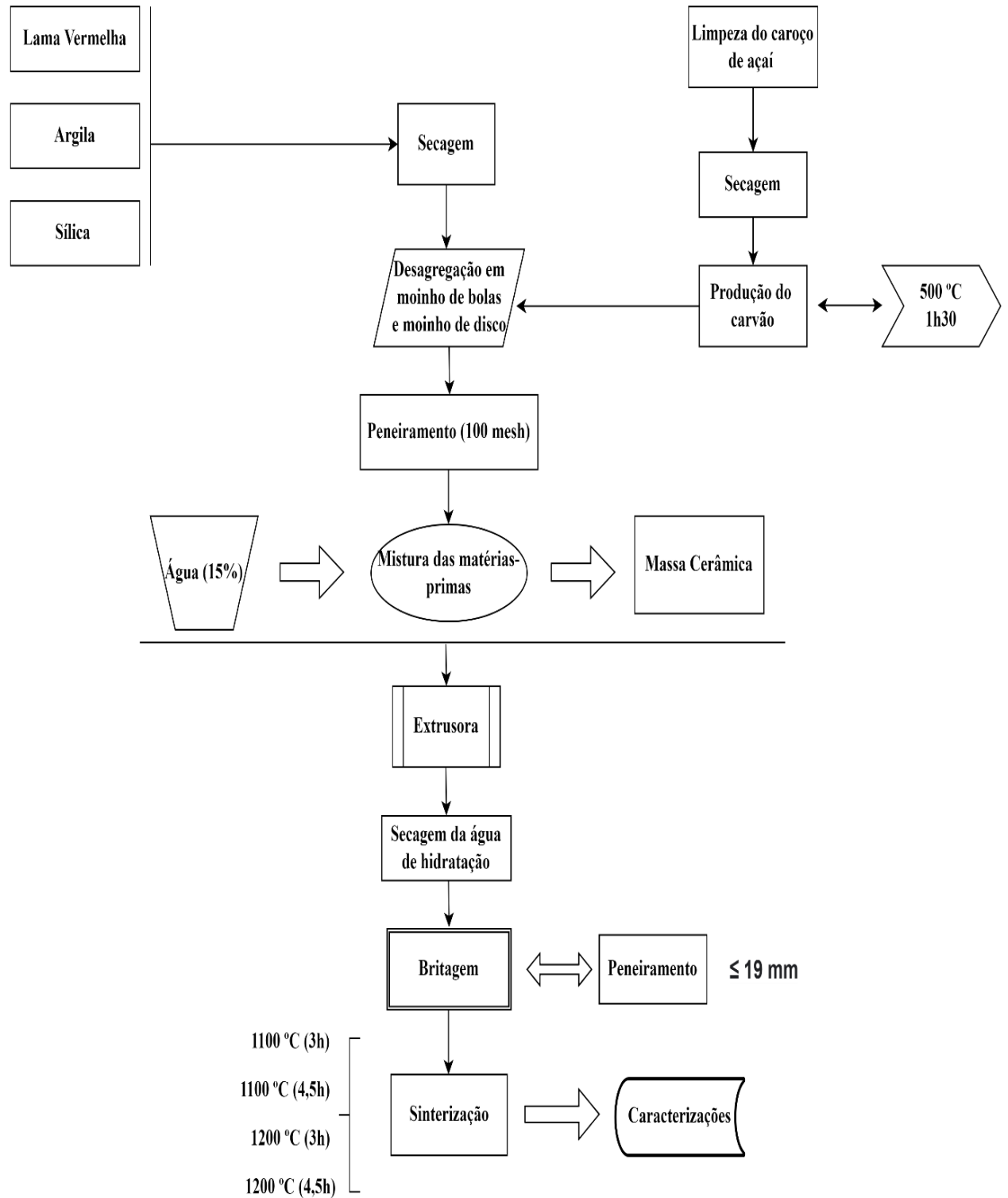
**Figura 21** – Agregados após o processo de sinterização, (a) 1100 °C (3h); (b) 1100 °C (4,5h); (c) 1200 °C (3h); (d) 1200 °C (4,5)



**Fonte:** Próprio autor, 2021

A Figura 22 apresenta um fluxograma que representa de forma resumida o processo de beneficiamento e produção dos agregados.

**Figura 22** – Fluxograma do processo de beneficiamento e produção



Fonte: Autoria própria, 2021.

### 3.5 Caracterização das matérias-primas e dos agregados

#### 3.5.1 Difração de Raio X (DRX)

A técnica de difração de raio X é um dos métodos mais comumente usados para determinar fases cristalinas nos mais diversos tipos de materiais, tanto de origem natural como sintética (SANTOS, 2019).

Para a caracterização mineralógica tanto das matérias-primas (argila e lama vermelha) quanto dos agregados sintéticos já sinterizados, foram realizadas pela técnica de Difração de Raios X com o intuito de observar as fases presentes nos materiais, para tal, utilizou-se a técnica conhecida como método do pó. Para a realização do mesmo, todos os materiais passaram por um ajuste granulométrico, sendo pulverizados em moinho de bolas e em seguida passaram em uma peneira de 200 mesh para se obter uma padronização das partículas. O ensaio foi realizado usando a radiação  $K\alpha_1=1,54 \text{ \AA}$  do cobre, operando a 10 mA e 30 kV.

#### 3.5.2 Análise Química

As composições químicas da argila e da lama vermelha utilizadas neste trabalho foram analisadas pela técnica de Fluorescência de Raio X (FRX), para analisar os óxidos presentes em cada um deles.

As amostras foram compactadas com um aglomerante do tipo Cera Wax® na proporção 10g de amostra para 2g de aglomerante até sua completa homogeneização. Foi utilizado um equipamento Bruker S2 Ranger, de configuração X Flash para esta análise.

#### 3.5.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Com o intuito de observar a morfologia dos agregados foi realizado o ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Para tal, os agregados foram inicialmente rompidos, e tiveram a sua superfície nivelada com lixas de grão 80 e passando sucessivamente por lixas de 120, 220, 400, 600, 1000, 1200 e 1500. Para se observar a presença da fase mulita no material, primeiro é necessário remover a camada vítrea presente no mesmo. Sendo realizado um ataque ácido com HF (ácido fluorídrico) a 10 % (v/v) por um período de 120 s, baseado em trabalhos anteriores

sendo consideradas condições adequadas para a remoção da camada vítrea de modo que não comprometa a estrutura da mulita. A Figura 23 evidencia as amostras durante o ataque ácido.

**Figura 23** – Amostras com a superfície parcialmente submersa em HF



**Fonte:** Autoria própria, 2022.

Após o ataque as amostras foram lavadas com água destilada em abundância, e levadas a estufa com recirculação de ar a 105 °C por um período de 24h. Por fim, as características morfológicas foram analisadas com um MEV<sup>6</sup> operando com feixes de elétrons de 5 kV, localizado no Laboratório de Caracterização de Materiais – ITEC/PRODERNA/UFGA.

#### 3.5.4 Determinação das propriedades cerâmicas dos agregados

Após a etapa de sinterização foram analisadas as propriedades físicas dos agregados, conhecidas como propriedades cerâmicas e referem-se a: porosidade aparente (% PA); absorção de água (% AA) e massa específica aparente (MEA g/cm<sup>3</sup>). Para a análise dos mesmos, foi utilizado os métodos especificados por Souza Santos (1989) e ASTM (2001), utilizando as equações a seguir:

$$PA (\%) = \frac{MU - MS}{MU - MI} \times 100 \quad (1)$$

<sup>6</sup> Marca Hitachi modelo: TM3000

$$\text{AA (\%)} = \frac{MU-MS}{MS} \times 100 \quad (2)$$

$$\text{MEA (g/cm}^3\text{)} = \frac{MS}{MU-MI} \times \rho_{H_2O} \quad (3)$$

Onde MS é a massa seca (g), MU massa úmida (g), MI massa imersa (g) e  $\rho_{H_2O}$  a massa específica da água. Para a realização do ensaio foram selecionadas 10 amostras de modo aleatório de cada temperatura, e pesadas em balança semi-analítica de 4 casas decimais para determinar a massa seca (antes de serem colocadas em água) e a massa úmida (após submersa 24h). Para auferir a massa imersa, foi utilizado um aparato de madeira com uma haste de alumínio acoplados a balança, de modo que o corpo de prova ficasse submerso em água. A Figura 24 apresenta o aparato utilizado na realização do ensaio.

**Figura 24** - Aparato utilizado para a medição das massas imersas



**Fonte:** Próprio autor, 2021

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Caracterização das matérias-primas

#### 4.1.1 Difração de Raios X

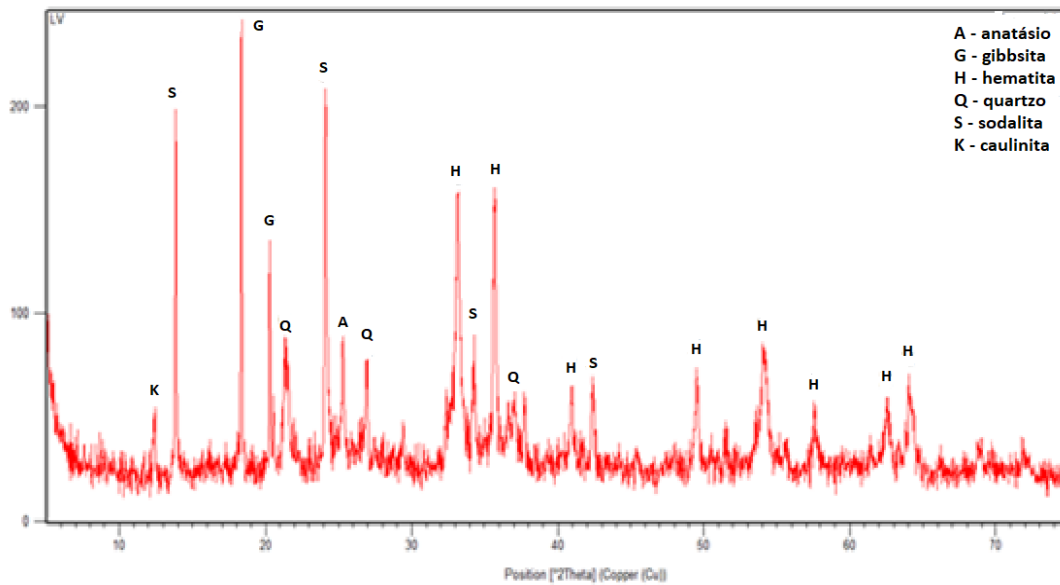
Na análise de difração de raios X da lama vermelha é possível perceber a presença do composto gibsita, o que mostra que provavelmente o resíduo é proveniente do bauxito gibsítico, e pode-se observar compostos característicos, como a própria gibsita, a hematita, goetita, anatásio e quartzo. Os compostos contendo Fe (hematita e goetita) podem ser que influenciem nas reações de estado sólido, de modo a diminuir a temperatura de formação de fase vítrea e da fase mulita, influenciando diretamente na resistência mecânica dos agregados.

também é possível observar a presença do argilomineral caulinita oriunda do processo de desagregação/lavagem da bauxita, a caulinita é um mineral prejudicial durante o processo de purificação da gibbsita. Onde a mesma é tida como sílica reativa e que durante o processo de lixiviação rapidamente precipita-se dando origem forma zeolítica sodalita. Essa transformação é indesejável pois grande quantidade do agente lixiviante (NaOH) é descartado na forma de sodalita na lama vermelha, estima-se que há um aumento nos custos do processo de 20 %, para o processamento de bauxita com teores de caulinita > 5 % (PAZ, 2012; SMITH, 2009; ARMSTRONG e DANN, 2000).

Também é possível observar a presença do composto sodalita, formada durante o processo Bayer, onde ela é formada a partir do Na que também é um dos principais fundentes (SANTOS, 2019; REIS, 2014). A conversão da caulinita em sodalita ocorre em meio altamente alcalino, no qual este mineral é dissolvido pelo NaOH, dando origem a um licor de aluminato e silicato de sódio que rapidamente se precipita na forma de sodalita (insolúvel nas condições do processo Bayer) (BARNES, 1999; GOUGAZEH e BUHL, 2014).

A Figura 25 apresenta os resultados da difração de raios X da lama vermelha cedida pela empresa Hydro Alunorte – Pa.

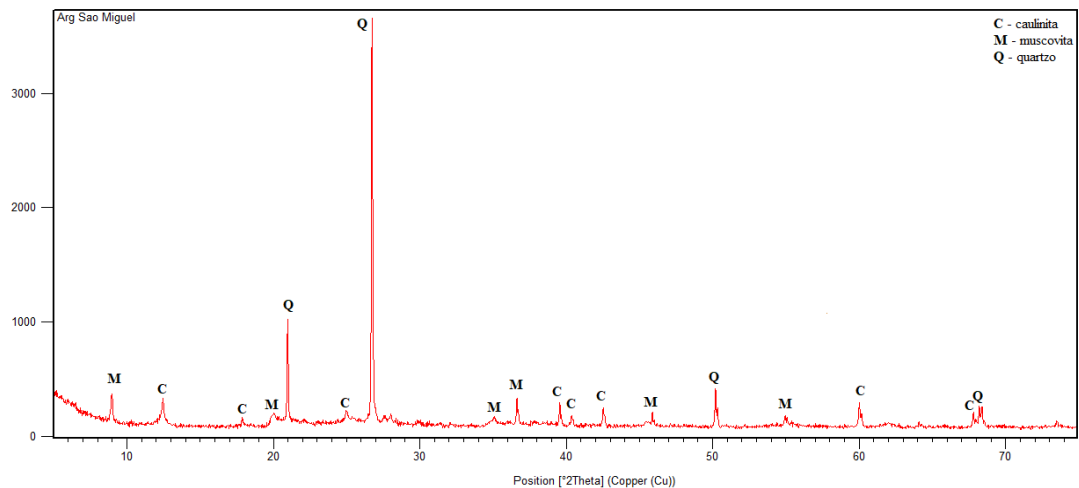
**Figura 25** - Análise de difração raio X da lama vermelha



**Fonte:** Próprio autor, 2021.

A Figura 26 apresenta o DRX da argila do tipo caulinita proveniente do município de São Miguel do Guamá – PA, e nele pode se observar a presença majoritária da fase quartzo, onde parte desse quartzo detectado é proveniente da areia presente da argila, e parte da sílica livre presente na constituição dos argilominerais.

Tal mineral, participará de forma efetiva nas reações de estado sólido, mais especificamente na formação de fase vítrea (amorfo), assim como na formação da fase mulita (cristalina), uma vez que este, é mais reativo do que a sílica presente na lama vermelha, encontrada na forma de zeólitas. Na análise também é possível observar a presença de argilominerais como a caulinita e muscovita, responsáveis pela plasticidade da mesma e que posteriormente também participaram nas reações de sinterização para a formação de mulita (SOUZA, 2010; REIS, 2014; SANTOS, 2019).

**Figura 26** – Análise de raios X da argila de São Miguel

Fonte: Próprio autor, 2021.

#### 4.1.2 Análise Química Resíduo de Bauxita

A Tabela 3 evidencia a composição química da lama vermelha, e nela podemos observar a significativa presença de óxidos ferro, alumínio e silício, oriundos das fases minerais Hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), Goetita ( $\text{FeO}(\text{OH})$ ), Quartzo ( $\text{SiO}_2$ ) e Alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Também pode se observar a presença de óxidos de cálcio ( $\text{CaO}$ ) e sódio ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) que em formulações cerâmicas atuam como materiais fundentes, sendo assim possível a sinterização em temperaturas menores, facilitando a formação de fase vítrea.

**Tabela 3** – Composição química do resíduo de bauxita

Compostos	(%)
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	34,31
$\text{Al}_2\text{O}_3$	21,27
$\text{SiO}_2$	17,72
$\text{Na}_2\text{O}$	9,25
$\text{TiO}_2$	6,89
$\text{CaO}$	1,22
P.F(perda ao fogo)	8,11

Fonte: Próprio autor, 2021.

#### 4.1.2 Análise química da argila

A argila é utilizada no processo de produção para facilitar a conformação do material com o intuito de aumentar a plasticidade da massa cerâmica. A argila utilizada no estudo é oriunda do município de São Miguel do Guamá – Pa. A tabela 4 evidencia a sua composição química, podendo observar uma expressiva presença de óxido de silício (65,5 %) que segundo Santos (2019) estão relacionado a fase mineral quartzo e de sílica livre presente na constituição dos argilominerais, assim como o óxido de alumínio (20,3 %) relacionados a presença destes argilominerais (caulinita e muscovita), que participaram diretamente no processo de formação da mulita, apresentando também traços de óxidos fundentes que são importantes para o processo de sinterização. A Tabela 4 apresenta a composição química da argila.

**Tabela 4** – Composição química da argila de São Miguel

<b>Constituintes da argila</b>	<b>(%) peso</b>
SiO <sub>2</sub>	65.5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20.3
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7.23
K <sub>2</sub> O	2.67
MgO	1.74
CaO	0.124
TiO <sub>2</sub>	1.71
ZrO <sub>2</sub>	0.111
SO <sub>3</sub>	0.152

Fonte: Próprio autor, 2021.

#### 4.2 Propriedades cerâmicas dos agregados

Após a etapa de sinterização foi realizado os ensaios físicos de absorção de água, porosidade aparente e massa específica aparente e os resultados do ensaio estão descritos na Tabela 5. Vale ressaltar que a composição química da massa

cerâmica foi fixada em 60 % LV, 20 % sílica, 15 % biomassa e 5 % de argila, com diferentes temperaturas e patamar de queima.

**Tabela 5** – Resultados dos ensaios físicos

Patamar de Queima	Absorção de água (AA%)	Porosidade Aparente (PA%)	Massa específica aparente (MEA g/cm <sup>3</sup> )
1100 °C 3h	6,94	14,81	2,13
1100 °C 4,5h	12,51	23,46	1,87
1200 °C 3h	0,45	0,91	2,01
1200 °C 4,5h	0,55	1,16	2,19

**Fonte:** Próprio autor, 2021.

Com os resultados apresentados na Tabela 5 pode-se observar que na temperatura de 1100 °C, houve um aumento expressivo na absorção de água de 6,94 % para 12,51 % e da porosidade aparente de 14,81 % para 23,46 %, quando comparados os dois patamares de queima, pois como é uma temperatura relativamente baixa para esses processos, o material precisa de um tempo maior de residência no forno para que as reações de estado sólido ocorram, e os poros sejam formados no interior do material, o que justifica exatamente o aumento na absorção de água e da porosidade aparente.

Como analisado por Santos (2014) conforme é adicionado biomassa na mistura, o material irá sofrer expansão em seu interior devido aos gases que são liberados durante o processo de sinterização, resultando em uma fração maior de poros, o que acarretará posteriormente na diminuição da sua massa específica, que é possível observar na massa específica aparente que variou de 2,13 g/cm<sup>3</sup> para 1,87 g/cm<sup>3</sup>, e com essa redução de massa específica tem-se o aumento das propriedades de AA (%) e PA (%) uma vez que estas são inversamente proporcionais.

Enquanto que nas amostras sinterizadas a 1200 °C, houve um decréscimo expressivo na absorção de água e na porosidade aparente em relação as amostras sinterizadas a 1100 °C, com os valores de 0,45 % e 0,55 % de absorção de água e porosidade aparente respectivamente para o patamar de 3h, e 0,91 % e 1,16 % para o patamar de 4,5h. Como mostrado por Souza (2010) isso ocorre devido ao

percentual de sílica no material de 20 % e que na temperatura de 1200 °C há a formação da camada vítrea, devido ao aumento da concentração de sílica na superfície do material, especialmente em relação as amostras sinterizadas a 1200 °C com 4,5h de patamar.

Para esta temperatura de 1200 °C tanto para o patamar de 3h quanto para o de 4,5h pode-se associar a diminuição da porosidade e a absorção de água ao fechamento dos poros devido a temperatura que foi maior, uma vez que depois dos poros formados, o tempo de exposição do material no forno proporcionou uma redução na viscosidade da fase vítrea devido aos minerais alcalinos presentes na lama vermelha, e essa por sua vez percolou pelos poros ocasionando o seu fechamento. O que acarretou em um aumento da massa específica aparente para valores de 2,01 e 2,19 g/cm<sup>3</sup> com o patamar de 3h e 4,5h respectivamente, quando comparados as amostras sinterizadas a 1100 °C (4,5h).

Souza (2010) demonstrou que em temperaturas superiores a 1200 °C com o teor de 20 % de sílica proporciona uma diminuição na massa específica que pode ser associada ao aumento da fase vítrea, e principalmente ao aumento do teor de sílica para percentuais acima de 20 %.

Segundos os estudos feitos por Souza (2010), Santos (2014) e Santos (2019), há uma redução nos resultados de massa específica aparente conforme o aumento da temperatura e do teor de sílica, no entanto com o patamar de 4,5h ainda não foi possível fazer com que o material sofra uma expansão maior, pois tal precisaria de temperaturas superiores a 1200 °C e um teor de sílica maior que 20 %.

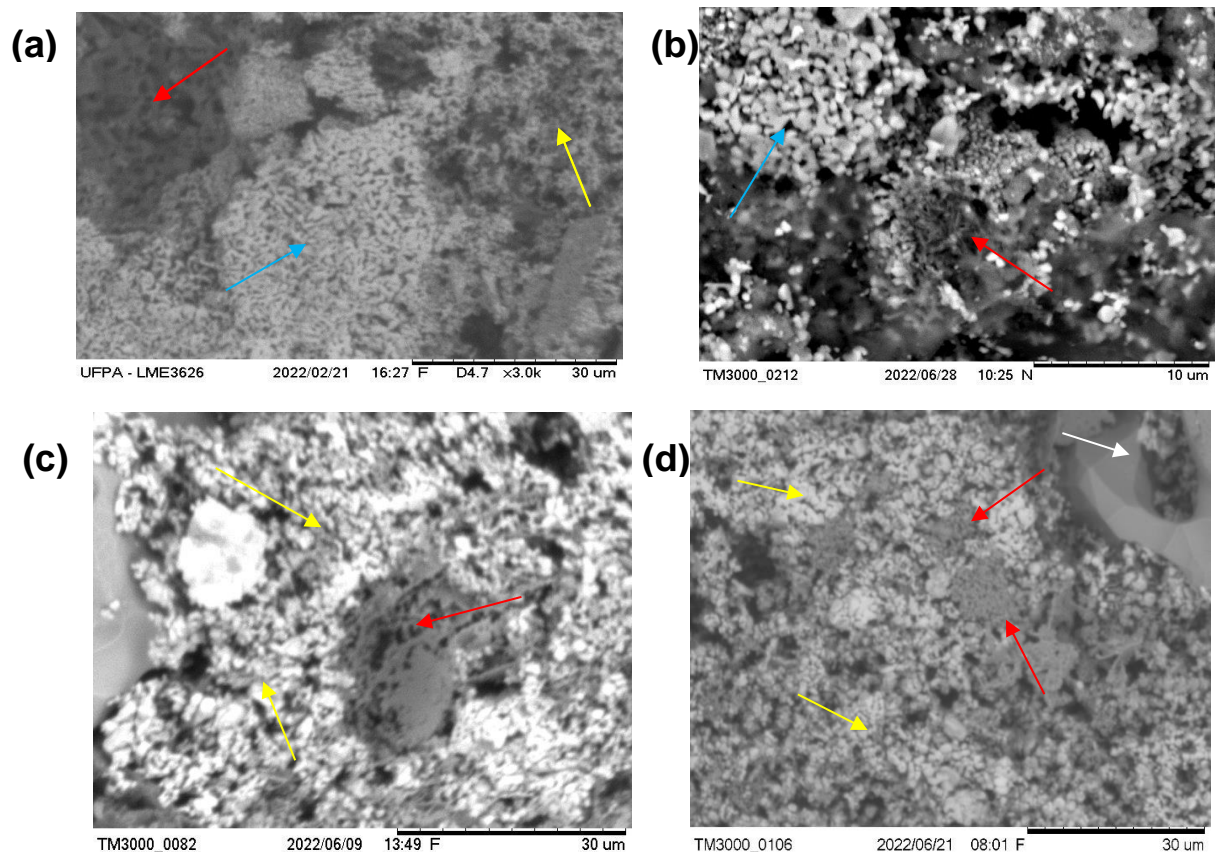
### **4.3 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)**

Com o auxílio do microscópio eletrônico de varredura foi possível observar se houve formação da fase mulita secundária de morfologia acicular, responsável por conferir resistência mecânica a materiais cerâmicos a base de sílico-aluminatos. Mörtel (1978) ressalta que a nucleação e crescimento da fase mulita dependem da viscosidade da fase vítrea para se completar. No entanto no diagrama de equilíbrio convencional SiO<sub>2</sub> – Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> mostra que as reações de estado sólido para a formação de mulita ocorrem em temperaturas superiores a 1250 °C para matérias-primas puras.

Entretanto Mörtel (1978) mostra que a presença de cátions vitrificantes podem influenciar diretamente na nucleação e crescimento de mulita secundária em temperaturas a partir de 1200 °C, onde estas transformações ocorrem sempre a partir de sistemas primários, conhecidos como metacaulinita ou sistemas metaestáveis.

A grande quantidade de cátions vitrificantes presentes na lama vermelha, como o sódio, ferro e cálcio podem influenciar diretamente na formação de vidro com baixa viscosidade, o que torna possível a nucleação e crescimento da mulita secundária a partir da estrutura da mulita primária. A Figura 27 evidencia a presença de mulita secundária representada pelas setas vermelhas, mulita primária pela seta azul, fase vítrea setas amarelas, e grãos de quartzo setas brancas, nas amostras sinterizadas a 1100 °C 3h (a); 1100 °C 4,5h (b); 1200 °C 3h (c) e 1200 °C 4,5h (d).

**Figura 27** – Micrografias das amostras sinterizadas



**Fonte:** Próprio autor, 2021.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 5.1 Conclusão

O presente trabalho mostrou a viabilidade do uso de um resíduo oriundo do processo Bayer para a produção de agregados sintéticos, tendo em vista que é um resíduo que tem em sua composição componentes interessantes para as reações de estado sólido, assim como a adição do resíduo urbano proveniente do beneficiamento da polpa do açaí, na forma de carvão pulverizado com o intuito de gerar gases de expansão no material, e a partir das análises feitas pode-se concluir que:

- A utilização do resíduo de bauxita na produção de agregados sintéticos se mostrou uma alternativa viável para a destinação deste resíduo que foi acumulado durante anos de atividades industriais e que acarretou em diversos desastres ambientais. Ao passo que, o grande volume deste material depositado acompanha as necessidades da indústria civil na procura de agregados naturais, sendo assim uma boa alternativa para a destinação do mesmo, ao mesmo tempo que se preserva os estoques de matérias-primas naturais como a brita e o seixo rolado, e reduzindo todos os passivos ambientais que a exploração deste promove.
- A temperatura e o patamar de queima se mostraram variáveis de extrema importância para as reações de estado sólido, onde houve uma diferença significativa nas propriedades cerâmicas na temperatura de 1100 °C com os diferentes patamares de queima, onde no material sinterizado nesta temperatura com 3h de patamar apresentou 6,94 % (AA), 14,81 % (PA), ao passo que quando se aumentou o tempo de sinterização essas propriedades tiveram um aumento significativo para valores de 12,51 % e 23,46 %. Uma vez que estas duas propriedades são inversamente proporcionais a valores de MEA, ocorreu uma diminuição da massa específica de 2,13 g/cm<sup>3</sup> (3h) para 1,87 g/cm<sup>3</sup> (4,5h), sendo este último caracterizado como agregado leve.

- Na temperatura de 1200 °C houve uma redução expressiva nas propriedades de absorção de água e porosidade aparente em comparação com os sinterizados a 1100 °C, ocasionados pela temperatura e pela formação de camada vítrea na superfície do material.
- Em todas as amostras foi possível observar a formação de mulita secundária e principalmente de mulita primária, o que está de acordo com a literatura que mostra que os cátions vitrificantes presentes na lama podem influenciar diretamente na nucleação e crescimento desta fase (mulita secundária) que é de suma importância para conferir boas propriedades mecânicas a materiais cerâmicos.

## **5.2 Sugestões para trabalhos futuros**

- Avaliar as propriedades mecânicas dos materiais sintetizados, com ênfase no ensaio de compressão.
- Avaliar a influência da variável taxa de aquecimento nas propriedades físicas e mecânicas no material.
- Estudar o uso de outros percentuais de sílica no material (para valores > 20%) com o intuito de diminuir a massa específica e avaliar a influência neste com o aumento da temperatura.
- Utilizar em escala piloto um forno rotativo para acelerar o processo de sinterização, assim como analisar as diferenças nas propriedades do material em comparação com o forno rotativo e o forno usado neste estudo.

## REFERÊNCIAS

ABAJO, M. F. **Manual Sobre Fabricación de Baldosas, Tejas y Ladrillos**. Espanha: Beralmar S.A, 2000.

ABAL – Associação Brasileira do Alumínio. **Guia Técnico do Alumínio: Características Físico-Químicas**. 1ª ed. São Paulo: ABAL, 2020. 183p.

ABAL – Associação Brasileira de Alumínio. **Relatório da sustentabilidade da indústria de alumínio**, 2007. Disponível em: [www.abal.org.br](http://www.abal.org.br). Acesso em: 07 jul. 2021.

ABCERAM – Associação Brasileira De Cerâmica. **Anuário Brasileiro de Cerâmica**. São Paulo: ABC, 2004.

ABCERAM – Associação Brasileira De Cerâmica. **Matérias Primas Naturais**. São Paulo: ABC, 2016.

ABNT – Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR 7211**. Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

ABNT – Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR 9935**. Agregados – Terminologia. Rio de Janeiro, 2011.

ALAMAR, P. D. **Caracterização do perfil de fibras em resíduos agroindustriais amazônicos e de sua capacidade de adsorção seletiva**. 2012. 82 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2012.

ARMSTRONG, J.A., DANN, S.E. Investigation of zeolite scales formed in the Bayer process. **Microporous and Mesoporous Materials**, v. 41, pp. 89-94, 2000.

ASTM – American society for testing and materials. **C 128**: Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of fine aggregate, USA. 2001.

BACELLAR, A. A. **Competitividade da alvenaria estrutural na cidade de Manaus**. 2001. Dissertação (Mestrado) – CPG-FT/FAM, Manaus.

BACELLAR, Atlas A.; SOUZA, Rubem CR; XAVIER, Diogo JC *et al.* Geração de renda na cadeia produtiva do açaí em projeto de abastecimento de energia elétrica em comunidades localizadas no município de Manacapuru-Am. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 6., 2006, Campinas. **Anais online** . Disponível em: [http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=MSC0000000022006000200001&lng=en&nrm=abn](http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022006000200001&lng=en&nrm=abn). Acesso em: 06 dez. 2021.

BAILEY, S. W. Summary of recommendations of AIPEA nomenclature committee on clays minerals. **American mineralogist**, v. 65, n. 1-2, p. 1-7, fev. 1980.

BARBOSA, C. Barcarena: atingidos por mineradora terão acesso a resultados de exames toxicológicos. In: BRASIL DE FATO. **Contaminação**. 2020. Disponível em: <https://www.brasildefato.com.br/2020/02/04/barcarena-atingidos-por-mineradora-terao-acesso-a-resultados-de-exames-toxicologicos>. Acesso em: 14 out. 2021.

BARNES, M. C., ADDAI-MENSAH, J., GERSON, A. R. The kinetics of desilication of synthetic spent Bayer liquor seeded with cancrinite and cancrinite/sodalite mixed-phase crystals. **Journal of Crystal Growth**, v. 200, pp. 251-264, 1999.

BARRAND, P.; GADEAU, R. **Producion del Alumínio**. Biobao: URMO, 1967.

BENTES, E. dos S.; HOMMA, A. K. O; SANTOS, C. A.N. dos. **Exportações de Polpa de Açaí do Estado do Pará: situação atual e perspectivas**. In: 55º CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ECONOMIA, ADMINISTRAÇÃO E SOCIOLOGIA RURAL, Universidade Federal de Santa Maria, 30 jul.-03 ago., 2017.

BERRY, K.A; HARMER, M.P. Effect of MgO solute on microstructure development in Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 69 n. 2, p. 143–149, fev. 1986.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, dispendo sobre seus princípios, objetivos e instrumentos, bem como sobre as diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos. Casa Civil, **Diário Oficial da União**, Brasília, 02 ago. 2010.

BRINDLEY, G. W.; NAKAHIRA, M. A new concept of the transformation sequence of kaolinite to mullite. **Nature**, v. 181, p. 1333-1334, may. 1958. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/1811333a0>. Acesso em: 12 out. 2021.

BRUNORI, C.; CREMISINI, C.; MASSANISSO, P.; PINTO, V.; TORRICELLI, L. Reuse of a treated red mud bauxite waste: studies on environmental compatibility. **Journal of Hazardous Materials**, v. 117, n.1, p. 55-63, fev. 2005. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2004.09.010>. Acesso em: 12 out. 2021.

BUFALINO, L.; GUIMARÃES, A.A.; SILVA, B.M.S.E.; SOUZA, R.L.F.; MELO, I.C.N.A.; OLIVEIRA, D.N.P.S. *et. al.* Local variability of yield and physical properties of açai waste and improvement of its energetic attributes by separation of lignocellulosic fibers and seeds. **Journal Renewable and Sustainable Energy**, v. 10, n. 5, set. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1063/1.5027232>. Acesso em: 13 out. 2021.

CABRAL, E. M.; SÁ, R. J.; VIEIRA, R. K.; VASCONCELOS, R. P., Utilização de massas cerâmicas na produção de agregado sintético de argila calcinada para uso em concreto. **Cerâmica**, v. 54, n. 332, p. 404-410, dez. 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0366-69132008000400004>. Acesso em: 29 jun. 2021.

CALLISTER, W. D.; WILEY, J. **Materials science and engineering: an introduction**. 7th ed., New York. 2008.

CÂNDIDO, V. S. **Utilização de argilito e chamote de blocos de vedação na composição de massa de pavimento intertravado cerâmico – adoquim**. 2012. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais) – Faculdade de Engenharia de Materiais, Universidade Estadual do Norte Fluminense. Campos dos Goytacazes, 2012.

CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. Meio ambiente: CBA multada por poluir rios da região de Sorocaba. **Saopaulo.sp.gov.br**. Disponível em: <https://www.saopaulo.sp.gov.br/eventos/meio-ambiente-cba-e-multada-por-poluir-rios-da-regiao-de-sorocaba/>. Acesso em: 03 jul. 2021.

CHAN J.W.; HUSER T.R.; RISBUD S.H.; KROL D.M. Modification of the fused sílica glass network associated with waveguide fabrication using femtosecond laser pulses. **Appl Phys.** v. 76, p. 367– 372, mar. 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00339-002-1822-9>. Acesso em: 03 jul. 2021.

CHIANG, Y.; BIRNIE, D.; KINGERY, W.D. **Physical Ceramics: Principles for ceramic science and engineering**. New York: Jhon Wiley and Sons, 1997.

CHRISPIM, Z.M.P.; ALMEIDA, L.L.P.; ALVES, M.G.; RAMOS, I.S.; SILVA, A.L. Caracterização de solos residuais da região de Campos dos Goytacazes/ RJ para uso de engobes em cerâmica artística. In: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos materiais, 19., 2010, Campos do Jordão. **Anais**. Campos do Jordão. 2010. p. 311-318. Disponível em: <https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/Public/42/050/42050084.pdf>. Acesso em: 20 ago. 2021.

CHRISTOGEROU. A.; KAVAS, T. Synergy of boron containing solid Wastes and fructose for the production of lightweight aggregates: microstructure and properties. **Waste Biomass**, v.5, p. 1453–1461. 2016.

CONAB – Companhia nacional de abastecimento. **Análise mensal: açaí (fruto)**. 2019. Disponível em: [https://www.conab.gov.br/info-agro/analises-do-mercado-agropecuario-e-extrativista/analises-do-mercado/historico-mensal-de-acai/item/download/25312\\_2335ac0327e2c3b9ea5997c46bea0b09/](https://www.conab.gov.br/info-agro/analises-do-mercado-agropecuario-e-extrativista/analises-do-mercado/historico-mensal-de-acai/item/download/25312_2335ac0327e2c3b9ea5997c46bea0b09/). Acesso em: 13 novembro 2021.

CONSTANTINO, V. R. L; ARAKI, K; SILVA, D. O; OLIVEIRA, W. Preparação de compostos de alumínio a partir da bauxita: considerações sobre alguns aspectos envolvidos em um experimento didático. **Química Nova**. v. 25, n. 3, p. 490-498, 2002.

COSTA, L. S. **Utilização do caroço de açaí como leito filtrante no tratamento de água de abastecimento e residuária**. 2014. 112 f. Dissertação (mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Pará, Belém, 2014.

DAUVIN, Jean-Claude et al. Towards an impact assessment of bauxite red mud waste on the knowledge of the structure and functions of bathyal ecosystems: The example of the Cassiohigne Canyon (north- Western Mediterranean Sea). *Marine Pollution Bulletin*, **China**, v. 60, ed. 132, p. 197-206, 2010.

DE JESUS, I. M. *et al.* Avaliação dos impactos ambientais no rio Murucupi em decorrência do transbordo de efluentes de uma bacia de resíduos sólidos no município de Barcarena-Pará. In: CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE QUÍMICA, 2004. Fortaleza, Ceará, Brasil, **Anais**. Fortaleza, 2004.

DOMINGUES, A.F.N.; MATTIETTO, R.D.A.; OLIVEIRA, M.D.S.P. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento**: teor de Lipídeos em Carços de *Euterpe oleracea* Mart. 1ª ed. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2017. 17 p. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1062268/1/BOLETIMP D115Ainfo.pdf>. Acesso em: 07 dez. 2021.

EITEL, W. **The Physical Chemistry of the Silicates**. University of Chicago Press, 1954.

EVANS, K.; NORDHEIM, E.; TSESMELIS, K. Bauxite Residue Management. In: SUAREZ, C. E. **Light Metals 2012**: alumina and bauxite. Midvale, USA: Copyright ©, 2012. Red mud residue, parte II, p. 61-66. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/9781118359259.ch11>. Acesso: 04 ago. 2021.

FAHEY, M.; NEWSON, T. A.; FUJIYASU, Y. Engineering with tailings. In: **Environmental Geotechnics**. Rio de Janeiro: Balkema. v. 2, p. 947-973. 2002.

FARINAS C. S.; SANTOS R. R. M.; BERTUCCI NETO V.; PESSOA J. D. C. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento**: Aproveitamento do Carço do Açaí como Substrato para a Produção de Enzimas por Fermentação em Estado Sólido. 1ª ed. São Carlos, SP: Embrapa Instrumentação, 2009. 15 p. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CNPDIA-2010/12625/1/BPD30-2009.pdf>. Acesso em: 07 dez. 2021.

FERNANDEZ, B. Contamination of water resources by the bauxite/alumina operations in Jamaica. 2001. **Água Bolívia**. Disponível em: [http://www.aguabolivia.org/situacionaguaX/IIIEncAguas/contenido/trabajos\\_verde/R-111.htm](http://www.aguabolivia.org/situacionaguaX/IIIEncAguas/contenido/trabajos_verde/R-111.htm), Acesso em: 20 de julho de 2021.

FROTA, C.A.; SILVA, A.C.L. Estudo da viabilidade econômica para produção de agregado sinterizado de argila calcinada. **Cerâmica**, v. 59, n. 352, p. 509–517, jan. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0366-69132013000400004>. Acesso: 10 ago. 2021.

GERMAN, R.M. **Sintering Theory and Practice**. New York: Wiley, 1996. 568 p.

GÓIS, Cristiane Corradi; LIMA, Rosa Malena Fernandes; MELO, Antônio Cardoso. Sedimentação de resíduo Bayer utilizando floculantes hidroxamatos e poliacrilamida. **Escola de Minas**, Ouro Preto-MG, v. 56, n.2, p. 119-122, abr./jun. 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0370-44672003000200010>. Acesso em: 10 ago. 2021.

GREEN, A. T.; STEWART, G. H. **Ceramics**: a symposium. 1ª ed. Reino Unido: The British Ceramic Society, 1953. 877 p.

GOUGAZEH, M., BUHL, J.-Ch. Synthesis and characterization of zeolite A by hydrothermal transformation of natural Jordanian kaolin. **Journal of the Association of Arab Universities for Basic and Applied Science**, v. 15, pp. 35-42, 2014.

HILDEBRANDO, Edemarino Araujo. **Aplicação do Rejeito do Processo Bayer (Lama Vermelha) como Matéria-Prima na Indústria Cerâmica Estrutural**. 1998. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química.) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Pará, Belém, 1998.

HIND, R. A.; BHARGAVA, S. K.; GROCCOTT, S. C. The surface chemistry of Bayer process solids: a review. **Colloids and surfaces A: physicochemical and engineering aspects**, n. 146, p. 359-374, 1999.

HYDRO. **Depósito de resíduos sólidos**. 2021. Disponível em: <https://www.hydro.com/pt-BR/sobre-a-hydro/a-hydro-no-mundo/north-america/brasil/barcarena/alunorte/deposito-de-residuos-solidos/> . Acesso em: 07 jul. 2021.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. In: SIDRA – Sistema IBGE de recuperação automática. **Produção da extração vegetal e da Silvicultura**. 2021. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/pevs/quadros/brasil/2020>. Acesso em: 13 novembro 2021.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Levantamento Sistemático da Produção**. 2017.

IOM3 – **Institute of Materials, Minerals and Mining**. Disponível em: <http://www.iom3.org>. Acesso em: 06 jul. 2021.

ITAI, Y.; *et al.* Numerical and experimental evaluation of a downdraft gasifier for electric energy in the Amazon using açai seed (*Euterpe oleracea* Mart.) as fuel. **Renewable energy**. V. 66, p. 662 – 669. 2014.

KALIRAJAN, M. *et al.* Influence of glass waste on the microstructural evolution and crystallization kinetics of glass-ceramic glaze. **Ceramics International**, v. 42, n. 16, p. 18724-18731, dez. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.09.011>. Acesso em: 06 ago. 2021.

KIMMERLE F. M. **Introduction to Bayer Process** - In Course Bayer Process – Barcarena - Alunorte, 2004.

KINGERY, W. D.; BOWER, H. K.; UHLMANN, D. R. **Introduction to ceramics**. 2nd. New York: Wiley, 1976.

KLEIN, Cornelis; DUTROW, Barbara. **Manual de ciências dos minerais**. 23 ed. Porto Alegre: Bookman, 2012. 716 p.

KOCSERHA, I., Hamza, A., & Géber, R. The effects of red mud on clay compounds. IOP Conference Series: **Materials Science and Engineering**, 426(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/426/1/012026>, 2018.

LEMOUGNA, P. N. *et al.* Synthesis and characterization of low temperature (800 °C) ceramics from red mud geopolymer precursor. **Construction and Building Materials**, v. 131, p. 564 – 573, jan. 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061816318773>. Acesso em: 20 out. 2021.

LIMA, F. S. S. **Utilização da lama vermelha e do resíduo caulínico na produção de pigmento pozolânico para argamassas e concretos de cimento Portland**. 2006. 80 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Belém, 2006.

MACFIE, R.; CARNEIRO, J. R. **Noções Gerais Sobre o Processo Bayer**. Ouro Preto: ALCAN, 1993.

MAGALHÃES, Edilson Marques. **Estudo da Extração de Compostos de Ferro da Lama Vermelha Visando a Extração e/ou Recuperação de Compostos de Titânio**. 2012. 142 f. Tese (Doutorado) – Programa de pós-graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia, Universidade Federal do Pará, Instituto de tecnologia, Belém, 2012.

MCCONCHIE, D.; CLARK, M.; DAVIES-McCONCHIE, F. New strategies for the management of bauxite refinery residues (red mud). In: Proceedings of the 6th international alumina quality workshop, 1., 2002, Brisbane, Australia. **Anais**. Brisbane, Australia: Academia, 2002, p. 327-332. Disponível em: [https://scholar.google.com/citations?view\\_op=view\\_citation&hl=en&user=-dQuWncAAAAJ&alert\\_preview\\_top\\_rm=2&citation\\_for\\_view=-dQuWncAAAAJ:zYLM7Y9cAGgC](https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=en&user=-dQuWncAAAAJ&alert_preview_top_rm=2&citation_for_view=-dQuWncAAAAJ:zYLM7Y9cAGgC). Acesso em: 18 ago. 2021.

MISRA, C. **Solubility of aluminium trihydroxide in sodium hydroxide solution**. Chemistry and Industry, 9th May 1970, p. 619–628.

MMA – Ministério do Meio Ambiente – disponível em: <<https://www.gov.br/mma/pt-br>> Acesso em: 16 de maio de 2022.

MOORE, D.M; REYNOLDS JUNIOR, R.C. **X-ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals**. New York: Oxford University Press. 1989. 332p.

MORAVIA, W.G. *et al.* Caracterização microestrutural da argila expandida para aplicação como agregado em concreto estrutural leve. **Cerâmica**, v. 52, n. 322, p.193–199, ago. 2006.

MORO, P.; PANDOLFO, A.; MORO, L.; Barbacovi, N. E.; TAGLIARI, L. D.; Diagnóstico ambiental de indústrias de fabricação de estruturas metálicas e esquadrias de metal de pequeno e médio porte. **Gestão e Produção**, São Carlos, v. 22, n. 1, p. 229-237, 2016.

MÖRTEL, H.; BOUBACAR, C. Analyse von hochreinen tonerden und der einfluss von verunreinigungen auf das sinterverhalten. **Deutschen Keramischen Gesellschaft**, v. 54. n. 8, p. 264-267. 1977.

MÖRTEL, H.; HEIMSTADT, K. Ceramics, Werkstoffe und Korrosion-Materials and Corrosion. **Ceramics**, v. 45, p. 128-136, 1994.

NORTON, F. H. **Introdução a tecnologia cerâmica**. 1º ed. São Paulo: Edgar Blucher, 1973.

NUNN, R. F. **Advances in red mud dewatering and disposal technologies**. Light Metals, p.107 – 113, 1998.

OEL, H. J. Sintering of crystalline ceramics, Fortschritte der Mineralogie. v. 63, **Supplement 1**, p. 167-167. 1985.

OKADA, Kiyoshi. Activation energy of mullitization from various starting materials. **Journal of the European Ceramic Society**. v. 28, p. 377-382, 2008.

OLIVEIRA, J.A.R.; KOMESU U.; MACIEL F.R. Hydrothermal Pretreatment for Enhancing Enzymatic Hydrolysis of Seeds of Açaí (*Euterpe oleracea*) and Sugar Recovery. **Chemical Engineering Transactions**. v. 37, p. 787 – 792, jan. 2014.

PAZ, S. P. A., ANGÉLICA, R. S., SCHELLER, T. **X-ray diffraction (XRD) studies of kaolinites to support mineralogical quantification of high silica bauxites from the Brazilian Amazon region**. In: ICSOBA, BX 16-T, 7 pp., Belém, 2012.

PEÇANHA JUNIOR, Luiz Antônio Fonseca. **Reformulação de massa cerâmica para telhas do município de Campos dos Goytacazes**. 2006. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Campos dos Goytacazes, Universidade Estadual Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Rio de Janeiro, 2006.

PEVS. Produção da extração vegetal e da silvicultura 2019. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**, Rio de Janeiro, v. 34, p. 1-8, 2019. Disponível em: <[https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/74/pevs\\_2019\\_v34\\_informativo.pdf](https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/74/pevs_2019_v34_informativo.pdf)>. Acesso em: 13 outubro 2021.

PRADHAN, J.; DAS, SN.; DAS, J.; RAO, S. B.; THAKUR, R.S., Characterization of Indian red muds and recovery of their metal values. In: Anglesey Aluminium Metal Ltd. HALE, W. **Light Metals**. North Wales (Reino Unido), 1996. p. 87-92.

PRADO, U. S.; MARTINELLI, J. R.; SENE, F. F.; BRESSIANI, J. C. Obtenção de vidros e vitrocerâmicas utilizando lama vermelha gerada na produção do alumínio. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 50., 2006, Blumenau – SC. **Anais**. 2006. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/332079406\\_Obtencao\\_de\\_vidros\\_e\\_vitroceramicas\\_utilizando\\_lama\\_vermelha\\_gerada\\_na\\_producao\\_do\\_aluminio](https://www.researchgate.net/publication/332079406_Obtencao_de_vidros_e_vitroceramicas_utilizando_lama_vermelha_gerada_na_producao_do_aluminio). Acesso em 15 out. 2021.

QUARESMA, D. S. et al. Produção de Agregados Sintéticos a Partir do Rejeito do Processo Bayer e da Cinza de Caldeira. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 57., 2013, Natal, RN. **Anais**. Natal: Cerâmica, 2013. p. 3329-3338. Disponível em: [https://abceram.org.br/wp-content/uploads/area\\_associado/57/PDF/13-036.pdf](https://abceram.org.br/wp-content/uploads/area_associado/57/PDF/13-036.pdf). Acesso em 02 dez. 2021.

QUARESMA, D. S.; NEVES, A. S. S.; MELO, A. O.; PEREIRA, L. F. S.; BEZERRA, P. T. S.; MACÊDO, E. N.; SOUZA, J. A. S.; Estudo da sinterização em reator vertical de leito fixo para produção de agregado sintético. **Cerâmica**, v. 63, p.169-177, 2017.

RACANELLI, L. A. *et al.* Caracterização de dois tipos de argilas do município de São Miguel do Guamá utilizados para a fabricação de telhas e blocos de vedação. **Brazilian Journal of Developmet**, Curitiba, v. 5, n. 5 p. 3803-3812, maio. 2019.

REESE, K. M. e CUNDIFF, W. H. Bauxite to alumina. **Industrial and engineering chemistry**, v. 47, n. 1672, p. 2066-2070. 1955.

REIS, André Wilson da Cruz. **Caracterização mineralógica do agregado obtido a partir da lama vermelha do processo Bayer**. 2014. 80 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal do Pará, 2014.

Relevant to clay mineralogy: Report of the Association Internationale pour l'Etude des Argiles (AIPEA) Nomenclature Committee for 2006. **Clays and Clay Minerals**, v. 54, p. 761-772. 2006.

RIBEIRO, D.V; MORELLI, M. R. Estudo da viabilidade da utilização do resíduo de bauxita como adição ao cimento Portland. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 2008, Pernambuco. **Anais**. Pernambuco: CBECIMAT, 2008.

ROSDON, J. R. Soda cáustica vaza e atinge rio em SP. **Folha de São Paulo**. <http://www.folha.com.br/noticia>”, Acessado em: 20 de julho de 2021.

ROSÁRIO, K. A. **Concreto com utilização de agregado graúdo sintético produzido a partir da lama vermelha: estudos de dosagem, propriedades e microestrutura**. Dissertação de Mestrado (Mestre) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, UFPA, Belém, 2013.

ROSSIGNOLO, J.A. **Concreto Leve Estrutural**. 1ª Ed. São Paulo: Pini, 2011.

ROSSIGNOLO, J.A. *et al.* Properties of High-Performance LWAC for Precast Structures With Brazilian Lightweight Aggregates. **Cement & Concrete Composites**, v. 25, n. 1, p. 77-82, 2003.

SALOPEK, S., STRAZISAR, J. The Influence of red mud impoundments on the environment. **Light Metals**, p. 41-44, 1993.

SANTIS, B. C., ROSSIGNOLO, J.A. Caracterização de massas cerâmicas do estado de São Paulo para produção de agregados leves para concreto. **Cerâmica**, v.59, n. 350, p. 198-205, set. 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0366-69132013000200002>. Acesso em: 13 set. 2021.

SANTOS, D. H.; DALMEIDA, A. P.; FIGUEIREDO, W. B.; VALENTE, A. L.; SOUZA, J. A. S. Utilização do rejeito do processo Bayer como matéria-prima na produção de agregados leves. **Blu. Chem. Eng. Proc.** v. 1, n. 2 p. 13336-13343, 2014.

SANTOS, Diego Hildebrando dos. **Influência da Sílica e Temperatura nas Propriedades Físicas dos Agregados Sintéticos Produzidos com Resíduos do Processo Bayer**. 2019. 95 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2019.

SCHNEIDER, H; OKADA, K.; PAK, J.A. Mullite Synthesis. In: MULLITE AND MULLITE CERAMICS. **Materials Science**. 1994.

SCHULLER, K. H. **Ceramics Monographs: A Handbook of Ceramics**. Freiburg: Verlag Schmidt GmbH. Brg. 1979.

SHACKELFORD, J. F.; DOREMUS, R. H. **Ceramic and glass materials: structure, properties and processing**. New York, USA: Springer, 2008. 209 p.

SMITH, P. **The processing of high silica bauxites – Review of existing and potential processes**. Hy-drometallurgy, v. 98, pp. 162-176, 2009.

SILVA FILHO, F.E.B; ALVES, M.C.M; MOTA, D.M. Lama vermelha da indústria de beneficiamento de alumina: produção, características, disposição e aplicações alternativas. **Revista Matéria**. v. 12, n.3, p. 330- 336. 2007.

SILVA, I. T., ALMEIDA, A. C., MONTEIRO, J. H. A. et al. Uso do caroço de açaí como possibilidade de desenvolvimento sustentável do meio rural, da agricultura familiar e de eletrificação rural no Estado do Pará. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 5., 2004, Campinas. **Proceedings online**. Disponível em: [http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=MSC000000022004000200063&lng=en&nrm=abn](http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC000000022004000200063&lng=en&nrm=abn). Acesso em: 07 dez. 2021.

SONG, X., LIU, X., ZHAN G, J. Neck formation and self-adjusting mechanism of neck growth of conducting powders in spark plasma sintering. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 89, n. 2, p. 494–500, fev. 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2005.00777.x>. Acesso em: 22 dez. 2021.

SONG, C., ZHANG, H., DONG, Y., PEI, L., LIU, H., JIANG, J., & XU, H. Investigation on the fabrication of lightweight aggregate with acid-leaching tailings of vanadium-bearing stone coal minerals and red mud. **Chinese Journal of Chemical Engineering**. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2020.09.020>, 2021.

SOUZA, José Antônio da Silva. **Estudo e avaliação do uso de resíduos do processo bayer como matéria-prima na produção de agregados sintéticos para a construção civil**. 2010. 148 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia) – Programa de pós-graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2010. Disponível em: <http://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/4050>. Acesso em: 6 jun. 2021.

SOUZA, J. A. S.; MACÊDO E. N.; QUARESMA, J. N. N. **Reciclagem de Lama Vermelha como Matéria-prima para a Indústria de Cerâmica Vermelha**. In: RELATÓRIO TÉCNICO, CONVÊNIO UFPA/ALUNORTE. 2006.

SOUZA, Pedro Henrique Rodrigues de. *et al.* Utilização da lama vermelha para produção de agregado sintético. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**. v. 06, n.3 p. 30-43, mar. 2019.

SOUZA, R. S. Chromium (VI) adsorption by granular activated carbon from diluted solutions using a batch system under controlled pH. **Acta Amazonica**, v. 39, n. 3 p. 661-668, nov. 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0044-59672009000300022>. Acesso em: 28 jul. 2021.

TSAKIRIDIS, P. E.; AGATZINI-LEONARDOU, S.; OUSTAKADIS, P. Red mud addition in the raw meal for the production of portland cement clinker. **Journal of Hazardous Materials**. v. 116, n. 1 p. 103-110, dez. 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2004.08.002>. Acesso em: 28 jul. 2021.

VENÂNCIO, Luiz Carlos Alves. **Desenvolvimento de unidade piloto de transferência de massa gás/líquido: redução da reatividade do resíduo da indústria de alumina através da reação com gases de combustão**. 2013. 141 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia) – Programa de pós-graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, UFPA, Belém, 2013. Disponível em: <http://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/8248>. Acesso em: 11 ago. 2021.

VICK, S. G. **Planning, Design and Analysis of Tailings Dams**. United States of America: BiTech Publishers Ltd, 1990.

VIEGAS, Bruno Marques et al. A influência da temperatura nas transformações de fases dos minerais presentes na lama vermelha: redução da hematita à magnetita. **Revista matéria**, v. 25, n. 01, 2020. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rmat/a/ymVZtFPh6FKXjqpHBrshjwy/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 20 out. 2021.

VIRMOND, E.; DE SENA, R.F.; ALBRECHT, W.; ALTHOFF, C.A.; MOREIRA, R.F.P.M.; JOSÉ, H.J. Caracterização de resíduos sólidos agroindustriais como biocombustíveis e potencial aplicação em processos termoquímicos. **Waste Management**. v. 32, n. 10, p. 1952 - 1961, 2012.

WANG, S.; GAINEY, L.; MARINELLI, J.; DEER, B.; WANG X.; MACKINNON, D.R.I.; Xi, Y. Effects of vermiculite on in-situ thermal behaviour, microstructure, physical and mechanical properties of fired clay bricks. **Construction and Building Materials**, v. 316, n. 125828, jan. 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061821035613>. Acesso em 16 dez. 2021.

WAO – World Aluminium Organization. Disponível em: <http://www.world-aluminium.org>. Acesso em: 06 jul. 2021.

YALÇIN, N.; SEVINÇ, V. Utilization of bauxite waste in ceramic glazes. **Ceramics International**. v. 26, n. 5, p. 485-493, jun. 2000. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0272-8842\(99\)00083-8](https://doi.org/10.1016/S0272-8842(99)00083-8). Acesso em: 20 out. 2021.

YANG, J.; XIAO, B. Development of unsintered construction materials from red mud wastes produced in the sintering alumina process. **Construction and Building Materials**. v. 22, n. 12, dez. 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.10.005>. Acesso em: 17 out. 2021.

YAN, M.F. Solid state sintering. In: **Ceramics and Glasses**: Engineered Materials Handbook. 4. ASM International, Materials Park, OH, 1991, p. 270–284.

YU-LING, W.; SHAO-HSIAN, C.; GUAN-WEI, K. Effect of waste glass addition on lightweight aggregates prepared from F-class coal fly ash. **Construction and Building Materials**, v.112, p. 773–782, jun. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.147>. Acesso em: 15 nov. 2021.