



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

RODOLFO AUGUSTO DO ROSÁRIO LIRA

**PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE AGREGADOS SINTÉTICOS UTILIZANDO
RESÍDUOS DO PROCESSO BAYER**

**ANANINDEUA-PA
2021**

RODOLFO AUGUSTO DO ROSÁRIO LIRA

**PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE AGREGADOS SINTÉTICOS UTILIZANDO
RESÍDUOS DO PROCESSO BAYER**

Trabalho de Conclusão de Curso - TCC apresentado à Banca Examinadora do Curso de Engenharia de Materiais, da Faculdade de Engenharia de Materiais – Campus Ananindeua da Universidade Federal do Pará, 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

ANANINDEUA-PA
2021

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)

L768p LIRA, RODOLFO AUGUSTO DO ROSÁRIO.
PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE AGREGADOS
SINTÉTICOS UTILIZANDO RESÍDUOS DO PROCESSO
BAYER / RODOLFO AUGUSTO DO ROSÁRIO LIRA. —
2021.
59 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Edinaldo José de Sousa Cunha
Coorientador(a): Prof. Me. Mailson Batista de Vilhena
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) -
Universidade Federal do Pará, Campus Universitário de
Ananindeua, Curso de Engenharia de Materiais,
Ananindeua, 2021.

1. Resíduo de Bauxita. 2. Agregado Sintético. 3.
Resíduos da Mineração. I. Título.

CDD 620.11

RODOLFO AUGUSTO DO ROSÁRIO LIRA

**PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE AGREGADOS SINTÉTICOS UTILIZANDO
RESÍDUOS DO PROCESSO BAYER**

Trabalho de Conclusão de Curso - TCC apresentado à Banca Examinadora do Curso de Engenharia de Materiais, da Faculdade de Engenharia de Materiais – Campus Ananindeua da Universidade Federal do Pará, como requisito para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

APROVADA EM: ___/___/___

Conceito: _____

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Edinaldo José de Sousa Cunha
Orientador- Femat- UFPA.

Prof. Dr. Edemarino Araújo Hildebrando
Examinador Interno- UFPA

Prof. Dr. Deibson Silva da Costa
Examinador Interno- UFPA

ANANINDEUA-PA
2021

Este trabalho de conclusão de curso eu dedico inteiramente ao meu pai José Lira (*in memoria*), que infelizmente não poderá participar deste momento tão especial e alegre. Ao senhor, meu muito obrigado por compartilhar momentos tão intensos e tantas alegrias, agradeço por todos os sacrifícios que fez para eu ter acesso a uma educação de qualidade, uma vida confortável, por ensinar que para se conquistar algo é necessário sair da zona de conforto, e por vezes se arriscar. Ao senhor, todo o meu carinho, admiração, meu amor, minha saudade diária e meu respeito

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço ao meu pai, José Lira (*in memoria*), que infelizmente não poderá participar deste momento tão especial e alegre, mas, que sem dúvidas, se pudesse se fazer presente estaria muito orgulhoso por essa vitória que em muitos aspectos só foi possível em parte por seu intermédio, ao senhor, meu muito obrigado.

A minha mãe Odiléia Lira, por todo o carinho e amor, lhe sou grato por sempre me incentivar e apoiar meus sonhos. A minha afilhada Lunna Sophia, por trazer leveza, diversão e ternura a minha vida.

A minha namorada Luani Lobo, pelo companheirismo, paciência, ensinamentos e todos os momentos que passamos juntos, muito obrigado.

As minhas tias Maria José e Alzira, por mudarem minha trajetória, oportunizando estudos em escolas de qualidade, incentivando apesar das dificuldades, entre tantas outras oportunidades, a vocês, minha grandiosa admiração, respeito e gratidão.

Aos amigos de laboratório Rodrigo Marinho e Carlos Eduardo, e os amigos da turma de 2015: Rafaela, Avener, Kate, Thiago (o mitigado), obrigado pelos momentos de descontração e risadas.

Ao meu orientador Edinaldo Cunha, minha eterna gratidão, admiração e respeito. Também agradeço a Maílson Batista, pela amizade e toda ajuda que foi de fundamental importância na elaboração deste trabalho.

Ao professor José Antônio, pela confiança depositada, minha admiração e respeito. Agradeço aos professores da faculdade de engenharia de materiais pelo empenho e dedicação, em especial, o professor Edemarino Araújo, docente que carrego como exemplo de profissional dedicado, enquanto pessoa metódica, atenciosa e exigente em busca da excelência ao repassar conhecimento, meu muito obrigado.

E por fim, a todos que de alguma forma contribuíram para fazer este momento acontecer, a vocês, meu muito obrigado

RESUMO

Os resíduos sólidos gerados pela indústria de mineração e metalurgia vêm atraindo interesse de outras indústrias, em especial, a indústria cerâmica que consome uma grande parcela destes materiais. O resíduo da bauxita por exemplo pode gerar materiais com características mecânicas interessantes principalmente para aplicações no setor da construção civil. Algumas pesquisas apontam que seu uso como constituinte na produção de agregados sintéticos pode ser uma saída para redução da grande quantidade de resíduos que são geradas pelas mineradoras. Partindo desse pressuposto e visando atenuar a utilização de recursos naturais como areia, brita e seixo que são utilizados em larga escala, o objetivo deste trabalho foi desenvolver agregados sintéticos leves utilizando resíduos da bauxita, areia e argila. A produção e composição foram baseadas em trabalhos anteriores com diferença na quantidade de argila (25%) afim de se analisar possíveis diferenças nas propriedades físicas em relação as demais pesquisas nas quais foram utilizadas entre 5 e 10% de argila na composição do agregado. Os materiais de partida (resíduos do processo Bayer, a areia e a argila) foram processados em tambor rotativo para formação de pelotas e sinterizados em fornos elétricos em temperaturas de 1200 e 1250°C com patamares de 3 horas. Os agregados foram caracterizados para se determinar propriedades físicas, morfológicas e química. Nas análises físicas os agregados obtiveram massas específicas aparentes de 2,15 g/cm³ e 1,88 g/cm³ para as temperaturas de 1200 e 1250°C, respectivamente. Nos resultados de difração de raios X foram identificadas fases majoritárias como Quartzo, Mulita e Hematita. Nos resultados de microscopia eletrônica de varredura foi possível identificar a presença da fase mulita secundária que apresenta uma estrutura que lembram agulhas. A presença desta fase é muito importante para estes materiais, conferindo boas propriedades mecânicas ao mesmo. Portanto o uso dos resíduos da bauxita na produção de agregados sintéticos pode trazer grandes benefícios tanto para indústria geradora quanto para indústria cerâmica e principalmente para o meio ambiente.

Palavras chave: Resíduo de Bauxita; Agregado Sintético; Resíduos da Mineração.

ABSTRACT

Solid waste generated by the mining and metallurgy industry has been attracting interest from other industries, especially the ceramic industry, which consumes a large portion of these materials. Bauxite residue, for example, can generate materials with interesting mechanical characteristics, especially for applications in the civil construction sector. Some researches indicate that its use as a constituent in the production of synthetic aggregates can be a way to reduce the large amount of waste that is generated by mining companies. Based on this assumption and aiming to attenuate the use of natural resources such as sand, gravel and pebbles that are used on a large scale, the objective of this work was to develop light synthetic aggregates using bauxite, sand and clay residues. The production and composition were based on previous works with difference in the amount of clay (25%) in order to analyze possible differences in physical properties in relation to other researches in which between 5 and 10% of clay were used in the composition of the aggregate. The starting materials (waste from the Bayer process, sand and clay) were processed in a rotating drum to form pellets and sintered in electric ovens at temperatures of 1200 and 1250°C with 3-hour hold. Aggregates were characterized to determine physical, morphological and chemical properties. In the physical analysis, the aggregates had apparent specific masses of 2.15 g/cm³ and 1.88 g/cm³ for temperatures of 1200 and 1250°C, respectively. In the X-ray diffraction results, major phases such as Quartz, Mullite and Hematite were identified. In the results of scanning electron microscopy, it was possible to identify the presence of the secondary mullite phase, which presents a structure that resembles needles. The presence of this phase is very important for these materials, giving it good mechanical properties. Therefore, the use of bauxite residues in the production of synthetic aggregates can bring great benefits for both the generating industry and the ceramic industry, and especially for the environment.

Key-words: Bauxite Waste; Synthetic Aggregate; Mining Waste.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Processo Bayer durante os anos.....	22
Figura 2 – Equipamentos Utilizados no Processo de Moagem da Bauxita.....	23
Figura 3 – Digestores.....	24
Figura 4 – Decantadores.....	24
Figura 5 – Precipitadores.....	25
Figura 6 – Calcinadores.....	26
Figura 7 – Depósito de Resíduos Sólidos – DRS da empresa Hydro.....	29
Figura 8 – Esquema de lagoa de deposição de resíduos.....	30
Figura 9 – Reações de Vitrificações em Materiais Cerâmicos.....	38
Figura 10 – Matérias-primas beneficiadas: A) Sílica; B) Resíduo da bauxita; C) Argila.....	41
Figura 11 – Fluxograma do processo de produção dos agregados sintéticos.....	42
Figura 12 – Agregados em processo de pelotização.....	43
Figura 13 – Agregados antes do processo de sinterização e após.....	44
Figura 14 – Aparato utilizado para a medição das massas imersas.....	46
Figura 15 – Preparação das amostras para serem analisadas no MEV.....	47
Figura 16 – Difração de Raio-X dos agregados.....	50
Figura 17 – Amostra sinterizada a 1200°C.....	52
Figura 18 – Amostra sinterizada a 1250°C.....	52

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Gráfico acerca da Evolução dos valores de produção da alumina, alumínio e lama vermelha no período de 2010 a 2015.....	27
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química da lama vermelha de vários locais de extração com % em peso.....	31
Tabela 2 – Composição química do resíduo da bauxita.....	48
Tabela 3 – Composição química da argila.....	49
Tabela 4 – Propriedades cerâmicas dos agregados sintéticos.....	50

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A.A	Absorção de Água
ABCERAM	Associação Brasileira de Cerâmica
ABAL	Associação Brasileira do Alumínio
DRS	Depósito de Resíduos Sólidos
DRX	Difração de Raios- X
EPA	Environmental Protection Agency
FRX	Fluorescência de Raios- X
IFPA	Instituto Federal do Pará
LV	Lama Vermelha
Mi	Massa Imersa
MEA	Massa Específica Aparente
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
Ms	Massa Seca
Mu	Massa Úmida
P.A	Porosidade Aparente
PA	Pará
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
UFPA	Universidade Federal do Pará

LISTA DE SÍMBOLOS

ρ Massa Especifica

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Objetivos	17
1.1.1	Objetivo Geral	17
1.1.2	Objetivos Específicos	17
1.2	Justificativa	18
1.3	Estrutura do Trabalho	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1	Argilas	20
2.2	Processo Bayer	21
2.3	Lama Vermelha	26
2.3.1	Deposição e estocagem	28
2.3.2	Composição química da lama vermelha	30
2.4	Agregados para concreto	32
2.4.1	Classificação dos agregados	33
2.4.2	Agregados sintéticos	34
2.5	Sílica	35
2.5.1	Reações de Sinterização	36
2.5.2	Reações de Vitrificações	37
2.6	Mulita	38
2.7	Trabalhos Realizados Com Resíduo Da Bauxita No Pará	39
3	MATERIAIS E MÉTODOS	41
3.1	Materiais	41
3.2	Beneficiamento das matérias primas	41
3.3	Produção dos Agregados Sintéticos	43
3.4	Processo de sinterização dos agregados	44

3.5	Processo de caracterização dos agregados sintéticos e matérias	44
3.5.1	Fluorescência de Raios- x	44
3.5.2	Difração de Raios- x	45
3.5.3	Determinação de propriedades cerâmicas	45
3.5.4	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	46
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
4.1	Caracterização das Matérias - Primas	47
4.1.1	Composição química do resíduo da bauxita	47
4.1.2	Composição química da Argila	48
4.2	Caracterização dos agregados sintéticos	49
4.2.1	Difração de Raios-X (DRX)	49
4.2.2	Propriedades cerâmicas dos agregados sintéticos	50
4.2.3	Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	51
5	CONCLUSÃO	53
5.1	Proposta para trabalhos futuros	53
	REFERÊNCIAS	54

1 INTRODUÇÃO

A Revolução Industrial ocorrida no século XVIII, compreende um salto gigantesco no desenvolvimento tecnológico iniciado na Inglaterra, que posteriormente se expandiu para outras cidades ao redor do mundo. Este avanço tecnológico, foi acompanhado de mudanças na ordem política, social, econômica, e sobretudo ambiental, ocasionando entre múltiplos viés no aumento significativo de detritos e resíduos em cidades com atividades industriais pulsantes (BUNERTT, 2018).

Trazendo para a atualidade, com a inovação tecnológica do século XXI, reestruturação dos postos de trabalho, e conseqüentemente extração de riquezas para o mercado nos mais diversificados ramos da indústria, acarretaram-se montantes exorbitantes de subprodutos, que em muitas ocasiões prejudicam o meio ambiente. Por essa razão, existe uma aflição colossal em progredir os estudos na reciclagem e reaproveitamento destes detritos e rejeitos oriundos das atividades industriais a fim de amenizar os impactos ocasionados cotidianamente por estas indústrias de extração sobretudo de minérios (SOUZA, 2010).

Segundo a Política Nacional de Resíduos Sólidos - PNRS, reciclagem é o processo em que haverá transformações dos resíduos sólidos que não seriam aproveitados, com mudança em seu estado físico, físico-químico ou biológico, de modo a atribuir características ao resíduo para que se torne novamente matéria-prima ou produto. O principal benefício da reciclagem é a proteção dos recursos naturais, considerando que ao diminuir a exploração dos mesmos, se expande sua vida útil e mitiga a destruição da fauna e flora, conceituação esta que pode ser aplicada quando articulamos sobre o aproveitamento de resíduos provenientes da cadeia de produção do alumínio (SANTOS, 2019; ROSÁRIO, 2013).

No que cerne a mineração o Estado do Pará destaca-se, considerando que um dos principais viés econômicos se pauta na produção mineral. O qual, dentre as diversas indústrias localizadas em solo paraense, nomeiam-se as de beneficiamento e produção mineral, devido a grandiosidade e dimensão de produção que conseqüentemente geram uma enorme quantidade de resíduos como por exemplo, o resíduo do processo Bayer, conhecido popularmente como lama vermelha, que armazenado de forma errônea pode causar transtornos

ambientais colossais, fora os prejuízos sociais e econômicos para as populações que vivem nas adjacências da empresa mineradora (ROSÁRIO, 2013).

O resíduo da bauxita é um componente sólido produzido no processo de extração de alumina dos minérios de bauxita, apresenta coloração avermelhada em decorrência da presença predominante de óxidos de ferro, a produção anual de lama vermelha em todo o planeta foi estimada em mais de 70 milhões de toneladas. Após três séculos do início do processo Bayer, as áreas de disposição de resíduos da bauxita em todo o mundo contém aproximadamente cerca de 2,7 bilhões de toneladas em todo o mundo, o que representa transtornos ambientais e econômicos (LEMOUGNA, 2017).

Desta forma, a utilização do resíduo da bauxita dentro do contexto das indústrias cerâmicas tem como objetivos atenuar os impactos ambientais devido a retirada excessiva dos recursos naturais, conferindo valor comercial ao resíduo, assim a produção de agregados sintéticos, mediante a utilização do resíduo da bauxita possibilita uma alternativa correta e ecologicamente viável para a aplicação dos agregados sintéticos em obras de edificações substituindo os agregados naturais e conseqüentemente postergando a sua vida útil na natureza (SOUZA, 2010; ROSARIO, 2013; SANTOS, 2019).

E partindo destes pressupostos, o presente trabalho apresenta profunda relevância pois se dispõe a avaliar a produção e caracterização dos agregados sintéticos produzidos a partir da combinação dos resíduos da bauxita, sílica e argila, analisando as propriedades cerâmicas dos agregados sintéticos sinterizados a 1200°C e 1250°C. E para tanto, no decorrer do estudo expõe acerca das principais conceituações que envolvem as categorias concernentes a Argila; Lama Vermelha; Sílica e etapas referentes ao Processo Bayer; assim como os agregados e suas classificações, para além das reações de sinterização importantes que modificam a microestrutura dos agregados e suas propriedades, as quais puderam ser evidenciados através de análises laboratoriais.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Produzir e caracterizar agregados sintéticos reaproveitando o resíduo da bauxita

1.1.2 Objetivos Específicos

- Avaliar Influência da Temperatura nas Massas Específicas dos Agregados;
- Desenvolver agregados sintéticos com massas específica abaixo de 2 g/cm^3 ;
- Analisar a microestrutura dos agregados sintéticos utilizando microscópio eletrônico de varredura, no propósito evidenciar a presença de mulita secundária;

1.2 Justificativa

O Estado do Pará dispõe de abundantes fontes de recursos naturais em seu vasto território, e por conta disto, indústrias dos mais diferentes ramos de atuação são atraídas para a região dentre elas as indústrias de beneficiamento e produção de alumina, considerando que para cada 1 tonelada da produção de alumina, há no mínimo a geração de pelo menos 1,5 toneladas de resíduo de bauxita (lama vermelha) o que conseqüentemente acarretará em prejuízos ambientais, sociais e econômicos caso este seja depositado ou descartado de forma inadequada.

A lama vermelha constitui-se em componentes minerais insolúveis originários da digestão da bauxita pelas as soluções de hidróxido de sódio, na produção de alumina pelo processo Bayer (HILDEBRANDO, 1998). Especula-se que em todo o mundo os depósitos de resíduos da bauxita tenham 2,7 bilhões de toneladas armazenadas até o momento, o que pode ocasionar em transtornos ambientais, econômicos, sociais e sanitários para comunidades residentes nos arredores. (LEMOUGNA, 2017; LIU, 2015).

A vasta extensão de terras empregadas para o armazenamento do resíduo da bauxita, aumenta consideravelmente custos econômicos, ao passo que intensifica o risco de poluição ambiental, contaminação do ar, rios e lençol freático das comunidades onde a refinaria de alumina ocorre (DAUVIN, 2010).

Logo, o presente estudo apresenta profunda relevância para sociedade civil e acadêmica pois objetiva contribuir com o reaproveitamento do resíduo da bauxita para a produção de agregados sintético, com intuito de possibilitar nova destinação de uso destes materiais atenuando ecologicamente os impactos ambientais causados com a disposição errônea deste resíduo, para além da redução de retirada das matérias primas naturais como a brita e o seixo prolongando a sua vida útil.

1.3 Estrutura do trabalho

O presente Trabalho de Conclusão de Curso elege enquanto locus de pesquisa a produção e caracterização dos agregados sintéticos produzidos a partir da combinação dos resíduos da bauxita, sílica e argila, expondo enquanto recorte de estudos os Resíduos do Processo Bayer, em especial a Lama Vermelha, subdividindo-se em 5 partes no decorrer de seu desenvolvimento que podem ser definidos da seguinte forma:

Na seção 1 abordaremos a introdução, objetivos da pesquisa, e breve justificativa e estrutura do desenvolvimento do trabalho visando contextualizar a relevância do estudo e o potencial do reaproveitamento do resíduo do processo Bayer para a produção de agregados sintéticos.

Na seção de número 2, discorreremos acerca da revisão bibliográfica elencando as principais conceituações sobre Argilas, Processo Bayer, Agregados com ênfase em agregados sintéticos, Sílica e as reações de sinterização e na fase mulita.

A seção 3, onde versaremos da metodologia utilizada para o desenvolvimento do presente estudo, descrevendo os materiais e os processos experimentais tais como: Beneficiamento das matérias-primas, caracterizações morfológicas e físicas dos agregados sintéticos produzidos.

A seção 4, abordando acerca dos resultados obtidos através da metodologia aplicada, para além da realização de análises pertinentes sobre o objeto estudado e discursões sobre os resultados encontrados.

E por fim, a seção 5 onde traremos as conclusões obtidas durante a realização da pesquisa, para além de sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Argilas

De acordo com a Associação Brasileira de Cerâmica – ABCERAM (2021), a argila pode ser caracterizada como um material heterogêneo natural de textura terrosa, possuindo granulometria extremamente fina, composta principalmente de argilominerais, oferecendo possibilidades de conter outros minerais que não são argilominerais tais como quartzo, mica, pirita, hematita, entre outros, para além de matéria orgânica e outras impurezas, considerando que suas características derivam não somente dos locais onde são extraídos, mas, também de sua formação geológica (SANTOS, 1989; SILVA, 2019).

De acordo com Farias (2015), as argilas são utilizadas na indústria cerâmica em elevadas quantidades, tornando-se a principal matéria-prima para a confecção de produtos de origem cerâmica que são aplicados nos mais variados produtos. E partindo destas premissas, as argilas são matérias-primas para a produção de uma elevada e diversificada gama de produtos como tijolos, telhas, blocos, ladrilhos, elementos vazados e outros (RACANELLI, 2020), elementos estes cuja diversas aplicações derivam de particularidades das argilas tais como a presença de plasticidade quando umedecidas, para além de resistência mecânica após processos de queima (RACANELLI, 2020; SILVA, 2019).

Sendo por sua vez a argila subdividida em duas categorias, a primeira trata-se de silicatos cristalinos com estrutura em camadas lamelar, cuja estrutura se apresenta com maior número de argilominerais dividindo-se em dois grupos que são: as camadas 1:1 ou disfórmicos; e as camadas 2:1 ou trifórmicos. Seguido da segunda categoria denominada de silicatos cristalinos com estrutura fibrosa, categoria esta que por sua vez oferece duas representantes da classe dos argilominerais que são a Sepiolita e a paligorskita (SANTOS, 1989).

Logo, as argilas são formadas em termos físico-químicos, essencialmente por argilominerais que na presença de água adquirem propriedades como a plasticidade, tixotropia e viscosidade de suspensões aquosas. Ademais, os argilominerais são formados por silicatos hidratados de alumínio e ferro, contendo

ainda em sua composição certas proporções de elementos alcalinos e alcalinos-terrosos (CÂNDIDO, 2012; SANTOS, 1989; SILVA, 2019).

2.2 Processo Bayer

Existem aproximadamente 250 tipos de minérios contendo alumínio tais como as argilas caulínicas, alunita, nefelita, entre outros. No entanto, o mineral que mais se destaca na atualidade no que se refere a extração é a bauxita, e partindo disso, para a produção do alumínio elegem-se dois processos distintos de obtenção no processamento da bauxita, que é o processo de Le Chatelier¹ elaborado pelo químico Francês Louis le Chatelier que consiste na calcinação do carbonato de sódio e do bauxito para formar o aluminato de sódio, e o processo Bayer, processo este que abordaremos nesta seção.

O processo Bayer foi desenvolvido e patenteado pelo químico soviético Karl Josef Bayer no final do século XIX (CUNHA, 2015; SANTOS, 2019; ROSÁRIO, 2013), sendo utilizado em mais de 97% das 200 milhões de toneladas de bauxita processada anualmente em escala global (GREG POWER, 2011), sua origem, foi elaborada para atender uma solicitação da indústria têxtil que utiliza o Al_2O_3 como fixador para o tingimento do algodão, contudo, o processo Bayer ganhou maior relevância na metalurgia, mediante a sua combinação com o processo eletrolítico de obtenção de alumínio metálico, conhecido como processo Hall-Héroult (SANTOS, 2019; ROSÁRIO, 2013), evidenciando processo significativo na história da metalurgia, cuja magnitude foi tão expressiva que chegou a ser comparado ao processo de cianetação para o tratamento de ouro e prata, estimando o marco do nascimento da hidrometalurgia (ROSÁRIO, 2013).

As circunstâncias primordiais do processo Bayer se pautam na dissolução da alumina da bauxita a elevada temperatura e baixa pressão mediante lixívia de soda concentrada, onde, após Separação dos resíduos insolúveis mediante a

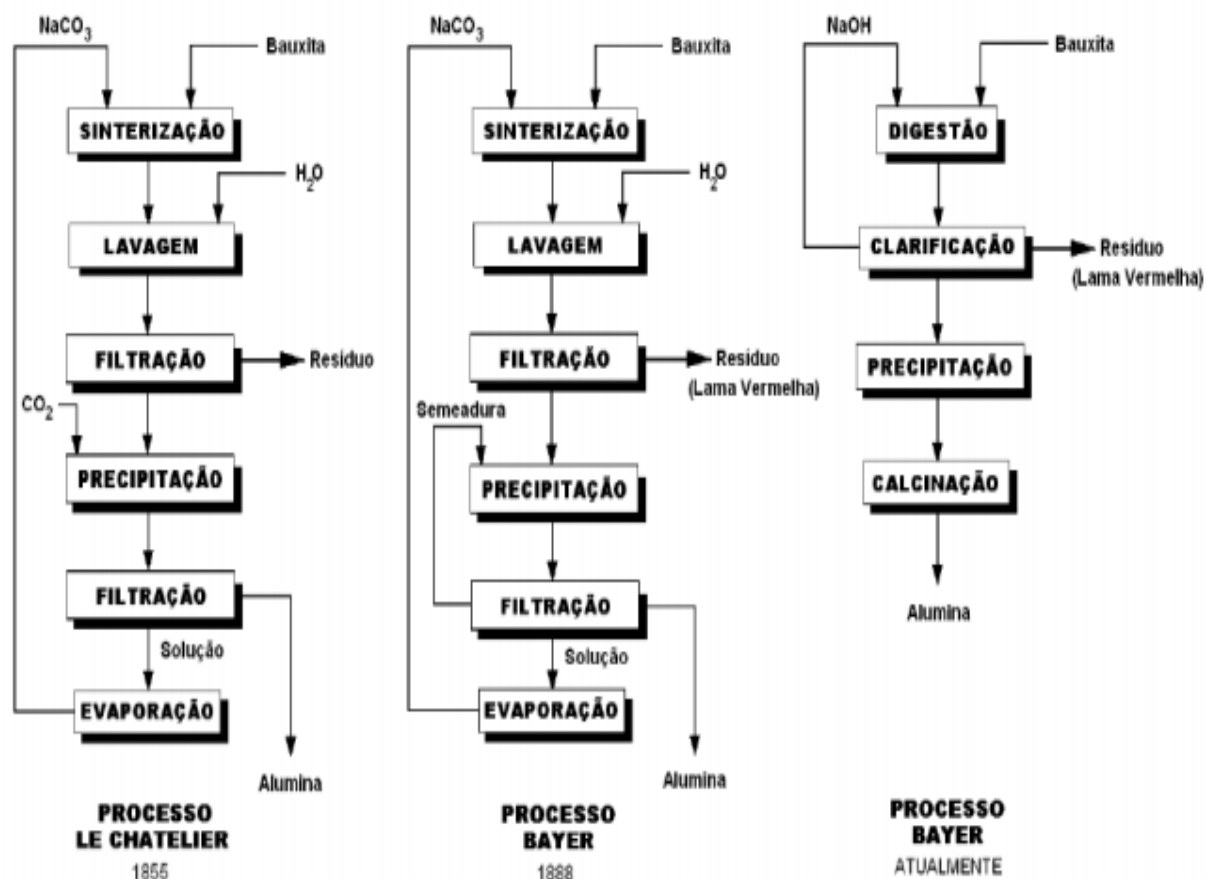
¹ Esse processo constitui-se no aquecimento da bauxita com Na_2CO_3 a 1200°C , extração dos aluminatos formados com água, precipitação do $\text{Al}(\text{OH})_3$, mediante a ação do CO_2 e finalmente, o $\text{Al}(\text{OH})_3$ formado é filtrado, seco e limpo (SILVA et al., 2007; SANTOS, 2019).

precipitação parcial da alumina, ocorrerá o abaixamento da temperatura e a dissolução da lixívia de alumínio de sódio (BARRAD e GADEAU, 1967).

Logo, o processo Bayer prossegue sendo utilizado nas plantas de beneficiamento de bauxita praticamente sem grandes modificações do processo original, ou seja, do processo Le Chatelier, exceto por poucas mudanças tal como a substituição do Na_2CO_3 pelo NaOH (hidróxido de sódio), assim como o uso da pressão durante a digestão (HIND; BRARGAVA; GROCOTT, 1999).

Desta maneira, o processo Bayer passou alterações no decorrer dos anos, todavia, atualmente ele é essencialmente dividido em quatro etapas a saber: a digestão, a clarificação, a precipitação e a calcinação tal como é possível observar na Figura 1 a seguir.

Figura 1 – Processo Bayer durante os anos



Fonte: Silva Filho et. al., 2007, p. 32.

Previamente, o minério oriundo de diversas jazidas passa por um processo de homogeneização, tornando a matéria-prima o mais uniforme possível, o que ulteriormente, acarreta na primeira etapa do processo Bayer, que por sua vez vem

ser a moagem, mediante utilização de dois tipos de moinhos: um de martelo e um de barras. Sucessivamente, advém a estocagem da pasta moída, que possui granulometria ideal para dar continuidade ao processo Bayer, com a etapa de digestão (ROSÁRIO, 2013), onde, o equipamento será utilizado para diminuir a granulometria tal como pode ser observado na Figura 2 a seguir.

Figura 2 – Equipamentos Utilizados no Processo de Moagem da Bauxita.



Fonte: ALUNORTE, 2011.

A segunda etapa, também denominada de digestão, inicia-se a partir da pasta moída em tanques específicos que ficarão em homogeneização em virtude da ação de pás rotativas e bombas recirculantes (ROSÁRIO, 2013). A carga do moinho de bolas, a úmido, solução nova de hidróxido de sódio e água reticulada da recristalização da gibsita, regularmente a cal virgem é incorporado para ampliar a alcalinidade (proporção de NaOH) dissociando o carbonato de sódio possivelmente presente (SANTOS, 2019; SOUZA, 2010).

A mistura da bauxita britada com diâmetro que variam entre 0,80 mm e 0,6 mm, e a solução de hidróxido de sódio são digeridas em temperaturas que varia entre 200°C e 240°C, para dissolver o hidróxido de alumínio formando o aluminato de sódio (SOUZA SANTOS, 1989). Além disso, a etapa de digestão é incumbida por dissolver o hidróxido de alumínio na bauxita, assim como reduzir os teores de sílica (ROSÁRIO, 2013), tal como observa-se na Figura 3 onde os equipamentos são usados no processo de digestão da bauxita.

Figura 3 – Digestores.



Fonte Alunorte, 2011.

E partindo disto, após a etapa de digestão, ocorre a etapa de clarificação, onde existe a divisão da parte sólida (resíduo insolúvel) e da parte líquida (licor). De modo que a clarificação compreende da separação do resíduo sólido abundante em óxidos de ferro (lama vermelha) da solução de aluminato de sódio.

Nesse estágio, a mistura passa através de uma série de tanques flash que diminuem a pressão até a pressão atmosférica para em seguida promover a separação da lama vermelha em decantadores de elevado rendimento (SANTOS, 2019), tal como é evidenciado na imagem que se segue e ilustra os decantadores industriais enquanto equipamentos utilizados para deixar o material o mais puro possível.

Figura 4 – Decantadores.



Fonte :Área Técnica da Alunorte, 2006.

Após este processo de separação e por sua vez filtração do material, o licor (solução clarificada) passará a ser denominado de “licor rico”, sendo posteriormente resfriado em trocadores de calor com o objetivo de aumentar o grau de supersaturação da alumina dissolvida que se encontra presente no licor para seguir uma nova etapa, que vem a ser a precipitação, realizada em uma espécie de tanques de larga escala, tal como se ilustra a seguir.

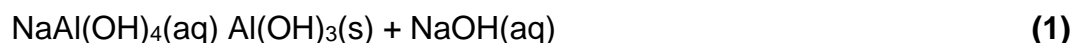
Figura 5 - Precipitadores.



Fonte: Área técnica da Hydro ALUNORTE, 2006

A partir disto, o licor em sua composição já filtrada, ao adentar na etapa de precipitação será adicionado a quantidades consideráveis de cristais de hidróxido de alumínio com fins de aceleração da precipitação do $\text{Al}(\text{OH})_3$ contido em solução.

A existência dos cristais na solução logra outros cristais e assim formam-se aglomerados, os quais são classificados em materiais maiores e finos, onde, os aglomerados maiores de cristais de hidróxido de alumínio serão filtrados e lavados para remover a solução cáustica arrastada (concentrada por evaporação retornando a etapa de digestão), e assim, originar ao hidrato de alumínio, como pode ser observado na reação 1, na medida em que o material fino é reciclado e utilizado na precipitação.



E por fim, a calcinação enquanto última etapa do processo e que se situa a partir da lavagem da alumina para remoção de qualquer resíduo do licor, o qual posteriormente é direcionado ao processo de secagem, seguido da calcinação da alumina a aproximadamente 1000 °C para desidratar os cristais, formando cristais de alumina puros, de aspecto arenoso e branco (HIND et al., 1999; ABAL, 2005; WAO, 2005 apud SILVA FILHO, 2007).

Figura 6 – Calcinadores



Fonte: Área técnica da Hydro ALUNORTE, 2006

2.3 Lama Vermelha

Anualmente, as plantas de beneficiamento da bauxita produzem uma quantidade expressiva de lama vermelha no mundo todo (TSAKIRIDIS, *et al.*, 2014), aproximando-se a 120 milhões de toneladas de lama vermelha geradas, que por mais de um século de extração da alumina culminam em cerca de 2,7 bilhões de toneladas desse resíduo, cujo reaproveitamento remete-se a valores ínfimos de 2% a 3% deste quantitativo (EVANS et al., 2012; LIAO, 2015; POWER, 2011).

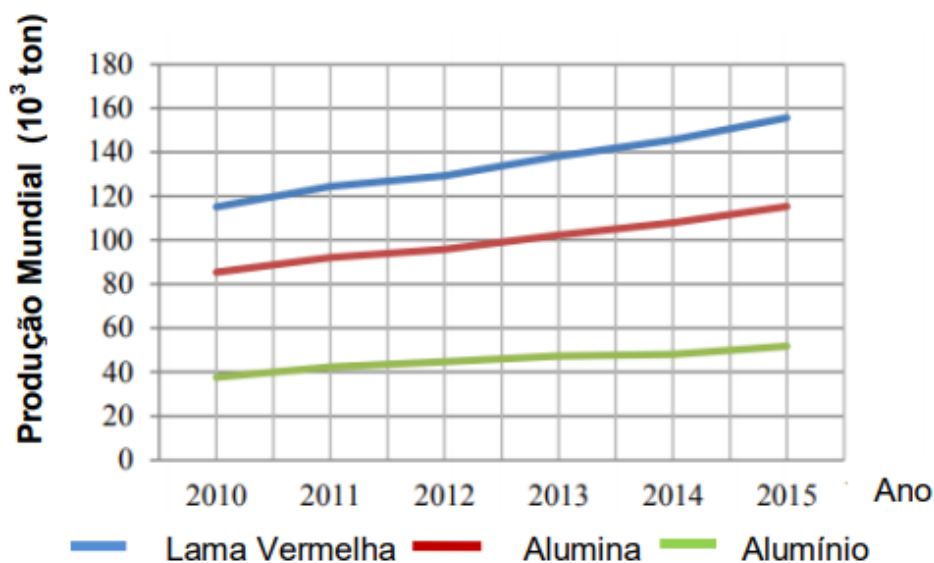
A lama vermelha é o resíduo insolúvel produzido ao longo da etapa de clarificação do processo Bayer, e este subproduto apresenta em sua composição ferro, quartzo, alumino, silicatos de sódio, carbonatos, aluminatos cálcio, dióxido de titânio, entre outros. Todavia, a sua composição química pode apresentar diversificações não somente decorrentes da natureza da bauxita, mas, também oriunda de técnicas empregadas em cada planta de beneficiamento. Constituída

por partículas extremamente finas (em torno de 95% < 44 μm , i.e 325 mesh), expondo área superficial de 13-22 $\text{m}^2 \text{g}^{-1}$, e apresentando enquanto principal peculiaridade a elevada alcalinidade que gira em torno do Ph 10-13 (SILVA FILHO et al., 2007; PRANDHAN et al., 1996; HIND et al., 1999).

De acordo com dados obtidos junto ao World Aluminium no ano de 2017, a produção de alumina chegou ao valor de 132,390 mil toneladas métricas, estando por sua vez a China em posição de destaque na produção mundial, sendo responsável por 53% da produção do planeta de alumina, seguida pela Austrália com o quantitativo de 13%, e o Brasil com respectivos 9% da produção mundial, ressaltando a colocação destes países enquanto maiores produtores de lama vermelha em todo o mundo.

Segundo a Associação Brasileira do Alumínio - ABAL, no que se refere ao ano de 2016 houve a produção de cerca de 10,8 milhões de toneladas de alumina, gerando assim aproximadamente 12 milhões de toneladas de resíduos, tal como esclareceremos na imagem a seguir, onde evidencia-se por meio de gráfico demonstrativo de crescimento no que tange a produção de alumina e alumínio, assim, como a ocorrência da geração de lama vermelha na periodicidade de 2010 a 2015 em escala mundial.

Gráfico 1 – Gráfico acerca da evolução dos valores de produção da alumina, alumínio e lama vermelha no período de 2010 a 2015.



Fonte: LIMA, et al, 2016.

Partindo disto, é importante evidenciar que os grupos de rejeitos conhecidos como “tailings”, como o caso da lama vermelha - LV, são decorrentes do processamento de minérios pela indústria extrativista mineral (SILVA FILHO, 2007), onde, tais resíduos são solos que compunham o mineral de interesse ou procedem da moagem de rochas em processo de extração, e que podem ser adicionada a substâncias químicas, como a soda cáustica utilizada no refino da alumina, e desta forma, os “tailings” particularizam-se por serem lamas constituídas de partículas extremamente finas (FALEY, et al., 2002; VICK, 1983).

Devido ao gigantesco volume que é gerada e sua reatividade, a LV ocasiona problemas ambientais ao meio ambiente, porém, não é particularmente toxica. Sendo considerado no Brasil, enquanto resíduo não inerte (resíduo de classe II), não sendo classificados enquanto resíduo perigoso pela agência reguladora de proteção ao meio ambiente dos Estados Unidos, a Environmental Protection Agency- EPA. (VENÂNCIO, 2013).

2.3.1 Deposição e estocagem

A deposição do resíduo proveniente do processo Bayer compõe-se em um problema gigantesco devido ao elevado volume que é gerado nas plantas de processamento de bauxita em todo o mundo, mais devido aos altos riscos de acidentes ambientais.

Em anos anteriores, países como Grã-Bethânia, Itália, Japão, Jamaica, França e Estados Unidos, despejavam diretamente ao mar a lama vermelha. Todavia, com as leis ambientais mais severas e exigentes a lama vermelha é estocada em lagos ou lagoas com impermeabilização com o intuito de não poluir o solo e o lençol freático. (SANTOS, 2019; O' CONNOR, 1988).

De acordo com Ribeiro et al. (2012) e Kummar (2006), os custos com o armazenamento da lama vermelha são elevados e requer uma grande área para a deposição deste resíduo, os custos com estocagem fica próximo a 5% do custo total da produção da alumina. Hodiernamente, grande parcela das plantas de beneficiamento da bauxita utiliza métodos modernos e tecnológicos para a disposição dos resíduos que diminuem os riscos ambientais (ROSÁRIO, 2013), na

Figura 7, observa-se o depósito de resíduos sólidos – DRS da empresa Hydro atualmente.

Figura 7 – Depósito de Resíduos Sólidos – DRS da empresa Hydro.



Fonte: HYDRO ALUNORTE, 2021.

Logo, os métodos mais empregados para a deposição da lama vermelha são os métodos convencionais ou úmidos, e os métodos conhecidos como secos ou semi-secos.

Os métodos convencionais ou úmidos, são assim nomeados em virtude da elevada quantidade de água no processo que segue com o material sólido para a deposição. Este método, compõe-se em grandes diques onde a Lama Vermelha é inserida com baixo teor de sólidos, onde, o material sólido acomoda-se emergindo em um sobrenadante alcalino.

As despesas relacionadas são elevadas em virtude da impermeabilização da área antes da estocagem do resíduo, realizada normalmente através de membranas plasmáticas ou a aplicação de camadas de material impermeável devido aos riscos de contaminação do solo e cursos da água. (KIRKPATRICK; NGUYEN; BOGER; JAMAICAN BAUXITE CASE apud. SILVA FILHO et al., 2007), e que pode se ilustrada a partir da imagem a seguir que evidencia o esquema de lagoas de deposição de resíduos.

Figura 8 – Esquema de lagoa de deposição de resíduos.



Fonte: ROSARIO, 2013. p. 34.

Modernamente, as lagoas de estocagem de lama vermelha vêm sendo substituídas pelo método de empilhamento a seco ou a semi-seco que por sua vez apresenta mais segurança para o meio ambiente, sendo utilizado amplamente pela empresa Hydro Alunorte, o que apresenta as seguintes vantagens: melhor manuseio, maior segurança, diminuição na geração de lama vermelha, para além de menor área ocupada (SANTOS, 2019; SILVA FILHO, 2007).

Entre os métodos de disposição a seco, o mais aplicado para a lama vermelha é o “Dry Stacking”. No Brasil, a Hydro Alunorte foi pioneira na utilização do método a seco, ao utilizar o método de deposição de lama vermelha por alta densidade, que se trata de um processo de “Dry Stacking”. Este método, possibilita à empresa o armazenamento do resíduo seco em teor sólido de 78%, empilhando o material a seco em formato de compactação (HYDRO ALUNORTE, 2021).

2.3.2 Composição química da lama vermelha

A composição química da lama vermelha é bastante diversificada e está sujeita a natureza da bauxita e a técnica aplicada em cada planta do processo Bayer. Habitualmente, este resíduo detém todo o ferro, titânio e sílica existente na bauxita, ademais, o alumínio que não foi extraído durante o refino, combinado com o sódio conforme a forma de um silicato hidratado de alumínio e sódio de natureza zeolítica (REESE e CUNDIFF, 1955; MCCONCHIE et. al., 2002).

Tabela 1 – Composição química da lama vermelha de vários locais de extração com % em peso.

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	Na ₂ O	CaO	MgO	K ₂ O	País
HILDEBRANDO et al., 1998.	38	19	19,90	3,83	8,58	0,87	0,04	0,12	Brasil/ Norte
Santos, 2019.	34	22	18,80	5	9	1,30	-	-	Brasil/ Norte
ASCENSÃO; Guilherme, et al., 2017.	52,25	14,63	5,67	9,41	4,82	1,88	0,08	0,08	Portugal
LI; Guanghui, et al., 2014.	48,2	7,3	8,4	1,4	1,4	0,9	-	-	China/ Sul
Sahu; Ramesh Chandra, et al., 2010.	54,26	12,20	3,04	8,45	5,79	0,23	0,18	-	Índia
ZHU; Shufa et al., 2017.	11,29	7,48	25,36	1,72	3,19	40,88	-	1,04	China/ Norte

Fonte: Autoria própria

Logo, as composições químicas da lama vermelha podem existir em diversos subsídios que abarcam a composição da lama vermelha, apresentam-se como elementos traços como vanádio, gálio, fósforo, magnésio, cromo, nióbio, zinco, manganês e tório. (PRADHAN et. al., 1996.). Ademais, fases minerais mais comuns são a hematita ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$), a goetita ($\alpha\text{-FeOOH}$), a magnetita (Fe_3O_4), a boemita ($\gamma\text{-AlOOH}$), o quartzo (SiO_2), a sodalita ($\text{Na}_4\text{Al}_3\text{Si}_3\text{O}_{12}\text{Cl}$) e a gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), com menor presença de calcita (CaCO_3) e gibisita ($\text{Al}(\text{OH})_3$) (BRUNORI et. al., 2005; PRADHAN et. al., 1996; YALÇIN et. al., 2000).

2.4 Agregados para concreto

Segundo Souza (2010), os agregados são materiais granulares, sem volume e forma fixados, frequentemente inertes de dimensões e atributos compatíveis para a utilização em obras de engenharia, sendo usualmente utilizados na produção de concreto e argamassas de cimento Portland.

No caso peculiar de utilização do concreto, os agregados exercem fundamentais e importantes funções tais como conferir maior estabilidade dimensional e melhor durabilidade do que a pasta de cimento pura, para além da diminuição de custos, haja vista que estes reduzem o volume ocupado pela pasta de cimento já que o agregado é menos oneroso que a pasta de cimento.

São exemplos de agregados: seixo, pedra britada, cascalho, e areias naturais ou obtidas por moagem de rocha, além das argilas e substitutivos como resíduos inertes reciclados, escórias de aciaria, produtos industriais, entre outros.

Vale salientar, que o volume mundial de recursos naturais empregues em obras de edificações e transportes ampliou seu quantitativo em 23 vezes desde o século XX até a primeira década do século XXI, onde, destes recursos, os agregados integram uma parte significativa dos insumos, sendo o grupo de materiais mais extraídos do mundo. (DE OLIVEIRA JUNIOR, 2019; KRAUSMANN et al., 2017).

De acordo com Rosário (2013) com o intuito de conter o esgotamento de jazidas naturais de agregados, tem-se investigado inúmeras alternativas, sobretudo aquelas ambientalmente corretas visando atender à crescente demanda de insumos para a indústria da construção civil. Considerando que a seleção por um determinado

tipo de agregado depende da disponibilidade de cada região, a exemplificar o território amazônico, cujo o agregado graúdo mais utilizado é o seixo.

2.4.1 Classificação dos agregados

Partindo disto, os agregados podem ser classificados quanto a sua procedência como:

- *Agregados naturais*: aqueles que se encontram depositados em jazidas nas condições de emprego iminente, como por exemplo, as areias e os seixos obtidos dos leitos dos rios;
- *Agregados artificiais*: aqueles em que ocorrem alterações da maneira como se encontram depositados, sem que, porém, se observe alguma alteração da composição mineralógica das matérias primas, são exemplos de agregados artificiais, a pedra britada e argila expandida;
- *Agregados industrializados*: aqueles que passam para a condição de agregado após intervenções que provoquem alterações da composição mineralógica das matérias primas, como por exemplo a escória de alto forno;

As areias, pedras britadas e os seixos naturais são utilizados abundantemente no Brasil para a produção de concreto. Todavia, como a seleção do agregado está ligado intimamente à disponibilidade do local de extração, até por uma questão de custo, há uma grande diversidade de outros materiais para a produção de concreto (GOMES et al., 2015).

Ademais, os agregados classificam-se de acordo com o tamanho das partículas, em agregado graúdo e agregado miúdo, de acordo com a norma NBR 7211 (2009), posto que:

- *Agregados graúdos*: são compostos por grãos que passam pela peneira com abertura de malha de 75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 4,75 mm.

- *Agregados miúdos*: são compostos por grãos passam pela peneira que possui abertura de malha de 4,75 mm.

2.4.2 Agregados sintéticos

Agregado sintético pode ser caracterizado enquanto material oriundo da transformação de solo, resíduo sílico-aluminoso ou de outra fonte preliminarmente processada em material inerte com resistência mecânica propícia para estabelecida finalidade. Tais peculiaridades são geralmente obtidas mediante a queima deste material em temperaturas elevadas superiores a 1100° c (CABRAL et al., 2008).

Os agregados leves ou argilas expandidas, são agregados com massas específicas inferiores a 2 g/cm³, enquanto que os agregados convencionais apresentam massas específicas superiores a 2 g/cm³. Ademais, o resultado é alcançado pelo aquecimento de argila ou folhelhos argilosos na temperatura próxima a 1200° c, onde os agregados leves ostentam uma diversificada aplicação na fabricação de concreto com o intuito de redução de peso estrutural, elemento de proteção acústica, assim como a aplicação de pavimentação asfáltica (CABRAL, et al., 2008; DE OLIVEIRA et al., 2018; FROTA e SILVA, 2013; ROSSIGNOLO, 2011; SANTIS e ROSSIGNOLO, 2013).

De acordo com Souza (2010), em temperaturas próximas a 1200° c, uma parcela do material constituinte se funde gerando uma massa viscosa, ao passo que a outra parte se decompõe quimicamente liberando gases que são incorporados por essa massa sinterizada que é expandida.

Esses gases confinados no interior do agregado de argilas, não podem desprender-se para o seu exterior devido a fase líquida, correspondente aos elementos fundentes que envolvem as partículas.

Assim, os agregados sintéticos dispõem comumente formato esférico, com estrutura interna formada por espuma cerâmica composta de microporos, e, superfície rígida e resistente. Podendo ser utilizado em isolamentos, concretos leves, drenagens, enchimentos entre outras aplicações (SANTOS, 2011) tais como:

- *Jardinagem*: a argila expandida é a única capaz de garantir a umidade satisfatória da terra, drenar de forma rápida e por igual, além de ser o único material disponível a garantir total sucesso na cultura hidropônica. O uso da argila expandida em jardinagem é um hábito europeu antigo que agora vem ganhando espaço de forma acelerada, também no Brasil.
- *Decoração*: a argila expandida vem sendo cada dia mais usado em projetos paisagísticos, não só com o objetivo de criar as condições necessárias para um bom desenvolvimento das plantas, mas também com o intuito de decorar, uma vez que sua cor e formato constituem uma composição harmônica em qualquer ambiente.
- *Regularização de lajes em geral*: inclinação para escoamento.
- *Pavimentos*: calçados painéis para fechamento de galerias.
- *Uso em concretos*: com o uso do agregado leve no concreto com cimento, areia e água em proporções e numa sequência específica de mistura, pode-se obter concreto leve com densidade aparente de 350 a 1800 kg/m³.

Sendo assim, este tipo de concreto pode substituir a exigência por uma resistência a grandes esforços, podendo ser usado com grande redução de peso em elementos das edificações, para além do baixo peso existente, onde, suas qualidades isolantes ampliam-se a sua utilização dando um grande passo a caminho da industrialização de componentes da construção civil.

2.5 Sílica

O quartzo, tridimita e cristobalita descobertas no início do século XX, são as três fundamentais formas cristalinas da sílica, deste modo é um material polimorfo. Polimorfismo é o sistema que apresenta duas ou mais formas cristalinas, embora

apresente composições químicas semelhantes e propriedades físicas e químicas diferentes (EITEL, 1954).

A sílica é um material utilizado largamente na indústria cerâmica, pois é a matéria prima precípua usada nos vidros, esmaltes e abrasivos. Sua ampla utilização é devida sua dureza, seu ponto de fusão, seu baixo custo e 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). Um dos principais motivos da indústria cerâmica ter sido progredido a partir da sílica e dos silicatos foi em função da simplicidade de sua exploração, já que é um dos materiais mais fartos na crosta terrestre, correspondente a 2/3 de sua composição (GREEN e STEWART, 1953).

2.5.1 Reações de Sinterização

Sinterização é um processo no qual a temperatura de processamento é sempre menor que a sua temperatura de fusão, na qual as pequenas partículas do material se ligam entre si por difusão no estado sólido, transformando o material compacto poroso num produto resistente e denso. E partindo disto, é imprescindível salientar, que conforme as partículas se tornam maiores no transcorrer do tempo de sinterização, a porosidade do compactado diminui, e com isso atinge-se um tamanho de grão de equilíbrio (NORTON, 1973).

Parte significativa das fases cerâmicas originam-se de matérias primas com estrutura de sílico- aluminatos (misturas de estruturas de sílica SiO_x e Al_2O_3). Estas estruturas integram no equilíbrio à elevadas temperaturas, fases compactas densas e resistentes, sobretudo constituídas de fase amorfa (vidro e mulita estável), que juntas formam a estrutura cristalina da maioria dos materiais sinterizados oriundos de sílico-aluminatos.

As argilas são notoriamente os mais relevantes sílico-aluminatos e consistem fundamentalmente em alumino-silicatos hidratados (AlO , SiO , OH), com pequenas quantidades de outros óxidos, tais como TiO , FeO , MgO , NaO e KO . Outras matérias-primas à base de sílico-aluminatos também podem ser utilizadas como Feldspatos (fundentes), Pirofilitas (refratários) e sílica (NORTON, 1973).

Segundo Oel (1985), Mörtel e Heimstadt (1994), associam os fechamentos dos poros e a elevação da resistência mecânica nos materiais cerâmicos com a eficácia das reações do estado sólido que ocorrem no interior do material que são responsáveis pela formação da fase mulita e do vidro (fase amorfa), no qual as 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.

Alguns autores como MÖRTEL et. al. (2000) sugerem que a maior influência para a resistência destes materiais é a presença de fases tipo quartzo, mulita e a fase vítrea. De modo que a mulita pode ser constatada na maioria dos materiais cerâmicos como porcelanas, por exemplo, na forma de escama e de agulhas. Por derivar de fases compostas como a alumina e a sílica do caulim, a mulita na forma de escama denominada primária (MÖRTEL e BOUBACAR, 1977).

2.5.2 Reações de Vitrificações

O material na sinterização deve possuir um teor de vidro suficiente em baixa viscosidade na temperatura de formação, com intuito de preencher grande parte dos poros e dessa forma reter os gases que são liberados. O hidróxido de sódio presente na lama vermelha facilita a formação da fase vítrea, através das reações de vitrificação (formação de fase amorfa), como é possível observar na reação 2 (BRINDLEY e NAKAHIRA, 1958).

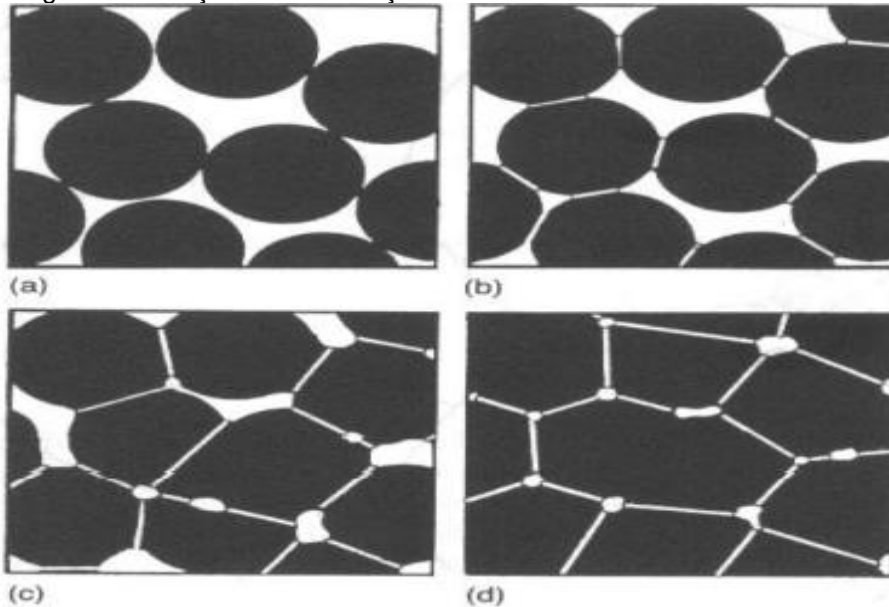


As reações de vitrificação são incumbidas pela redução dos poros na estrutura dos materiais cerâmicos, etapa de transformação de fase nos materiais de acordo Mörtel e Heimstadt (1994), afetada diretamente pela atenuação da viscosidade da fase vítrea, sendo favorecida pela presença de metais alcalinos tais como o sódio e o potássio.

A elevação da resistência mecânica é resultado da redução da porosidade, gerada pela formação da fase vítrea e conseqüentemente redução da viscosidade, tal

como ilustra a Figura 9, enquanto etapa de vitrificação na sinterização em materiais cerâmicos exposto em temperaturas crescentes evidenciado na seguinte sequência: (a) partículas soltas de pó; (b) estágio inicial; (c) estágio intermediário; (d) estágio final.

Figura 9 – Reações de Vitrificações em Materiais Cerâmicos.



Fonte: MÖRTEL e HEIMSTADT (1994).

2.6 Mulita

A mulita, um dos materiais inorgânicos mais habitualmente usados possui diversas vantagens, com excelentes propriedades mecânicas, alto ponto de fusão, baixo coeficiente de expansão térmica, excepcional resistência a fluência, boa estabilidade em ambientes quimicamente agressivos e alta resistência em elevadas temperaturas (LUO et al., 2018; S. ANANTHAKUMAR, 2006).

De acordo com Santos (2019), a formação da mulita é de grande relevância para as propriedades mecânicas dos materiais cerâmicos, tal como explanado pela reação 3, encarregada pela formação da mulita secundária, esta apresenta morfologia acircular, enquanto fase de evolução nas propriedades mecânicas do material cerâmico que em companhia com a fase amorfa irão apontar características mecânicas do material cerâmico.



A mulita secundária forma-se geralmente em uma reação exotérmica, próximo a 1250° c, no caso da caulinita, todavia, as impurezas constituintes das argilas e, especialmente o sódio, potássio e ferro na lama vermelha são capazes de antecipar significativamente a formação destes componentes (SANTOS, 2019).

2.7 Trabalhos Realizados Com Resíduo Da Bauxita No Pará

O resíduo da bauxita (lama vermelha) tem sido objeto de inúmeros estudos, já algum tempo na região norte. No Estado do Pará - PA, dentro dos cursos de engenharia civil, e química, ofertados pela Universidade Federal do Pará - UFPA, este resíduo foi utilizado nos trabalhos a seguir:

- Hildebrando (1998), desenvolveu metodologia de verificação a aplicação do rejeito do processo Bayer (lama vermelha) como matéria-prima na indústria de cerâmica estrutural. Confeccionando corpos de prova por prensagem à seco de misturas contendo 50% e 70% respectivamente em peso de rejeito e argila, submetendo os mesmos a queima em diversas temperaturas e em seguida determinando suas propriedades cerâmicas, a partir de comparações dos resultados obtidos em literatura.
- Souza (2010), estudou que o resíduo do processo Bayer pode ser utilizado para a produção de agregados sintéticos possíveis para serem empregados na indústria de construção civil e alcançou resultados satisfatórios na produção de concretos produzidos com os agregados da mistura lama vermelha-sílica.
- Magalhães (2012), em seus estudos, verificou a Extração dos Compostos de Ferro da Lama Vermelha Visando a Concentração e/ou Extração dos compostos de Titânio, enumerando que a lama vermelha pode ser utilizada como fonte de matéria-prima alternativa para a concentração e posterior recuperação de compostos de titânio.
- 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 concreto apropriado para a utilização na área da construção civil, por meio da utilização de agregados sintéticos obtido a partir da lama vermelha.

- Cunha (2015), utilizou a lama vermelha para a produção de compósitos de poliéster isoftálico, constatando que a lama vermelha e a fibra de curauá podem ser insumos importantes na produção de compósitos de poliéster isoftálico, para além da produção de painéis, paredes, divisórias internas e portas para construção civil.
- Botelho (2017), estudou a influência da adição de óxido de cálcio e magnésio como forma de neutralizar e estabilizar a alta alcalinidade presente na lama vermelha. Monitorando o pH ao longo do tempo, onde, conseguiu mostrar uma redução substancial na alcalinidade do resíduo do processo Bayer.
- Santos (2019), em sua tese, “Influência da Sílica e Temperatura nas Propriedades físicas dos Agregados Sintéticos Produzidos com o Resíduo do Processo Bayer”, pesquisou sobre a influência da sílica nas propriedades físicas e mecânicas dos agregados produzidos a partir da lama vermelha.

O presente trabalho visa investigar as propriedades dos agregados sintéticos produzidos 25% de argila e 15 % de sílica, com o objetivo de avaliar as propriedades obtidas dos agregados sintéticos produzidos. Ademais, óxidos de ferro e os óxidos fundentes presentes na composição química das argilas auxiliam nas características dos agregados sintéticos, tais como: massa específica aparente, expansão piroplastica e na formação de poros.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

As matérias-primas utilizadas na elaboração desta pesquisa puderam ser elencadas da seguinte forma: o resíduo da bauxita (lama vermelha) gentilmente doada pela empresa mineradora Hydro Alunorte, sediada no município de Barcarena, no Estado do Pará. A argila, adquirida em empresa de materiais cerâmicos localizada no município de São Miguel do Guamá, e a sílica, obtida em lojas de materiais de construção situadas na região metropolitana de Belém.

3.2 Beneficiamento das matérias-primas

As matérias-primas primeiramente foram secas em estufa com recirculação de ar² por um período de 24 horas em temperatura de aproximadamente 105° c para a retirada do excesso de umidade, onde, posteriormente as matérias primas foram inseridas em moinhos de bolas³ por 20 minutos para a desagregação.

Em seguida, para a uniformização da granulometria das matérias primas, estas passaram por um processo de peneiramento manual, com peneiras de aberturas de 100 mesh Tyler (0,149 mm). A Figura 10, mostra as matérias-primas beneficiadas.

Figura 10 – Matérias primas beneficiadas: A) Sílica; B) Resíduo da bauxita; C) Argila.



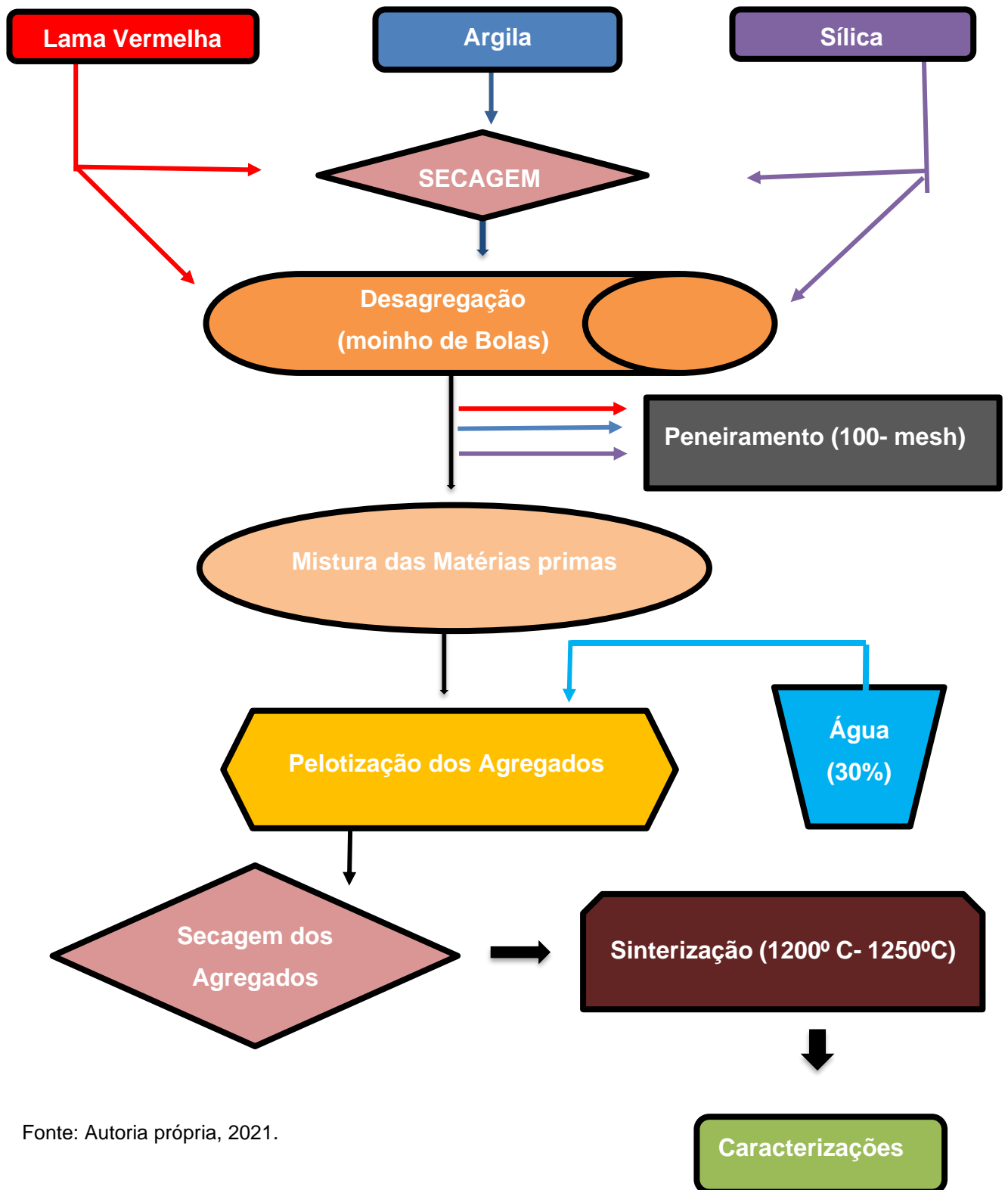
Fonte: Autoria própria, 2021.

² marca SolidSteel modelo SSDC-110L.

³ Marca: CIMAQ S.A., Modelo: Work Index – Usina de materiais – Laboratório de Engenharia Química, UFPA.

De forma resumida, o fluxograma a seguir evidencia o processo de produção dos agregados sintéticos.

Figura 11 - Fluxograma do processo de produção dos agregados sintéticos.



Fonte: Autoria própria, 2021.

3.3 Produção dos Agregados Sintéticos

Para a fabricação dos agregados sintéticos foi selecionada previamente a composição de 60% de resíduo de bauxita; 25% de argila e 15% de sílica. A metodologia utilizada nesta pesquisa foi a mesma que foi desenvolvida por Souza (2010) que investigou a produção de agregados sintéticos utilizando resíduos do processo Bayer. O presente trabalho visa investigar o aumento no teor de argila e as características alcançadas com este incremento.

Em seguida, a composição foi inserida em um misturador de bancada por 20 minutos para a harmonização e melhor distribuição dos componentes na massa cerâmica, sendo posteriormente, a massa cerâmica inserida ao tambor rotativo⁴ com capacidade de 160 litros (betoneira) para a pelotização do agregado sintético, além disso, com auxílio de um borrifador foi adicionado cerca de 30% de água para auxiliar na pelotização dos agregados.

Em seguida, os agregados foram selecionados em variados diâmetros e posteriormente passaram por um processo de secagem por 24 horas com temperatura de aproximadamente 105° c em estufa⁵ tal como se ilustra na Figura 12, que segue demonstrando o processo de formação das pelotas no interior do tambor rotativo.

Figura 12 – Agregados em processo de pelotização.



Fonte Autoria própria, 2021.

⁴ marca FISCHER

⁵ marca SolidSteel modelo SSDC-110L, localizada na Faculdade de Engenharia Química- UFPA.

3.4 Processo de sinterização dos agregados

O processo de sinterização foi realizado no laboratório de fornos⁶ localizado no prédio do Programa de Pós Graduação em Recursos Naturais da Amazônia (Proderna-Ufpa), onde foram estabelecidas as temperaturas de 1200° c e 1250° c para a formação de fases que vão ser geradas, com 3 horas de patamar cada uma e taxa de aquecimento de 10° c/ min para a sinterização dos agregados, enquanto seu resfriamento aconteceu de forma gradual, a Figura 13 revela os agregados organizados para a sinterização e após os processos de aquecimento e resfriamento.

Figura 13 – Agregados antes do processo de sinterização e após.



Fonte: Autoria própria, 2021.

3.5 Processo de caracterização dos agregados sintéticos e matérias-primas

3.5.1 Fluorescência de Raio- X

A composição química do resíduo da bauxita e a argila utilizados neste trabalho, foram analisados utilizando-se a técnica de Fluorescência de Raio- X (FRX) com o intuito de observar a composição química dos mesmos. Foi utilizado um espectrômetro da marca Bruker, modelo S2 RANGER AXSGmbH.

⁶ marca Junger, modelo SSC

3.5.2 Difração de Raios- x

A análise mineralógica dos agregados sintéticos foi realizada pela técnica de difração de Raio-X (DRX) realizada com intuito de identificar as fases cristalinas do material. Os agregados antes de serem submetidos a análise, passaram por redução granulométrica com auxílio de almofariz e de um pistilo para a adequação dos tamanhos de grãos de modo a conseguir o aumento da relevância da amostra.

O equipamento utilizado para a execução da análise foi o difratômetro de raios-X⁷ e tubos de raios-X cerâmico de ânodo de Cobalto ($K\alpha_1=1,54 \text{ \AA}$).

3.5.3 Determinação de propriedades cerâmicas

Após a etapa de sinterização os agregados foram submetidos ensaios para a determinação de suas propriedades cerâmicas. As especificidades determinadas foram: a) porosidade aparente (% PA); b) absorção de água (% AA); c) massa específica aparente (MEA g/cm³).

O método empregado para determinar tais propriedades foram feitos seguindo as seguintes normas especificados por SOUZA (1989) e ASTM (2001) conforme as equações (1), (2) e (3) respectivamente.

$$PA (\%) = \frac{Mu - Ms}{Mu - Mi} * 100 \quad (1)$$

$$AA(\%) = \frac{Mu - Ms}{Ms} * 100 \quad (2)$$

$$MEA \left(\frac{g}{cm^3} \right) = \frac{Ms}{Ms - Mi} * \rho_{H2O} \quad (3)$$

Onde Mu é massa úmida (g), Ms é massa seca (g) e Mi massa imersa (g). Para a determinação das referidas massas foram selecionadas 15 amostras de cada temperatura utilizada na pesquisa, os agregados sintéticos foram auferidos

⁷ modelo X'PERT PRO MPD (PW 3040/60 da PANalytical, com Goniômetro PW3050/60 (Theta/Theta)

unitariamente a sua massa seca utilizando balança de precisão analítica com 4 casas decimais. De modo que, para realização da massa imersa foi utilizado o aparato de madeira e uma haste de alumínio para o agregado ficar submerso em água, e para a realização da massa úmida as amostras ficaram por um período de 24 horas submersos em recipientes com água.

Figura 14 – Aparato utilizado para a medição das massas imersas



Fonte: Autoria própria, 2021.

De forma resumida, o fluxograma a seguir evidencia o processo de produção dos agregados sintéticos.

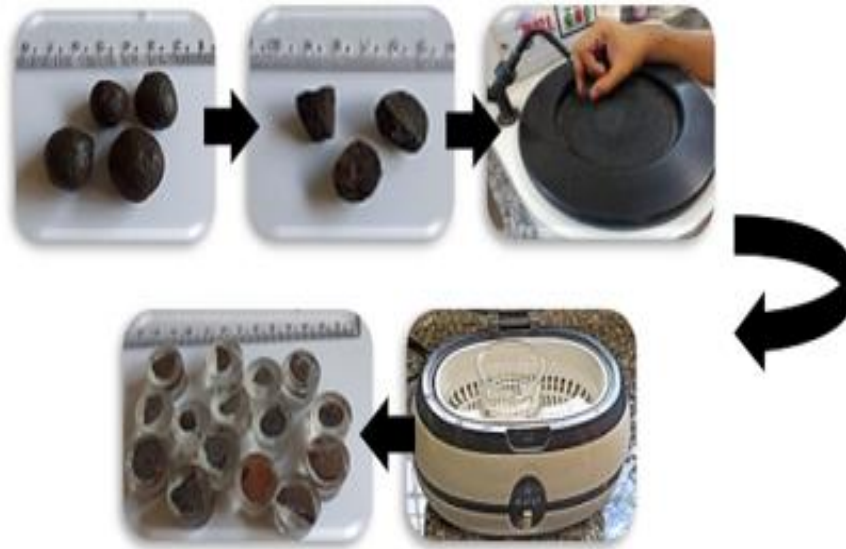
3.5.4 Microscopia Eletrônica de Varredura

A caracterização morfológica dos agregados foi realizada utilizando Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)⁸, as imagens do MEV foram capturadas por elétrons retro espalhados de um filamento de tungstênio com voltagem de 15 kV, objetivando investigar a morfologia. Para a realização do MEV os corpos de provas foram preparados da seguinte forma: foram selecionadas 4 amostras, em seguida estas foram partidas utilizando-se um martelo, posteriormente foram selecionadas algumas lascas dos agregados e teve início o processo de lixamento utilizando lixas com granulometria que variou de 80 a 1500, posteriormente houve o embutimento

⁸ marca VEGA3 TESCAN, localizado no Instituto Federal do Pará (IFPA).

com resina cristalina e foi realizado ataque com ácido fluorídrico a 10% por 60 segundos. A Figura 15, mostra o processo de preparação das amostras para serem analisadas.

Figura 15 – Preparação das amostras para serem analisadas no MEV



Fonte: Autoria própria, 2021.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização das Matérias-Primas

4.1.1 Composição química do resíduo da bauxita

A Tabela 2, evidencia a composição química (fluorescência de raio- x) do resíduo da bauxita utilizada na produção da pesquisa. Observam-se, que há em sua composição a presença significativa de óxidos de ferro, alumínio e silício. Estes óxidos referentes à presença das fase minerais Hematita (Fe_2O_3), Goetita ($\text{FeO}(\text{OH})$), Quartzo (SiO_2) e Alumina (Al_2O_3). Além disso, observa-se a presença de óxidos de sódio e cálcio que em formulações cerâmicas atuam como fundentes e contribuindo para a formação da fase vítrea (SANTOS, 2019). Ademais, a composição química do

resíduo da bauxita depende do local de origem do minério de bauxita assim como o método empregado no processo Bayer (CUNHA, 2015).

Tabela 2 – Composição química do resíduo da bauxita

Compostos	(%)
Fe ₂ O ₃	34,31
Al ₂ O ₃	21,27
SiO ₂	17,72
Na ₂ O	9,25
TiO ₂	6,89
CaO	1,22
P.F(perda ao fogo)	8,11

Fonte: Autor, 2021.

4.1.2 Composição química da Argila

A Tabela 3 evidencia a composição química da argila utilizada neste presente estudo, onde, de acordo com Racanelli (2020) que investigou e caracterizou as propriedades físicas e químicas de argilas caulínicas oriundas do município de São Miguel do Guamá. Pode-se observar-se que a argila apresenta em sua composição química uma quantidade significativa de óxido de silício (SiO₂), óxidos de alumina (Al₂O₃) e óxido de ferro (Fe₂O₃) observa-se a presença de óxidos fundentes que contribuem para a formação de fase líquida durante a etapa de sinterização.

TABELA 3 – Composição química da argila

Compostos	(%)
SiO ₂	66,39
Al ₂ O ₃	18,74
Fe ₂ O ₃	7,75
K ₂ O	4,36
TiO ₂	1,36
CaO	0,97
MnO	0,14
P.F.(Perda ao forno)	5,38

Fonte: RACANELLI, 2020.

4.2 Caracterização dos agregados sintéticos

4.2.1 Difração de raio-x (DRX)

A Figura 16, evidencia a análise de difração de raios- x que evidenciou a presença das fases precípua e predominantes nas amostras sinterizadas a 1200° c e 1250°c dos agregados sintéticos.

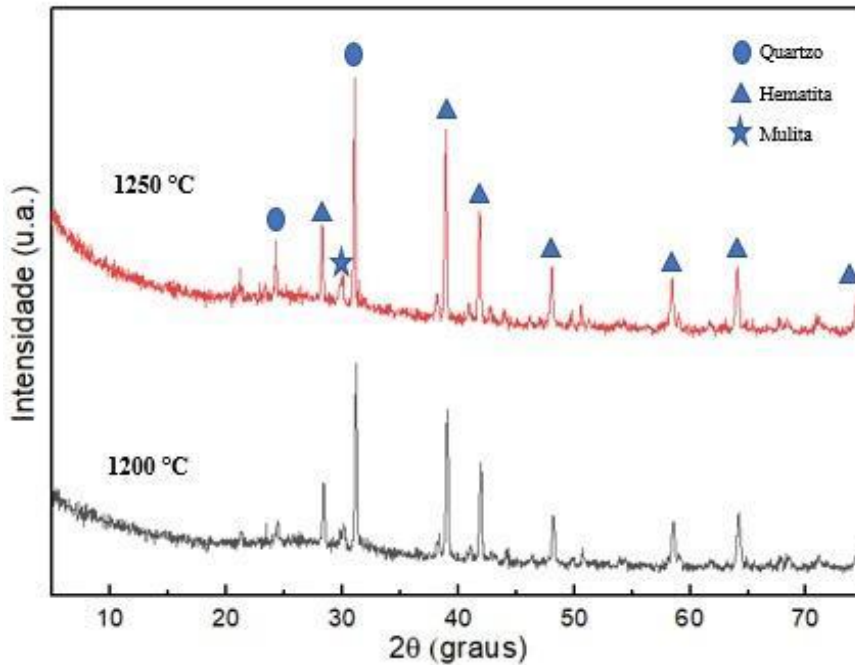
As amostras analisadas mostraram os padrões de difração realizados, que podem ser observados nas fases precípua dos agregados confeccionados a partir do resíduo da bauxita, tais como a presença de quartzo (SiO₂) encontrado nas duas amostras, a hematita (Fe₂O₃) e a mulita (3Al₂O₃.2SiO₂), tal resultado é evidenciado por SANTOS (2019) que a analisou a influência da sílica na produção de agregados sintéticos produzidos com o resíduo da bauxita. Vale salientar que a resistência mecânica dos agregados aumenta conforme a fase mulita é formada (SOUZA, 2010).

Na temperatura de 1250°c, observa-se o surgimento de novas fases cristalinas não observada na temperatura de 1200° c, tais como o quartzo, onde também se percebe o aumento pujante da fase amorfa (fase vítrea).

De acordo com Santos (2019), tais resultados certifica a estabilidade dos compostos de ferro, especialmente a hematita presente nas duas amostras

analisadas, no entanto, com clara redução de intensidade, pois estes compostos estão relacionados a formação da fase amorfa.

Figura 16 – Difração de Raios-x dos Agregados.



Fonte: Autoria própria,2021.

4.2.2 Propriedades cerâmicas dos agregados sintéticos

Os resultados na Tabela 4 revelam as propriedades cerâmicas dos agregados sintéticos, tais como: massa específica aparente (MEA), absorção de água (A.A) e porosidade aparente (P.A).

Tabela 4 – Propriedades cerâmicas dos agregados sintéticos

Temperatura	MEA (g/cm ³)	A.A	P.A
1200°C	2,15	0,21	0,65
1250°C	1,88	0,41	0,78

Fonte: Autoria própria.

Pode ser observado que com o aumento da temperatura houve uma significativa redução da massa específica aparente. Logo, a temperatura de sinterização de 1250° c dos agregados sintéticos facilita a formação da fase vítrea em

virtude presença do hidróxido de sódio, presente na composição química do resíduo da bauxita.

O aumento desta temperatura favorece as reações em estado sólido e a diminuição da viscosidade gerando conseqüentemente um aumento de formação de fase vítrea do material, cuja formação da fase é favorecida pela presença da soda residual encontrada no resíduo da bauxita. Esta fase, produz camada espessa externa ao agregado, que faz com que os gases provenientes da queima sejam parcialmente retidos, facilitando a expansão, criando vazios e ocasionando a diminuição na massa específica dos agregados sintéticos (OLIVEIRA, 2018; SANTOS, 2019; FEY et al, 2021).

De acordo com Souza (2010), as massas específicas alcançadas na temperatura de 1200° c são mais elevadas que as obtidas a 1250° c, pois, a 1200°c não houve a expansão piroplastica do material. Considerando os escritos de Van Vlack (1973), que enfatiza que ao longo da etapa de sinterização de um material, as partículas se aglutinam em um maior contato, logo, diminuindo a porosidade e dessa maneira dificultando a absorção de água. Constatando que com a diminuição da massa específica aparente, os valores referentes a porosidade aparente propendem a aumentar. (SOUZA, 1989).

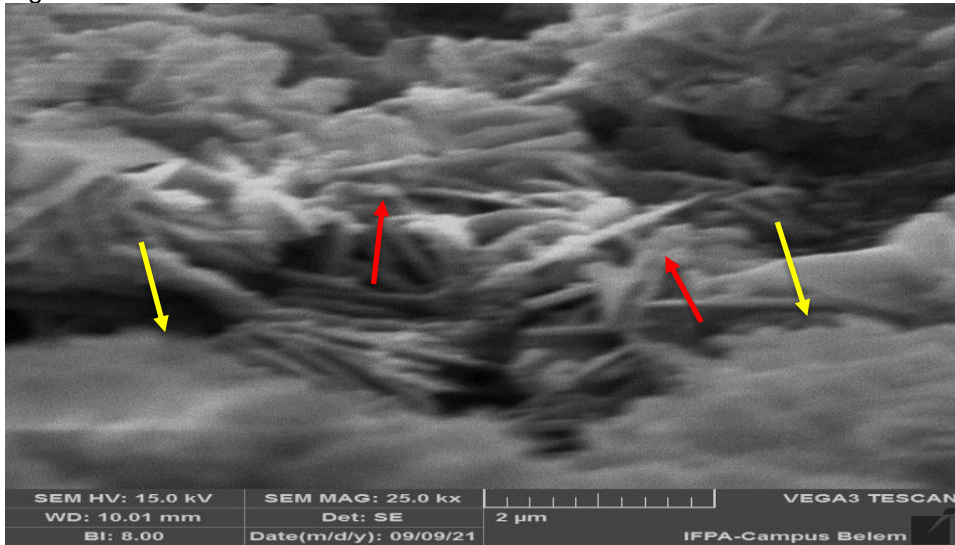
4.2.3 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Foram observadas as morfologias apresentadas na técnica de caracterização empregada, vislumbrando-se a presença de cristais de mulita secundária em sua forma características que lembram agulhas, as mesmas podem ser apontadas pelas setas vermelhas. Além disso, outra fase presente demasiadamente é a fase vítrea, onde são indicadas por setas amarelas.

Segundo a literatura, a mulita secundária é formada em regiões com menor viscosidade de fase vítrea, de modo que, segundo Souza (2010), a mulita secundária se forma geralmente em reação exotérmica (que para o caso da caulinita em elevado estado de pureza inicia-se normalmente a 1250° C), todavia, as impurezas presentes nas argilas, sobretudo, o sódio, potássio e o ferro existente no resíduo da bauxita apressam bastante a formação destes componentes.

Nas análises realizadas de microestrutura eletrônica de varredura (MEV) nas amostras sinterizadas a 1200° c e 1250° c. As Figuras 17 e 18 evidenciam as morfologias das amostras sinterizadas.

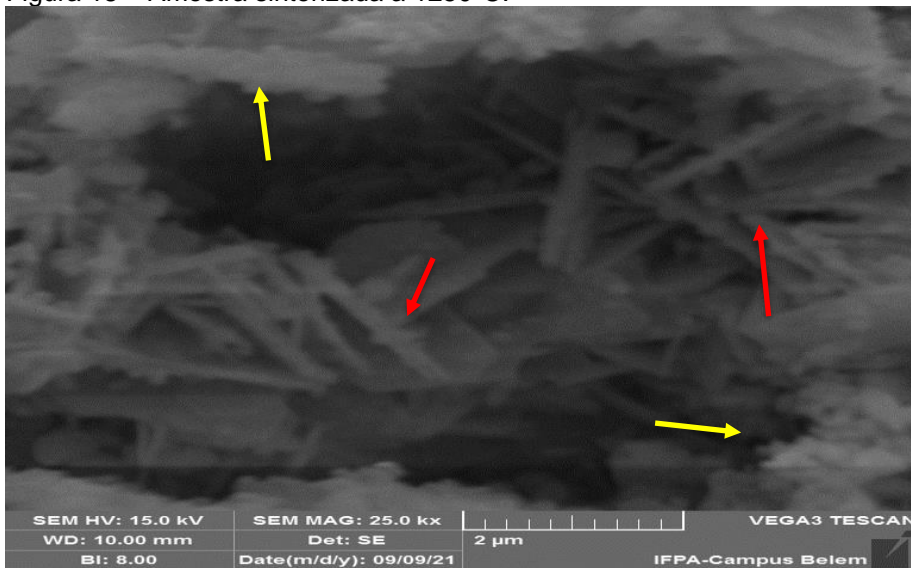
Figura 17 – Amostra sinterizada a 1200°C.



Fonte: Autoria própria, 2021.

De acordo com Santos (2019) a presença das “agulhas” de mulita que apresentam essa morfologia, podem gerar elevados valores de resistência mecânica aos materiais cerâmicos.

Figura 18 – Amostra sinterizada a 1250°C.



Fonte: Autoria própria, 2021.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho propôs realizar o estudo da viabilidade da utilização do resíduo da bauxita proveniente da empresa Hydro Alunorte, assim, como investigar a influência da temperatura nas propriedades cerâmicas dos agregados sintéticos.

A partir dos resultados, pode-se concluir que:

- A utilização do resíduo a bauxita gerado pela Hydro Alunorte na produção de agregados sintéticos é uma alternativa viável e ecologicamente correta, pois, promove uma nova destinação deste resíduo;
- O aumento da temperatura influencia consideravelmente na diminuição da massa específica aparente, onde, a 1200° c a massa específica medida foi de 2,15 g/cm³, enquanto a temperatura de 1250° c, foi auferida massa de 1,88 g/cm³;
- Observaram-se mudanças nas propriedades de absorção de água e porosidade aparente, conforme houve a elevação da temperatura.
- Observa-se também com a utilização do microscópio eletrônico de varredura a presença da fase mulita nos agregados sintéticos.

5.1 Proposta para trabalhos futuros

- Investigar as propriedades mecânicas dos agregados nesta e outras composições;
- Utilizar em escala piloto um forno rotativo para o processo de produção ser mais rápido.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABAL. **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO**, 2005
- ABAL. **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO**, 2016.
- ABAL - **ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO** – 2021.
- ALUNORTE. Relatório Anual. **Relatório da Administração**, 2008.
- ALUNORTE. Relatório Anual. **Relatório da Administração**, 2011.
- ASCENSÃO, Guilherme *et al.* **Red mud- Based geopolymers with tailored alkali diffusion properties and Ph buffering ability**. Journal of Cleaner Production, [s. l.], v. 148, p. 23-30, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA. ABCERAM. Disponível em: <<https://abceram.org.br/>>. Acesso em: março de 2021.
- ASSOCIAÇÃO, BRASILEIRA DE CERAMICA. ABCERAM. Disponível em: <https://abceram.org.br/materias-primas-naturais/>. Acesso em: 19 mar. 2021.
- BARRAD, P., GADEAU, R. **Production del alumínio**. In: Bilbao, U., Enciclopédia do Alumínio, 1967.
- BOTELHO, F. A., **Estudo da influência da adição de óxido de cálcio e óxido de magnésio na neutralização e estabilização da alcalinidade do resíduo de bauxita através da reação com dióxido de carbono**. Tese de doutorado. UFPA, Belém 2017.
- BUNERTT, Annahid. **A Sulanca no cenário da " Revolução Industrial" brasileira**. Revista Labor, [s. l.], ano 2018, v. 19, ed. 04, p. 116-132, 2018.
- BRINDLEY, G. W., NAKAHIRA, M. **New concept of the transformation sequence of kaolinite to mullite**, Nature, v. 181, pp. 1333-1334, 1958.
- 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, pp. 55-63, 2005.
- 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**, Revista Cerâmica, v. 54, pp 404-410, 2008.
- CALLISTER, W. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

CANDIDO, 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.

CONSTANTINO, V. L. et al. **Preparação de compostos de alumínio a partir da bauxita: considerações sobre alguns aspectos envolvidos em um experimento didático.** Química Nova, São Paulo, v. 25, n. 3, p. 490-498, 2002.

CUNHA, E. J. S.; **Influência do uso de resíduo do processo bayer nas propriedades térmicas e mecânicas de compósitos de base polimérica reforçados com fibra de curauá (ananas lucidus. mill).** Tese de doutorado. UFPA, Belém, 2015.

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 OLIVEIRA JÚNIOR, Agostinho Alves *et al.* **Propriedades mecânicas e análise microestrutural de um concreto produzido com agregado da região Amazônica brasileira.** Revista Matéria, [s. l.], v. 24, ed. 04, 2018.

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

EVANS, K. **Success and challenges in the management and use of bauxite residue.** In: Pontikes Y (ed) **Bauxite residue valorisation and best practices conferences**, Leuven, Belgium, October 2016, pp 113–128.

EVANS, K., NORDHEIM, E., TSESMELIS, K., **"Bauxite Residue Management"**, Light Metals 2012, pp63-66, TMS, Wiley, Orlando, Fev. 2012.

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

FARIA, J. S. **Incorporação de resíduo pó de borracha de pneus inservíveis em cerâmica vermelha.** Orientador: Carlos Maurício Fontes Vieira. 2015. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Faculdade de Engenharia de Materiais, Campos dos Goytacazes, 2015.

FEI, LYU *et al.* **EFFICIENT REMOVAL OF Pb(II) IONS FROM AQUEOUS SOLUTION BY MODIFIED RED MUD.** Journal Hazardous Materials V.406, China, 2021

FROTA, C.A; SILVA, A.C.L. **Estudo da viabilidade econômica para produção de agregado sinterizado de argila calcinada.** Revista Cerâmica, v. 59, p. 309-317, 2013.

GOMES, P. C. C.; ALENCAR, T. F. F.; SILVA, N. V.; MORAES, K. A. M.; ÂNGULO, S. C; **Obtenção de concreto leve utilizando agregados reciclados**, Ambiente Construído, v. 15, n. 3, 2015, pp. 31-46.

GREEN, A. T.; STEWART, G. H. **Ceramics - A Symposium**, The British Ceramic Society, 1953.

Greg Power, Joanne S.C. Loh, Johannes E. Wajon, Francesco Buseti, Cynthia Joll, **A review of the determination of organic compounds in Bayer process liquors**, Analytica Chimica Acta, Volume 689, Issue 1, 2011.

HILDEBRANDO E. A., SOUZA, J. A. S., NEVES, R. F., 1999, **Aplicação do rejeito do processo Bayer (lama vermelha) como matéria-prima na indústria de cerâmica estrutural**. In: Anais do 43º Congresso Brasileiro de 92 Cerâmica e 4º Congresso de Cerâmica do Mercosul, pp. 28101-28111, Florianópolis, SC, Brasil.

HILDEBRANDO, E. A. **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 ALUNORTE, Alumina do Norte do Brasil S.A.. "Relatório Anual, Barcarena, Pará", 2012.

KRAUSMANN, F., WIEDENHOFER, D., LAUK, C., et al., "**Global socioeconomic material stocks rise 23-fold over the 20th century and require half of annual resource use**", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 114, pp. 1880-1885, 2017

KUMAR, S.; KUMAR, R.; BANDOPADHYAY, A. T. **Innovative methodologies for the utilization of wastes from metallurgical and allied industries**. *Resources, Conservation and Recycling*, 2006.

LEMOUGNA, Patrick N *et al.* **Syntheses and characterization of low Temperature (< 800°C) ceramics from red mud geopolymer precursor**. *Construction Building Materials*, China, v. 131, ed. 04, p. 564-573, 2017

LI, Guanghui *et al.* **Stepwise Extraction of valuable components from red mud based on reductive coasting with sodium salts**. *Journal Hazardous Materials*, [s. l.], v. 35, p. 87-95, 2014.

LIMA, M. S. S.; THIVES, L. P.; HARITONOV, V.; BAJARS, K. **Red Mud Application in Construction Industry: review of benefits and possibilities** *Materials Science and Engineering*, p. 251, 2016

LISBOA, Rose Suellen (org.). **Guia de elaboração de trabalhos acadêmicos**. 2. ed. rev. atual. e aum. Belém: Universidade federal do pará, biblioteca central, 2021.

LIU, W.; YANG, J.; XIAO, B. **Application of Bayer red mud for iron recovery and building material production from aluminosilicate residues**. Journal of Hazardous materials, 2015.

LUO, Yang *et al.* **Mullite- based ceramic tiles produced solely from high-alumina fly ash: Preparation and sintering mechanism**. Journal of Alloys and Compounds, China, v. 732, p. 828-837, 2018.

MAGALHÃES, E.M., **Estudo da extração de compostos de ferro da lama vermelha visando a extração e/ou recuperação de compostos de titânio**. Tese de Doutorado, UFPA, Belém, 2012.

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

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

MÖRTEL, H., KREBS, S., PHAM-GIA, K. **Mulliten kristallisierung in der porcelan**, Deutschen Keramischen Gesellschaft, v. 77, pp. 26-35, 2000.

NORTON, F. H. **Introdução a tecnologia cerâmica**. São Paulo, Edgar Blucher. 1973.

O'CONNOR, D. J. **Alumina extraction from non bauxite materials**. Aluminum – verlag Gmbh. Disseldorf, 1988.

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

ÖRTEL, H., HEIMSTADT, K. **Ceramics, Werkstoffe und Korrosion**. Materials and Corrosion, v. 45, pp. 128-136. 1994

PRADHAN, JDAS *et al.* **Characterization of Indian red muds and recovery of their metal values**. Light Metals, pp. 87-92, 1996.

RACANELLI, L. A. **Caracterização e determinação das propriedades tecnológicas de massas argilosas para fabricação de blocos de vedação**. 2017. 96 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal do Pará, Belém, 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, pag 3803-3812, 2020.

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

ROSSIGNOLO, J.A. **Concreto Leve Estrutural.** 1º Edição, Ed. Pini, São Paulo, 2011.

ROSÁRIO, KATIA ALRELHIA. **CONCRETO COM UTILIZAÇÃO DE AGREGADO GRAÚDO SINTÉTICO PRODUZIDO A PARTIR DA LAMA VERMELHA: ESTUDOS DE DOSAGEM, PROPRIEDADES E MICROESTRUTURA.** 2013. 78 f. Tese de Doutorado (Doutor) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Belém, 2013

S. ANANTHAKUMAR; M. JAYASANKAR; K.G.K, WARRIER. **Microstructural, mechanical and termal caracterisation of sol- gel – derived Aluminium titanate-mullite ceramic composites.** Acta Mater, v 54, pp.2965-2973, 2006.

SAHU, Ramesh Chandra *et al.* **Neutralization on of red mud using CO2 sequestration cycle.** Journal Hazardous Materials, India, ano 2018, v. 179, p. 28-34, 2010.

SANTIS, B.C; ROSSIGNOLO, J.A. **Caracterização das massas cerâmicas do estado de São Paulo para a produção de agregados leves para concretos.** Revista Ceramica, v. 59,pp. 350-359, 2013.

SANTOS, D. H. **Utilização do rejeito do processo Bayer como matéria prima na produção de agregados leves.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Pará. 2011.

SANTOS, D. H. **Influência da Silica e temperatura nas propriedades físicas dos agregados sintéticos produzidos com o resíduo do processo Bayer .** Tese de Doutorado. Universidade Federal do Pará. 2019.

SANTOS, P.S. **Ciência e Tecnologia de Argilas.** 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1989.

SILVA FILHO, E. B. *et al.* **Lama vermelha da indústria de beneficiamento de alumina: produção, características, disposição e aplicações alternativas.** Revista Matéria, v. 12, n. 2, 2007.

SOUZA, J. **Estudo e avaliação do uso de resíduos do processo Bayer como matéria prima na produção de agregados sintéticos para a construção civil.** 2010. Tese. (Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia), Universidade Federal do Pará, Belém, 2010.

SOUZA SANTOS, P., **Ciência e tecnologia de argilas.** 2.ed. Edgard Blücher, 1989. 408 p. v. 1.

TSAKIRIDIS, P. E., AGATZINI-LEONARDOU, S., OUSTAKADIS, P., **Red mud addition in the raw meal for the production of cement portland clinker**, Journal of Hazardous Materials B116, pp. 103-110, 2004.

VAN VLACK, L. H. **Propriedades dos materiais cerâmicos**. São Paulo: Edgard Blücher, 1973.

VENÂNCIO, L. C. A., **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**. Tese de Doutorado, UFPA, Belém, 2013.

VICK, S. G. Planning, **Design and Analysis of Tailings Dams**. United States of America, 1983.

YALÇIN, N., SEVINÇ, V., **“Utilization of bauxite waste in ceramic glazes”**, Ceramics International, n 26, pp. 485-493, 2000.

ZHU, Shufa *et al.* **Removal of fluorine from red mud (bauxite residue) by electrokinetics**. Electrochimica Acta, China, v. 242, ed. 78, p. 300-306, 2017.