

## **Análise sistemática da literatura sobre o uso do rejeito de lama vermelha para a produção de agregados sintéticos leves**

**Systematic review of the literature on the use of red mud tailings for the production of lightweight aggregates**

**Revisión sistemática de la literatura sobre el uso de relaves de lodo rojo para la producción de agregados sintéticos levianos**

Recebido: 03/03/2022 | Revisado: 11/03/2022 | Aceito: 25/03/2022 | Publicado: 31/03/2022

**Adiel José Passos da Cunha Junior**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9220-3520>

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará, Brasil

E-mail: [adiel.junior@ifpa.edu.br](mailto:adiel.junior@ifpa.edu.br)

**Dênis Carlos Lima Costa**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3207-6934>

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará, Brasil

E-mail: [denis.costa@ifpa.edu.br](mailto:denis.costa@ifpa.edu.br)

**Alcebiades Negrão Macêdo**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4580-6679>

Universidade Federal do Pará, Brasil

E-mail: [anmacedo@ufpa.br](mailto:anmacedo@ufpa.br)

### **Resumo**

A lama vermelha é o principal subproduto proveniente do beneficiamento da bauxita, conhecido mundialmente como processo Bayer. Sua produção é crescente em todo o mundo, tendo como destaque no Brasil, os estados do Pará e Minas Gerais. No entanto, devido às características químicas deste rejeito, bem como a alta quantidade que é gerada, os órgãos ambientais vêm exigindo cada vez mais que as fontes geradoras criem métodos de reutilização deste rejeito, a fim de colaborar com a logística reversa deste material. Nesse sentido, diversos estudos têm sido realizados visando o reaproveitamento da lama vermelha para a produção de novos materiais, dentre os quais se destaca o agregado leve, que pode ser empregado no setor da construção civil, que é uma das maiores fontes consumidoras deste tipo de produto. Neste viés, o presente estudo avaliou, a partir de uma revisão sistemática da literatura, o potencial de aplicação da lama vermelha na fabricação de agregados leves. Dados importantes como: composição química; densidade; granulometria; resistência mecânica; absorção de água; temperatura de sinterização e aplicação em concretos foram analisados e comparados com as normas pertinentes sobre o assunto. Os resultados são animadores, comprovando que em todos os parâmetros analisados os agregados reciclados produzidos atenderam aos padrões normativos exigidos atualmente, tendo desempenho semelhante aos de agregados convencionais. Concluiu-se, portanto, que a lama vermelha possui viabilidade técnica para fabricação de agregados leves, confirmando a potencialidade da logística reversa do rejeito para este fim.

**Palavras-chave:** Agregado leve; Lama vermelha; Logística reversa; Revisão da literatura.

### **Abstract**

Red mud is the main by-product from bauxite processing, known worldwide as the Bayer process. Its production is growing all over the world, with a highlight in Brazil, the states of Pará and Minas Gerais. However, due to the chemical characteristics of this waste, as well as the high amount that is generated, environmental agencies are increasingly demanding that the generating sources create methods for reusing this waste, in order to collaborate with the reverse logistics of this material. In this sense, several studies have been carried out aiming at the reuse of red mud for the production of new materials, among which the light aggregate stands out, which can be used in the civil construction sector, which is one of the largest consumer sources of this type of product. Based on this bias, the present study evaluated, based on a systematic literature review, the potential application of red mud in the manufacture of lightweight aggregates. Important data such as: chemical composition; density; granulometry; mechanical resistance; water absorption; sintering temperature and application in concrete were analyzed and compared with the relevant standards on the subject. The results are encouraging, proving that in all parameters analyzed, the recycled aggregates produced met the normative standards currently required, having a performance similar to that of conventional aggregates. Therefore, it was concluded that red mud has technical feasibility for the manufacture of light aggregates, confirming the potential of reverse tailings logistics for this purpose.

**Keywords:** Light aggregate; Red mud; Reverse logistic; Literature revision.

## Resumen

El lodo rojo es el principal subproducto del procesamiento de la bauxita, conocido mundialmente como proceso Bayer. Su producción está aumentando en todo el mundo, con énfasis en Brasil, los estados de Pará y Minas Gerais. Sin embargo, debido a las características químicas de este relave, así como a la alta cantidad que se genera, los organismos ambientales han venido exigiendo cada vez más a las fuentes generadoras que creen métodos de reutilización de este relave, con el fin de colaborar con la logística inversa de este material. En este sentido, se han realizado varios estudios con el objetivo de reutilizar el lodo rojo para la producción de nuevos materiales, entre los que se destaca el árido ligero, que puede ser utilizado en el sector de la construcción civil, que es una de las mayores fuentes de consumo de este tipo de material producto. En ese sesgo, el presente estudio evaluó, a partir de una revisión sistemática de la literatura, el potencial de aplicación de los lodos rojos en la fabricación de agregados livianos. Datos importantes como: composición química; densidad; granulometría; resistencia mecánica; absorción de agua; Se analizó la temperatura de sinterización y aplicación en el concreto y se comparó con las normas pertinentes sobre el tema. Los resultados son alentadores, demostrando que en todos los parámetros analizados, los áridos reciclados producidos cumplían con los estándares normativos exigidos actualmente, con un comportamiento similar al de los áridos convencionales. Se concluyó, por tanto, que el lodo rojo tiene factibilidad técnica para la fabricación de agregados ligeros, confirmando el potencial de la logística inversa de los relaves para este fin.

**Palabras clave:** Árido liviano; Barro rojo; Logística inversa; Revision de literatura.

## 1. Introdução

As atividades industriais de extração mineral têm crescido a cada dia mais no mundo todo, contribuindo de forma significativa para alavancar a economia dos países. Segundo dados da Alcoa (2021), a Amazônia brasileira possui uma das maiores e mais diversificadas reservas minerais do planeta. A importância econômica do setor mineral, em nível agregado, é considerável. No Estado do Pará, principal Estado mineiro da Amazônia, o setor mineral responde por 40% das exportações e 12% do Produto Interno Bruto estadual.

Apesar de indubitavelmente gerar riqueza e crescimento econômico, sendo um dos mais importantes setores da economia brasileira, a indústria extrativa mineral está entre as atividades antrópicas que mais causam impactos socioeconômicos e ambientais negativos, afetando, portanto, o território onde se realiza a mineração (Araújo *et al.*, 2014).

Um dos principais minerais extraídos no Pará é a bauxita, que é amplamente utilizada pela indústria de alumínio. Segundo o Instituto Brasileiro de Mineração - IBRAM (2021), 98% da produção de bauxita no Brasil, é destinada às refinarias de alumina, enquanto que o restante dirige-se à indústria de produtos refratários e químicos. É importante destacar aqui que, as maiores reservas desse minério, o equivalente a 95%, localizam-se no estado do Pará.

Conforme dados extraídos da Associação Brasileira de Alumínio - ABAL, a bauxita é constituída por um conglomerado de óxidos metálicos, predominantemente óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ), com teores da ordem de 40% a 45%, sendo composta por um ou mais hidróxidos de alumínio, encontrados em proporções variadas (gibsite e os polimorfos boemita e diásporo), diversas misturas de sílica, óxido de ferro, dióxido de titânio, silicato de alumínio e outras impurezas presentes em menores quantidades. Tais características fazem com que este seja o minério mais importante para a produção de alumínio.

O procedimento utilizado para o refino da bauxita, mundialmente conhecido como processo Bayer, desenvolvido e patentado pelo austríaco Karl Josef Bayer em 1888, inicialmente tinha como principal objetivo atender a demanda da indústria têxtil. No entanto, atualmente este é o método mais utilizado para a obtenção do alumínio (Cunha & Corrêa, 2011; Rosário, 2013).

O processo Bayer inicia-se com a preparação das matérias-primas, e posteriormente prossegue com as etapas de digestão, clarificação/filtração e precipitação do hidrato, calcinação e conversão em alumina (ALCOA, 2021). Vilar (2002) argumenta que este processo é baseado no fato de que os hidratos de alumínio são muito solúveis em solda caustica o que não ocorre com os demais óxidos constituintes da bauxita, não sendo aproveitáveis.

Um dos maiores problemas enfrentados pela indústria de beneficiamento de bauxita é em relação à destinação ambientalmente adequada para o resíduo gerado no processo de clarificação, denominado lama vermelha, por este demandar

grandes áreas para o seu alocamento, bem como ao fato de o tratamento dessas áreas (lagoas de deposição) ser muito oneroso. Segundo Rosário (2013), para a construção de uma bacia de estocagem investe-se algo em torno de US\$ 8,3 milhões. Segundo Medeiros e Lima (2021) os rejeitos das indústrias minerais podem ser dispostos em diferentes tipos de estruturas, tais como, cavas exauridas, minas subterrâneas, pilhas, depósitos, ou barragens de rejeitos, mas que, independentemente da estrutura utilizada para contenção, a disposição de rejeitos sempre pode apresentar riscos.

Algumas das dificuldades encontradas para a logística reversa da lama vermelha estão relacionadas, principalmente, às suas características químicas e mineralógicas, em razão dos diversos minerais presentes na sua composição. Ambroise e Péra (2000) explicam que a composição química deste material varia de acordo com a qualidade da bauxita e do processo de produção da alumina, podendo conter minerais que não são dissolvidos no processo Bayer, como por exemplo, os óxidos e hidróxidos de alumínio (gibssita, boemita e diásporo), os óxidos e hidróxidos de ferro (hematita e goethita), além dos neo-formados como a sodalita e a cancrenita, bem como os elementos-traço como V, Ga, P, Mn, Zn, Th, Cr e Nb.

Existem espalhadas pelo planeta 85 plantas de produção de alumina, com um rendimento em termos de geração de lama vermelha de cerca de 1,2 t de lama/t de alumina produzida (Tsakiridis, *et al.*, 2004). Segundo Guo *et al.*, (2018) são geradas anualmente 169 milhões de toneladas de rejeitos em todo o mundo, com cerca de 2,5 bilhões de toneladas armazenadas.

A lama vermelha pertence a um grupo de rejeitos denominados "*tailings*" que são resultantes do beneficiamento de minérios pela indústria extrativista mineral. Estes rejeitos 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 solda caustica empregada no refino da alumina. Os "*tailings*" caracterizam-se por serem lamas formadas por partículas muito finas (Fahey, *et al.*).

Em relação à classificação ambiental, Bertocchi *et al.*, (2006) afirmam que, devido à natureza altamente cáustica da lama vermelha, a mesma é classificada como resíduo perigoso e, por isso, é essencial que haja uma neutralização do produto antes do seu transporte. Levando em consideração os requisitos propostos pela NBR 10004 (ABNT, 2004), a lama vermelha brasileira pode ser classificada como resíduo perigoso-classe I, por apresentar corrosividade acima dos limites estabelecidos pela referida norma (Ribeiro e Morelli, 2008). No entanto, não há um consenso quanto à periculosidade do material, já que em outras pesquisas como a de Venâncio (2013), o rejeito é classificado como pertencente à classe II (resíduo não inerte), mesma especificação adotada pela agência de proteção ambiental dos Estados Unidos (EPA).

A reciclagem de resíduos é uma ação importante e necessária para amenizar os impactos ambientais decorrentes dos processos produtivos das grandes indústrias. Dessa forma, esta área de pesquisa tem se intensificado nas últimas décadas pelo mundo, pois tanto o governo como a iniciativa privada têm interesse nos resultados decorrentes destes trabalhos (Santos, 2019; Cunha & Corrêa, 2011).

Segundo Santos (2011), diversas empresas têm investido em pesquisa e tecnologia para possibilitar o reaproveitamento dos resíduos gerados em seus processos produtivos, buscando formar produtos reciclados de qualidade, que possam ser reinseridos na cadeia produtiva, de forma a propiciar maior eficiência ao sistema, bem como maior economia nos custos com a destinação final dos subprodutos gerados. Neste contexto, a lama vermelha tem sido alvo de diversos estudos que têm buscado demonstrar possíveis alternativas para a aplicação deste rejeito.

Devido suas características físico-químicas, a lama vermelha possui potencial para ser utilizada em diversas aplicações, a exemplo da indústria cerâmica, que tem interesse neste material pelo fato de o mesmo ser quimicamente inerte. Além disso, a variabilidade química da matéria-prima argilosa é um fator que contribui para a adição da lama vermelha no processamento cerâmico (Santos, *et al.*, 2021). Este rejeito também pode ser utilizado para a produção de clínquer, por apresentar um alto teor de ferro, o que favorece as reações no estado sólido, de forma a obter um vidro a temperaturas inferiores e acelerando as reações

de clinquerização, com a formação de aluminatos e silicatos de ferro e cálcio, melhorando a qualidade do cimento e produzindo uma significativa economia no processo (Tsakiridis, 2004).

Pesquisas mais recentes têm indicado o potencial do uso da lama vermelha para a confecção de agregados sintéticos graúdos que seriam empregados em substituição aos agregados convencionais para a produção de concreto. Os resultados têm se mostrado animadores, Souza (2010) concluiu que este rejeito quando adicionado a misturas com sílica e argila é capaz de formar agregados que atendem aos requisitos necessários para a comercialização.

Reis (2014) afirma que os agregados por ele produzidos apresentaram, em média, uma massa específica abaixo de  $2\text{g/cm}^3$ , e a média dos valores de absorção de água e porosidade diminuíram comparando com o aumento da massa específica aparente. Por isso, a produção de agregado a partir de lama vermelha pode ser considerado viável para utilização na construção civil.

Os agregados sintéticos leves são produzidos a partir do aquecimento da matéria-prima, triturada, ou moída e na maioria das vezes pelotizada, feito geralmente, em forno rotativo. Pode também ser obtido por sinterização contínua. Nesse caso, o material bem umedecido é transportado numa esteira, sob queimadores, de modo que o calor atinge gradualmente toda a espessura da camada. Estes tipos de agregados são obtidos geralmente de argilas, folhelhos ou de outros materiais (resíduos industriais) que possuam propriedades peculiares de se expandirem quando submetidos a processos térmicos adequados (Santos, 2019).

A 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. Este fenômeno é um dos principais fatores que precisam ser analisados quando se fala em produção de agregados sintéticos.

Alguns autores como Mörtel e Heimstadt (1994) associam as condições necessárias, para a sinterização (fechamento dos poros) juntamente com o aumento na resistência mecânica, no caso dos materiais cerâmicos, com a eficiência das reações de estado sólido, que acontecem no interior do material responsável pela formação de mulita e pela fase amorfa (vidro). Estas transformações podem ser controladas de quatro formas: pela composição da mistura, pela granulometria da matéria-prima, pela temperatura de queima e pelo tempo de exposição a esta temperatura. O material pode ainda apresentar piro-expansão, ou seja, na temperatura de queima, a expansão deste material sintético produz uma estrutura celular, essencial para a fabricação de agregado leve de alta qualidade com massa específica  $< 1,5\text{ g/cm}^3$  (Santos, 2019).

Face ao exposto, levando em consideração que um dos principais desafios para a utilização da lama vermelha para a produção de agregados sintéticos é justamente o controle dos parâmetros presentes no processo de sinterização citados acima. O presente trabalho buscará a partir de uma revisão sistemática da literatura, elucidar tais questões de forma a indicar a possível viabilidade técnica do uso da lama vermelha para a produção de agregados sintéticos leves. Espera-se também que esta pesquisa possa contribuir para identificar lacunas existentes na literatura pesquisada a fim de gerar oportunidades para futuros trabalhos.

## 2. Metodologia

O presente trabalho fez uso de uma abordagem bibliográfica, tendo como finalidade o aprimoramento e a atualização do conhecimento, por meio de uma investigação científica de estudos já publicados. A questão central abordada nesta pesquisa é o controle dos parâmetros presentes no processo de sinterização dos agregados sintéticos leves produzidos a partir da lama vermelha.

Busca-se a partir deste estudo indicar a viabilidade técnica do uso da lama vermelha para a produção de agregados sintéticos que podem ser utilizados em concreto para aplicações diversas no setor da construção civil.

Segundo Santos e Galvão (2014), as revisões sistemáticas da literatura são consideradas estudos secundários, que têm nos estudos primários sua fonte de dados. Entende-se por estudos primários os artigos científicos que relatam os resultados de pesquisa em primeira mão. Para que seja realizado este tipo de trabalho é importante que os pesquisadores elaborem uma pergunta de pesquisa analítica, que investiga a relação entre dois eventos, e é formada por diversos componentes. Quatro deles estão relacionados no anagrama PICO: população; intervenção (ou exposição); comparação; e desfecho (O, *outcome*, do inglês).

Neste sentido para a seleção das obras que seriam utilizadas nesta pesquisa, buscou-se estabelecer estes critérios específicos, conforme apresenta a Tabela 1, a seguir.

**Tabela 1:** Critérios PICO utilizados.

CRITÉRIOS P.I.C. O	DESCRIÇÃO
População	Produção de agregados sintéticos
Intervenção	Com lama vermelha
Comparação	Com agregados naturais
Resultado	Verificar viabilidade técnica, proporcionar sustentabilidade

Fonte: Autores (2022).

As obras utilizadas nesta pesquisa constam de publicações presentes no portal eletrônico de periódicos da CAPES, no qual foram escolhidos artigos provenientes de periódicos revisados por pares, teses de doutorado e dissertações de mestrado. Três palavras-chave foram associadas ao tema: lama vermelha (*red mud*), sustentabilidade (*sustainability*) e agregados sintéticos (*synthetic aggregates*). Utilizou-se as palavras-chave para elaborar a *string* de busca: “*red mud*”, “*sustainability*” e “*synthetic aggregates*”. As buscas foram realizadas no período dos últimos 11 anos – julho de 2010 a julho de 2021.

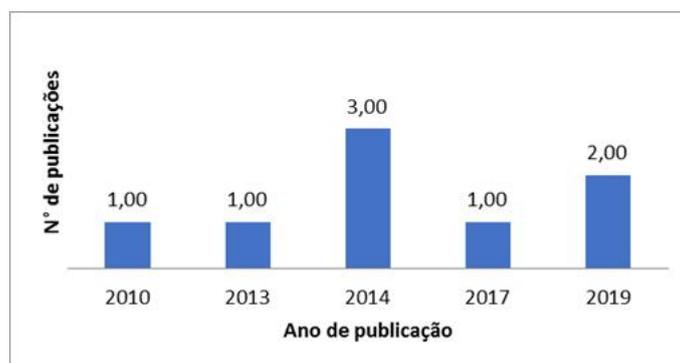
Os estudos escolhidos constaram de publicações em inglês ou português. Utilizou-se 4 critérios para exclusão de pesquisas: (1) O estudo não foi publicado em periódico, congresso ou livro; (2) A pesquisa não apresenta contribuições na área da engenharia; (3) A publicação apresenta o uso de lama vermelha para outras finalidades; (4) Não é possível ter acesso ao estudo. Em seguida, eliminou-se os estudos duplicados, restando apenas 9 estudos, considerados relevantes para esta área de pesquisa, os quais estão apresentados na Tabela 2. Um esquema dos estudos publicados nos últimos anos sobre o tema, relevantes para a abordagem da presente pesquisa, é apresentado na Figura 1. Verifica-se que esta área de estudo ainda é incipiente.

**Tabela 2:** Critérios PICO utilizados.

BASE DE DADOS	TOTAL INICIAL	REstante APÓS CRITÉRIO DE EXCLUSÃO				TOTAL DE ESTUDOS APÓS APLICAÇÃO DOS CRITÉRIOS DE SELEÇÃO
		1	2	3	4	
Publicações em periódicos nacionais	120	110	57	45	21	3
Publicações em periódicos internacionais	67	62	60	23	11	2
Dissertação de mestrado	30	28	26	16	10	2
Tese de doutorado	15	13	12	7	4	2
<b>TOTAL GERAL DE ARTIGOS UTILIZADOS:</b>						<b>9</b>

Fonte: Autores (2022)

**Figura 1:** Gráfico com o quantitativo de trabalhos por ano de publicação.



Fonte: Autores (2022).

### 3. Resultados

#### 3.1 Características da lama vermelha

##### 3.1.1 Composição química

Segundo Souza *et al.*, (2020) a obtenção de agregados sintéticos de baixa densidade depende, em grande parte, da expansão do material quando submetido à altas temperaturas, sendo que este fenômeno está intimamente relacionado à composição química da matéria-prima utilizada. Dessa forma, um critério relevante para a produção de agregados sintéticos fabricados com o uso de lama vermelha é a correta identificação das proporções dos componentes químicos desse material.

A composição química da lama vermelha, por sua vez, depende da natureza da bauxita e também da técnica empregada no processo Bayer em cada planta industrial. Geralmente, este subproduto absorve todo o ferro, titânio e sílica presentes na bauxita, além do alumínio que não foi extraído durante o refino, combinado com o sódio sob a forma de um silicato hidratado de alumínio e sódio de natureza zeolítica. Adicionalmente, óxidos de V, Ga, P, Mn, Mg, Zn, Th, Cr, Nb podem estar presentes como elementos-traço (Souza, 2010).

Face ao exposto, a Tabela 3 apresenta as composições químicas da lama vermelha estudada nas pesquisas utilizadas. Esta variável pode ser obtida por meio da análise química via úmida, com o auxílio do método de absorção atômica ou ainda através da técnica de fluorescência de Raios-X. A maioria dos estudos fez uso desta última.

**Tabela 3:** Composição química dos resíduos de caulim estudados.

ESTUDO	COMPOSIÇÃO QUÍMICA											
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MgO	K <sub>2</sub> O	ZrO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
[19]	27,05	17,12	1,26	24,10	4,19	13,68	0,16	-	-	0,50	-	-
[5]	30,55	18,13	1,27	22,84	3,88	11,50	0,08	-	-	0,30	0,05	-
[18]	39,00	17,89	0,91	18,00	4,56	9,97	-	-	0,18	-	-	0,13
[16]	34,00	19,90	0,87	19,00	5,00	8,58	-	0,04	0,12	-	-	-
[24]	29,54	17,28	1,08	22,54	4,56	12,50	0,28	0,15	0,03	-	-	-
[16]	38,00	19,90	0,87	19,00	3,80	8,50	-	0,04	0,12	-	-	0,28
[25]	37,16	2,34	1,23	35,50	6,18	8,49	-	-	-	-	-	-

Fonte: Autores (2022).

É importante destacar que os autores avaliados fizeram uso de lama vermelha proveniente de diferentes estados brasileiros, desta forma, é possível observar certa singularidade da composição dos óxidos presentes no material estudado. Todavia, de forma geral, constata-se que a lama vermelha apresenta um considerável teor de ferro, alumínio e silício, elementos essenciais para que ocorra a expansão pirolástica em temperaturas acima de 1300°C NBR 12655 (ABNT, 2015).

Segundo Reis (2014) tais óxidos, em maior concentração, têm contribuição importante nas reações de estado sólido e favorecem a formação da fase vítrea e da mulita nos agregados sintéticos tendo uma relação direta com a resistência mecânica destes agregados. O sódio proveniente da NAOH do processo **é um dos principais fundentes**.

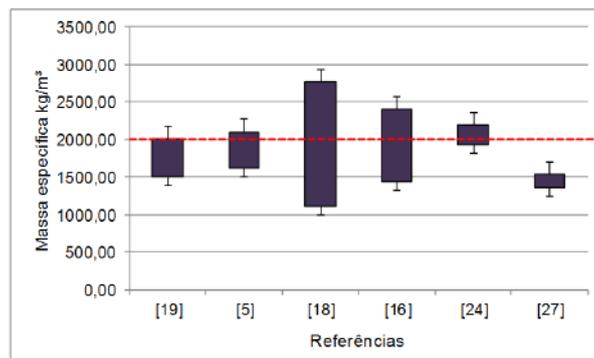
### 3.2 Características do agregado sintético produzido com lama vermelha

#### 3.2.1 Densidade

Segundo a NBR 12655 (ABNT, 2015), um agregado para ser classificado como leve deve apresentar um valor de massa específica aparente - MEA, inferior a  $2\text{g/cm}^3$ , agregados com valores superiores a este são considerados tradicionais. De acordo com as normas europeias, o agregado leve, destinado à aplicação em concretos e argamassa, deve possuir massa unitária inferior a  $1200\text{ kg/m}^3$  e massa específica não superior a  $2000\text{ kg/m}^3$ . Santos *et al.*, (2014), por sua vez, afirmam que os agregados leves são aqueles que geralmente possuem massa unitária inferior a  $1120\text{ kg/m}^3$ , tendo esta baixa densidade diretamente relacionada à sua microestrutura celular ou altamente porosa. É importante se ater para o fato de que agregados muito porosos normalmente são mais frágeis, sendo mais indicados para a produção de concretos isolantes, sem função estrutural.

A Figura 2, a seguir, apresenta os valores máximos e mínimos encontrados, por cada um dos autores referenciados nesta pesquisa, para a massa específica do agregado sintético produzido com lama vermelha. Em relação à massa unitária, nenhum dos estudos abordados efetuou a aferição desta grandeza.

**Figura 2:** Gráfico da massa específica dos agregados estudados.



Fonte: Autores (2022).

Analisando o gráfico, verifica-se uma grande variação de resultados, contudo, na maioria dos estudos, os valores aferidos encontram-se dentro dos limites normativos estabelecidos para o agregado ser considerado como leve.

Conforme explica Rosário (2013), várias propriedades dos concretos são influenciadas pela substituição de agregados tradicionais por agregados leves, dentre as quais massa específica, trabalhabilidade, resistência mecânica, módulo de elasticidade, propriedades térmicas, retração, fluência e a espessura da zona de transição entre o agregado e a matriz de cimento.

A maioria dos autores constatou que empregando-se temperaturas de queima acima de  $1200^{\circ}\text{C}$ , bem como aumentando-se o teor de sílica na mistura, há a possibilidade de obtenção de agregados com uma menor massa específica, ou seja, estes dois fatores podem ser controlados de modo a produzir compósitos com densidade adequada para serem classificados como agregado leve.

### 3.2.2 Absorção de água

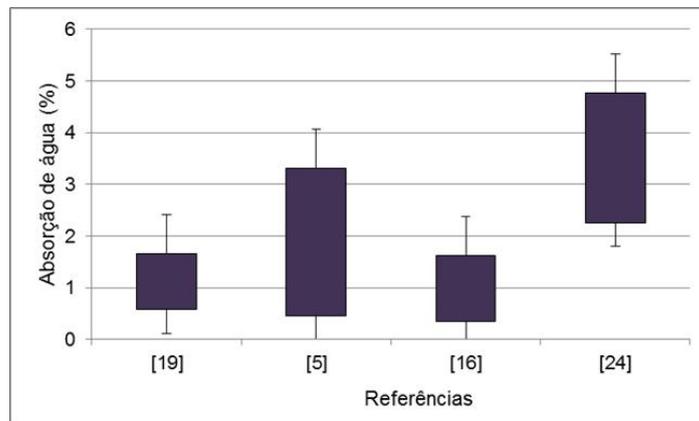
Segundo Tuan *et al.*, (2013) os agregados leves comerciais, normalmente tendem a apresentar uma absorção de água, após 24 horas de imersão, menor de 20%. As propriedades do concreto no estado fresco, bem como o processo de hidratação do cimento, são afetadas diretamente por esta propriedade.

Conforme explica Mehta e Monteiro (2008), a capacidade de absorção de água dos agregados, e a velocidade com que esse fenômeno ocorre, depende de alguns fatores, tais como: porosidade total; conectividade entre os poros; características da superfície do agregado e umidade do agregado antes da mistura.

Neste sentido, alguns autores como Tuan *et al.*, (2013) e Lau *et al.*, (2017), têm demonstrado que a morfologia do agregado tem grande relevância no controle da absorção de água. Um agregado com estrutura de poros mais conectados irá absorver maior quantidade de água quando comparado a um material que possua estrutura de poros isolados e superfície vítrea. A temperatura de queima tem papel fundamental no controle da capacidade de absorção de água, já que a sinterização da mistura promove a densificação das partículas, reduzindo a entrada de água na matriz do agregado.

A Figura 3 apresenta os resultados máximos e mínimos para a capacidade de absorção de água dos agregados sintéticos produzidos por diversos autores. Optou-se por apresentar os dados desta forma para a melhor visualização e compreensão dos resultados, já que as diversas pesquisas abordadas realizaram mais de uma composição para a produção de agregados, obtendo diversos valores, a depender dos fatores relacionados à produção do material, como temperatura de sinterização, matéria-prima empregada e porcentagem de lama vermelha inserida na mistura.

**Figura 3:** Gráfico de absorção de água dos agregados estudados.



Fonte: Autores (2022)

A partir da leitura do gráfico, nota-se uma grande variedade de resultados até mesmo para um mesmo autor. Tal fato pode estar atribuído, segundo relata Rosário (2013) a utilização de fornos inadequados para o processo de sinterização dos agregados, pois os mais indicados neste caso seriam os rotativos, por possibilitar uma distribuição adequada e homogênea da temperatura, o que não ocorreu nos trabalhos verificados. No entanto, ressalta-se aqui que todos os autores obtiveram resultados para absorção de água dentro do que estabelece as normas vigentes sobre o assunto, fato este que indica o potencial da lama vermelha para a produção de agregados sintéticos.

### 3.2.3 Porosidade

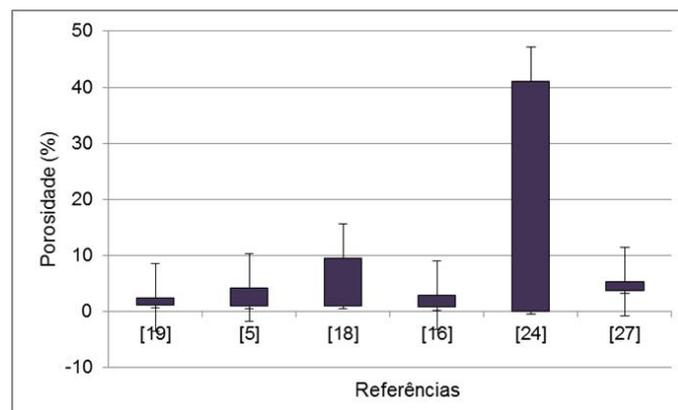
A porosidade está diretamente relacionada à capacidade de absorção de água do material, quanto maior o percentual de porosidade do material, maior será a capacidade de absorção de água do mesmo, e como já citado anteriormente, estes fatores impactam significativamente nas propriedades do concreto. De acordo com Rossignolo (2009), um alto percentual de absorção

de água no agregado pode causar danos no concreto em seu estado endurecido como: retração por secagem, aumento da massa específica e a redução da resistência ao fogo. Todavia, existem também alguns benefícios advindos de uma alta absorção de água do agregado, como a melhoria das propriedades da zona de transição entre o agregado e a pasta de cimento, com redução do efeito parede. Ademais, a água absorvida pelo agregado beneficia a cura interna do concreto.

Na Figura 4 é possível verificar os valores encontrados pelos autores englobados nesta pesquisa em relação ao percentual de porosidade do agregado sintético produzido. Existe uma grande discrepância de resultados entre as amostras analisadas pelos autores. A esse respeito, Santos *et al.*, (2014) explica que os valores da porosidade de cada agregado diminuem conforme há o aumento do teor de sílica na mistura. Isto ocorre devido o crescimento da camada vítrea do material, que se torna bastante espessa, chegando ao ponto de em alguns casos, apresentar um valor de porosidade muito próximo de zero.

Os resultados apresentados mostram a influência da sílica na formação de mulita secundária acicular, na relação estequiométrica com a Alumina em 3:2  $Al_2O_3:SiO_2$ , à medida que o teor de sílica livre aumenta a capacidade de formação de fase amorfa, produzindo mais vidro e consequentemente retendo mais voláteis e portando reduzindo a densidade do material (Santos *et al.*, 2014).

**Figura 4:** Gráfico da porosidade dos agregados sintéticos de lama vermelha.



Fonte: Autores (2022).

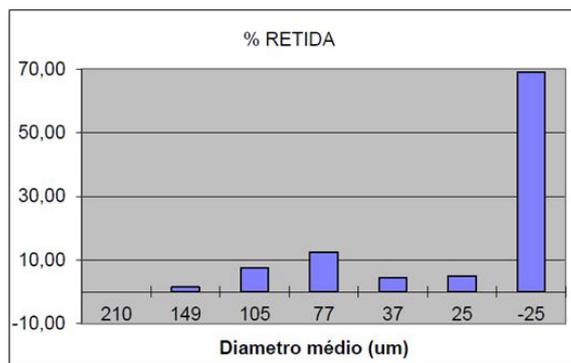
### 3.2.4 Granulometria

Em relação às dimensões das partículas, os agregados classificam-se de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2009) como graúdos e miúdos. Agregados graúdos são aqueles cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 4,75mm. O processo de fabricação de agregados sintéticos leves comerciais, em diversos países, resulta na obtenção de partículas com distribuição granulométrica variando entre 1 mm e 25 mm (Souza *et al.*, 2019).

Para Souza (2010), não existe uma granulometria ideal para um determinado agregado, o que se busca de modo geral, é a compatibilização entre os requisitos físicos e econômicos. Segundo Rossignolo (2009), o equilíbrio na distribuição granulométrica fará com que se produzam misturas de concretos mais trabalháveis e econômicas, além de proporcionar uma mistura mais compactada da massa de concreto, fazendo com que haja uma diminuição no volume dos vazios e, por consequência a diminuição dos espaços por onde possivelmente penetrariam os agentes agressivos ao concreto.

Entre os estudos utilizados como base para este trabalho, apenas um autor – Reis (2014) - apresentou os resultados referentes à distribuição granulométrica do resíduo de lama vermelha, conforme pode ser verificado na Figura 5. Para a distribuição granulométrica do agregado sintético produzido a partir deste material, também se verificou uma grande lacuna neste sentido, já que apenas Rosário (2013) e Santos (2019) ilustraram os resultados obtidos para esta grandeza.

**Figura 5:** Análise granulométrica da lama vermelha segundo Reis (2014).



Fonte: Autores (2022).

Ribeiro e Morelli (2008) afirmam que as características principais do resíduo de lama vermelha é a granulométrica (cerca de 95% < 44µm, 325#) e a área superficial (entre 13-22 m<sup>2</sup>.g<sup>-1</sup>). Este autor observou que a lama vermelha por ele estudada era caracterizada por apresentar 69% de suas partículas abaixo de 500# (25µm), o que significa uma amostra com granulometria muito fina, consequentemente uma área superficial elevada, isto facilitaria as reações de estado sólido para a produção do agregado sintético.

O agregado sintético produzido por Rosário (2013) obteve distribuição granulométrica variando de 4,8 mm a 25 mm, estando classificado segundo a NBR 12655 (ABNT, 2015) como agregado graúdo, o módulo de finura deste material foi de 3,8 e a dimensão máxima característica de 19 mm, mesma classificação obtida no trabalho de Santos (2019), todavia, neste caso o diâmetro médio do agregado variou de 6,98 mm a 7,33 mm, dependendo da composição da mistura utilizada.

### 3.2.5 Abrasão Los Angeles

Em relação aferição da resistência ao impacto e ao desgaste do agregado sintético produzido com lama vermelha, apenas Rosário (2013) realizou o ensaio de abrasão Los Angeles que é o indicado para medir esta propriedade. Os resultados por ele obtidos estão ilustrados na Tabela 4, a seguir.

**Tabela 4:** Resultados do ensaio de Abrasão Los Angeles segundo Rosário (2013).

MATERIAL	GRADUAÇÃO	Nº DE ESFERAS	ABRASÃO LOS ANGELES (%)
Agregado sintético de lama vermelha	F	12	39,95

Fonte: Autores (2022).

O resultado obtido por este autor demonstrou que o agregado sintético produzido a partir da lama vermelha possui potencial para ser empregado na produção de concreto a ser utilizado em obras de construção civil, haja vista que a abrasividade está diretamente ligada à resistência e a durabilidade dos compósitos cimentícios. O material em questão demonstrou um desempenho superior ao do seixo, agregado comumente utilizado no Norte do país, visto que este segundo normalmente apresenta valores de perda por abrasão Los Angeles da ordem de 49,80%.

### 3.2.6 Temperatura de sinterização e tempo de exposição

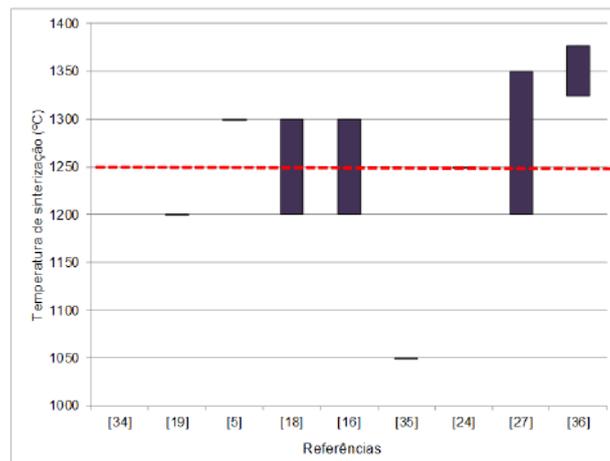
Segundo Souza *et al.*, (2019), a temperatura de sinterização desempenha papel fundamental no controle de variáveis do agregado sintético, tais quais: porosidade; densidade; absorção de água; resistência mecânica e até mesmo no controle da lixiviação de metais pesados.

A sinterização é um processo de transformação física e química a nível permanente, que é acompanhada de uma diminuição da porosidade do material pelo sistema de crescimento de grão e contorno de grão. A temperatura de sinterização depende do tipo de material que está sendo sinterizado. O processo de sinterização ocorre nas ligações entre partículas que estão unidas e aquecidas a temperaturas elevadas (Reis, 2014).

Alguns autores afirmam que em misturas de lama vermelha e argila, com elevada quantidade da primeira, existe uma nucleação de mulita secundária para temperaturas a partir de 1200°C. Já outros autores acreditam que existe mulita até para temperaturas em torno de 1050°C, devido à presença de íons principalmente os de ferro, cálcio e sódio nas misturas contendo lama vermelha (Souza, 2010).

Deste modo, verifica-se que a temperatura de sinterização para a argila é um elemento de fundamental importância, não existindo até o presente momento uma concordância em relação à temperatura ideal a ser empregada. Este fato pode ser constatado a partir da leitura da Figura 6 que ilustra as faixas de temperaturas utilizadas por diferentes autores para a produção de agregados sintéticos fabricados com o uso de lama vermelha. Observa-se que as temperaturas utilizadas variaram de 900°C a 1350°C. No entanto, nota-se uma grande concordância dos estudos na utilização de temperaturas próximas a casa dos 1250° C. Em relação ao tempo de sinterização, todos os autores pesquisados sinterizaram o material por um período de 3 horas, a exceção de Reis (2014) que utilizou 4 horas.

**Figura 6:** Gráfico comparativo dos resultados do ensaio de consistência dos concretos.



Fonte: Autores (2022).

### 3.3 Formas de produção do agregado sintético

Para o processo de fabricação dos agregados sintéticos produzidos a partir de lama vermelha, geralmente podem ser empregados dois métodos, sendo o forno rotativo ou a sinterização. Neste segundo, é feita uma mistura de matéria prima com uma quantidade definida de combustível, podendo ser carvão finamente moído ou coque. Posteriormente esse material é exposto a temperaturas elevadas, o que possibilita a expansão devido à formação de gases (Santos *et al.*, 1986).

O processo realizado por meio do forno rotativo utiliza a especificidade de alguns materiais, como por exemplo, determinadas argilas que possuem a capacidade de se expandirem quando submetidas a altas temperaturas (entre 1000°C e

1350°C), próximos do ponto de fusão insipiente, devido à formação de gases que ficam aprisionados por uma camada externa vítrea da partícula (Santos *et al.*, 1986).

Ainda de acordo com os autores citados acima, o agregado produzido por meio de sinterização apresenta elevada capacidade de absorção de água, poros abertos, além de não possuir recobrimento. De modo geral apresentam valores de massa específica que variam de 650 a 900 kg/m<sup>3</sup>. A maioria dos estudos abordados no presente trabalho contradiz estes autores no que diz respeito à porosidade do material, uma vez que, apesar de os agregados terem sido fabricados pelo processo de sinterização, a grande maioria apresentou um baixo índice de vazios, e em alguns casos, um percentual mínimo de absorção de água, a exceção do trabalho de Gomes Neto (1998) que utilizaram um reator para realizar a sinterização do material. Neste caso, os agregados produzidos apresentaram valores elevados de porosidade e absorção aparente, resultados característicos do processo de sinterização de agregado leve.

### 3.3.1 Materiais empregados

Segundo Santos *et al.*, (2014) as matérias-primas necessárias para a produção de agregados sintéticos, além da lama vermelha, incluem outros materiais como a argila e a sílica, pois estes últimos possuem propriedades importantes como dureza e plasticidade que contribuem para o melhor desempenho do produto final. Para Rosário (2013) o amplo uso de sílica para a formação de materiais cerâmicos se deve às suas propriedades como dureza, relativa infusibilidade, baixo custo e capacidade de formar vidros.

Santos *et al.*, (2014), constataram em seu estudo que o teor de sílica, a temperatura de sinterização e a massa específica do agregado sintético são fatores que interferem diretamente na resistência à compressão do concreto fabricado com o agregado reciclado, visto que, a resistência à compressão do concreto produzido com este tipo de agregado, quando sinterizado a 1200°C é mais elevada para agregados com maior massa específica. O aumento do teor de sílica faz com que a fase amorfa, constituída principalmente da camada vítrea que compõem o agregado, torne-se mais espessa diminuindo a quantidade de poros, causando assim um decréscimo na absorção de água e por consequência um aumento da massa específica aparente.

A temperatura por sua vez, está relacionada com a quantidade de biomassa (carvão) acrescentada à mistura, quanto maior for o teor deste material maior será a temperatura no interior do agregado. Ao se aumentar o teor de biomassa na mistura, verifica-se que a massa específica aparente do agregado diminui até a composição contendo 20% de biomassa, a partir desse valor esta propriedade se eleva. Dessa forma, para teores de biomassa acima deste percentual é observada que a massa específica aparente aumenta, devido a dissolução da mulita, ocasionado pelo aumento de temperatura no composto (Santos *et al.*, 2014).

Na Tabela 5, a seguir é possível observar os tipos de materiais, bem como os seus percentuais para as composições de agregados sintéticos produzidos com lama vermelha, utilizados por alguns dos autores referenciados nesta pesquisa. É possível verificar que a maioria dos trabalhos utilizou a sílica na mistura, tendo em vista a importância deste material para as propriedades finais do agregado, o percentual utilizado variou de 5% a 40%. Já em relação ao teor de argila empregado, os valores variaram de 5% a 25%. No que se refere ao teor de lama vermelha, é importante destacar aqui que como apontam os trabalhos de Santos *et al.*, (2014) e Reis (2014), quanto maior a presença de lama vermelha maior a massa específica do material e por consequência maior a resistência mecânica, a utilização desse subproduto variou em uma faixa de 35% a 95%. Alguns trabalhos como o de Souza *et al.*, (2019) utilizou em lugar da sílica cinza volante, como material fundente, obtendo agregados reciclados com resultados satisfatórios.

**Tabela 5:** Porcentagens dos materiais utilizados para a produção de agregados leves de lama vermelha.

TRABALHO	% DE LAMA VERMELHA	% DE SÍLICA	% DE ARGILA	% DE CARVÃO VEGETAL	% DE CINZA VOLANTE	% AREIA
[33]	82, 74, 66, 58, 77, 69, 61, 53	-	5	10	8, 16, 24, 32, 8, 16, 24, 32	-
[19]	40, 45, 50, 60	-	25, 20, 15, 5	10	-	25
[5]	60	-	10	10	-	20
[18]	95, 90, 85, 80, 75, 70, 65, 60, 55	0, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40	5	-	-	-
[16]	80, 70, 60	10, 20, 30	10	-	-	-
[24]	95, 90, 80, 70, 60	0, 5, 15, 25, 35	5	-	-	-
[27]	55, 50, 45, 40, 35	25	10	10, 15, 20, 25, 30	-	-

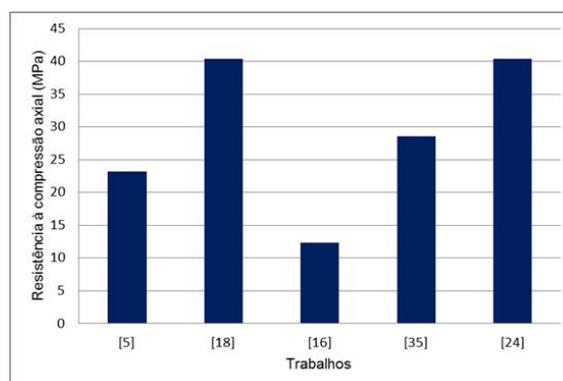
Fonte: Autores (2022).

### 3.4 Características dos concretos produzidos com agregados sintéticos de lama vermelha

#### 3.4.1 Resistência mecânica

Os agregados sintéticos produzidos a partir da lama vermelha podem ser empregados tanto em concretos com função estrutural quanto em concretos para outros fins que não requeiram grande nível de resistência mecânica. Geralmente o desempenho mecânico do material é medido por meio dos ensaios de resistência à compressão axial simples, resistência à tração na flexão, tração por compressão diametral e, módulo de elasticidade. Requisitos técnicos preestabelecidos pela ASTM C330 e a ACI 318 exigem que o concreto leve estrutural apresente resistência à compressão mínima de 17,2 MPa aos 28 dias. Na Figura 7 podem ser observados os resultados obtidos por alguns autores para esta propriedade.

**Figura 7:** Gráfico comparativo dos resultados do ensaio de resistência à compressão.



Fonte: Autores (2022).

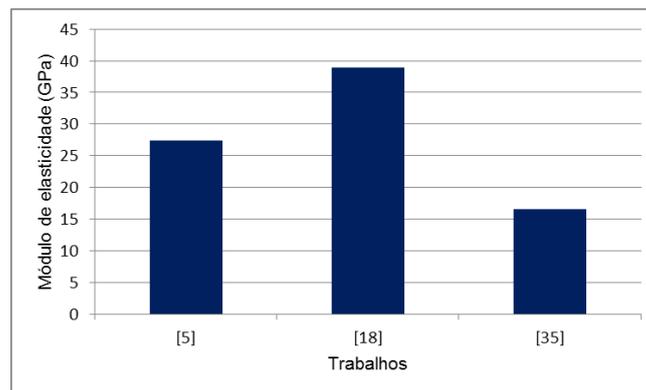
Somente 5 estudos realizaram o ensaio de compressão axial em concretos a fim de demonstrar a viabilidade técnica do uso de agregados reciclados com lama vermelha. Observa-se, no entanto, que em 4 dos trabalhos, o compósito produzido atingiu resistência dentro do que estabelecem as normas supracitadas, podendo ser considerado desta forma como concreto leve estrutural. Apesar de ainda serem incipientes os estudos nesta área, os resultados demonstrados são animadores, principalmente os trabalhos de Souza (2010) e Santos *et al.*, (2014) que conseguiram produzir um concreto que alcançou uma resistência máxima de compressão axial de 40,34 MPa.

No caso da resistência à tração por compressão diametral apenas dois trabalhos Rosário (2013) e Souza (2010) realizaram os ensaios necessários para aferir esta propriedade, obtendo resultados de 2,36 MPa a 3,29 MPa, respectivamente. Já

para a resistência à tração na flexão, apenas Rosário (2013) abordou este tema, obtendo um valor máximo de 3,38 MPa para o concreto produzido.

Por conseguinte, no que diz respeito à aferição do módulo de elasticidade do concreto, somente 3 autores publicaram dados sobre esta grandeza, conforme demonstrado na Figura 8, a seguir. Os resultados foram satisfatórios tendo em vista as considerações destacadas por Rossignolo (2009) afirmando que para concretos leves com valores de resistência à compressão variando entre 20 e 50 MPa, normalmente o valor do módulo de deformação varia entre 50% e 80% do valor obtido para o concreto com massa específica normal.

**Figura 8:** Gráfico comparativo dos resultados do ensaio de módulo de elasticidade.



Fonte: Autores (2022).

Os estudos de Rosário (2013) e Souza (2010) constataram que houve uma elevação nos valores do módulo de deformação dos concretos na medida em que se aumentou o percentual de substituição do agregado natural pelo sintético, o que contradiz a teoria de Santos *et al.*, (1986) que afirma que os agregados leves por apresentarem, via de regra, valores do módulo de deformação significativamente inferiores aos encontrados nos agregados tradicionais, proporcionam aos concretos leves valores de módulo de elasticidade inferiores aos observados para os concretos tradicionais, considerando o mesmo nível de resistência à compressão. Por outro lado, o estudo de Santos *et al.*, (2017) corroborou com esta ideia, uma vez que os autores verificaram que os blocos de concreto prismáticos de agregados sintéticos apresentaram um menor módulo de *Young* e de cisalhamento em relação aos blocos de referência, o que pode estar relacionado com a maior porosidade e absorção de água.

### 3.4.2 Porosidade, absorção de água e densidade

A porosidade, segundo Souza (2010), é um importante fator, cujo conhecimento do valor, ajuda a demonstrar a medida do "grau de maturação ou sinterização", em função da temperatura e do tempo de queima. Quanto menor o índice de vazios do agregado significa que mais eficiente foi o processo de sinterização. Agregados menos porosos, por sua vez, contribuem para a criação de concretos com um menor índice de vazios, baixo percentual de absorção de água, maior densidade e conseqüentemente melhor desempenho mecânico. No Brasil, a NBR 11173 (ABNT, 1990) determina que o valor limite de absorção de água para argamassas estruturais, aos 28 dias de cura, deve ser de 8%. Em relação à massa específica, a NBR 12655 (ABNT, 2015) preconiza que o concreto leve estrutural deve possuir uma massa específica entre 0,8 e 2,0 g/cm<sup>3</sup>.

Por se tratarem de propriedades intimamente relacionadas, optou-se por apresentar os resultados obtidos pelos autores abordados nesta pesquisa de forma conjunta. Dessa forma, a Tabela 6 ilustra os dados publicados por 6 autores que aferiram as propriedades de índice de vazios (porosidade), absorção de água e massa específica para concretos produzidos com agregados sintéticos de lama vermelha. Observa-se que há uma grande variedade de resultados, para estas três variáveis, sendo que na maioria dos casos foi verificado que o compósito atendia as especificações técnicas das normas vigentes supracitadas.

Os resultados obtidos na maioria dos estudos demonstraram que tanto o índice de vazios quanto a absorção de água, para os concretos produzidos com agregados sintéticos apresentaram valores superiores em relação aos dos blocos de concretos com agregados naturais, comportamento contrário observado para a propriedade de massa específica. É importante destacar que em alguns casos, o trabalho de Souza (2010) foi constatado uma tendência à redução da porosidade a partir da utilização de sílica na mistura em um percentual de até 20% em peso. Fato este relacionado ao aumento da fase vítrea, que é proporcional ao teor de sílica. Dessa forma, existe a possibilidade de produção de agregado em uma faixa de massa específica, a qual pode ser controlada apenas com a variação da temperatura de sinterização, para o mesmo teor de sílica.

**Tabela 6:** Variação dos índices de porosidade, absorção de água e massa específica dos concretos produzidos com agregados de lama vermelha aferidos por diversos autores.

TRABALHO	ÍNDICE DE VAZIOS (%)		ABSORÇÃO DE ÁGUA (%)		MASSA ESPECÍFICA (G/CM <sup>3</sup> )	
	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo
[33]	50,32	46,53	40,33	34	1,37	1,23
[5]	14,52	12,65	7,08	6,74	2,05	1,88
[18]	1,78	1,78	-	-	2,72	2,72
[16]	8,29	7,84	4,22	3,92	1,99	1,96
[34]	8,4	8,4	5,05	5,05	1,82	1,82
[24]	12,3	1,78	-	-	2,72	0,92

Fonte: Autores (2022).

### 3.5 Oportunidade de pesquisa

O presente trabalho, ao empregar o método da revisão sistemática conseguiu identificar lacunas na literatura atual. Dessa forma, são apresentadas a seguir, algumas sugestões de pesquisa que podem contribuir para o aprimoramento e difusão do uso de lama vermelha para a produção de agregados sintéticos.

#### 3.5.1 Aplicação dos agregados sintéticos de lama vermelha em concretos leves estruturais

Identificou-se que boa parte das pesquisas realizadas fez uso do agregado sintético de lama vermelha para a produção de concreto. Considerando que os resultados destes trabalhos anteriores são encorajadores, um aumento do número de pesquisas neste sentido poderia contribuir para fomentar o interesse neste novo agregado. É importante destacar neste contexto que ainda existem muitas questões que precisam ser estudadas a respeito do concreto produzidas a partir deste material. Por isso, seria importante analisar as propriedades referentes à durabilidade do concreto produzido com o agregado leve de lama vermelha, focando nos seguintes aspectos: desgaste superficial (por meio do ensaio de abrasão hidráulica), permeabilidade da água e aos gases, ataque por sulfatos, carbonatação, resistência à penetração de cloretos e reação álcali-agregado.

#### 3.5.2 Aplicação dos agregados sintéticos de lama vermelha em concretos de alta resistência

Tendo em vista que em alguns dos estudos analisados nesta pesquisa foi verificado que existe a possibilidade de produzir um concreto com resistência superior a 40 MPa, uma potencial pesquisa englobaria a criação de um agregado empregado em concreto de elevada resistência (acima de 40 MPa), com a aplicação dos ensaios necessários para aferir as propriedades físico-mecânicas deste material quando comparado com concreto produzido com agregados naturais.

### **3.5.3 Simulação de produção do agregado de lama vermelha em larga escala**

Estudar e produzir em escala piloto agregado leve com massa específica inferior a 1,5 g/cm<sup>3</sup> para ser utilizado como contra-piso em construções prediais, já que este material apresenta uma grande demanda da indústria habitacional e não possui necessidade de apresentar elevada resistência à compressão, fato este que poderia baratear a produção do compósito. Analisar os custos necessários para a produção deste tipo de agregado, levando em consideração a queima do material por meio de forno rotativo, e comparar os resultados com os valores dispendidos para a compra de agregados tradicionais. Não foi verificado na literatura pesquisada nenhum trabalho neste sentido.

### **3.5.4 Análise da microestrutura do concreto produzido com agregado de lama vermelha**

Analisar o mecanismo de estabilidade das fases do quartzo através de técnicas de difratometria de raios-x, com auxílio de câmara para ensaios em elevadas temperaturas e posterior observação da microestrutura e quantificação das fases formadas, para melhor definir a influência do teor de impurezas, principalmente metais de transição e do grupo da platina na temperatura de transformações e estabilidade das fases do quartzo. Verificar a influência dos parâmetros de temperatura de sinterização, tempo de queima, constituição química e mineralógica do rejeito de lama vermelha na microestrutura do concreto produzido com agregados reciclados.

## **4. Conclusões**

O presente trabalho conseguiu alcançar o objetivo a que se propôs, uma vez que, tornou mais compreensível a partir de uma revisão sistemática da literatura, o uso da lama vermelha para a produção de agregados sintéticos. De modo geral, a presente pesquisa revelou que a lama vermelha possui viabilidade técnica para fabricação de agregados que podem ser utilizados em concretos leves tanto com fins estruturais ou não. O material em estudo atendeu aos requisitos exigidos por normas pertinentes, apresentando resultados comparáveis aos de agregados naturais, popularmente utilizados na produção de concretos. A reutilização do rejeito de lama vermelha apresenta ainda inúmeras vantagens em relação à utilização de recursos naturais in natura, dentre as quais se tem: redução do volume de extração de matérias-primas; redução do consumo de energia; menores emissões de poluentes; preservação dos recursos naturais, prolongando sua vida útil e reduzindo a destruição da paisagem, fauna e flora. De forma isolada é possível concluir que:

- A composição química da lama vermelha tende a agir como fator limitante para sua utilização, como único constituinte, na produção de agregados. Percebeu-se certa variação de resultados, a depender da região em que o rejeito é produzido, bem como pela forma de tratamento empregada no processo Bayer. Na maioria dos casos, a análise química revelou que o rejeito se encontrava fora da faixa de argila expansiva, exigindo assim a adição de novos materiais para a correta proporção dos óxidos, como a sílica, por exemplo.
- Os resultados publicados para porosidade, densidade, absorção de água e resistência mecânica, revelaram resultados otimistas para o uso da lama vermelha na produção de agregados. Predominantemente, para a faixa de temperatura de sinterização de 1200°C a 1250°C, com teor ótimo de argila de até 95% e teor de sílica de até 20%.
- Apesar de ter sido demonstrado que é viável a ideia de aplicação da lama vermelha para a produção de agregados utilizados em concretos leves com função estrutural. Tal conclusão é baseada em um número escasso de pesquisas. Nesse sentido, fica evidente a necessidade de novos estudos, de forma a alicerçar os conhecimentos técnicos sobre o processo de produção deste tipo de compósito, de modo a favorecer a difusão desta técnica no mercado comercial.

## Bibliografia

- Alcoa (2021). Alcoa. <https://www.alcoa.com/brasil/pt>.
- Ambrose, J., & Péra, J. (2000). Red mud, an interesting secondary raw material. *Construction & Environment*.
- Souza, M. M. S., Anjos, M. A. S., Araújo, A. L. C., Soares, A.V.O., & Sousa, P. C. A., (2020). Uso do lodo de esgoto na produção de agregados leves: uma revisão sistemática de literatura. *Revista Matéria UFRJ*, 25(1), 1-10.
- Araújo, E. R., Olivieri, R. D., & Fernandes, F. R. C., (2014). Atividade mineradora gera riqueza e impactos negativos nas comunidades e no meio ambiente. *Revista Matéria UFRJ*, 12(3), 795-810.
- Associação Brasileira de Alumínio – ABAL. (2021). ABAL. <http://abal.org.br/>.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 10004 (2004). *Resíduos sólidos – classificação*. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 11173 (1990). *Projeto e execução de argamassa armada - Procedimento*. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 12655 (2015). *Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento*, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 7211 (2009). *Agregados para concreto – Especificação*. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Bertocchi, A. F., Ghiani, M., Peretti, R., & Zucca, A., (2006). Red mud and fly ash for remediation of mine sites contaminated with As, Cd, Cu, Pb and Zn. *Journal of hazardous materials*. 134, 112-119.
- Cunha, M. V. P. O., & Corrêa, J. A. M., (2011). Síntese e caracterização de hidróxidos duplos a partir da lama vermelha (Synthesis and characterization of layered double hydroxides from red mud). *Revista Cerâmica*, 57, 85- 93.
- Gomes Neto, D. P., (1998). *Dosagem de microconcretos leves de alto desempenho para produção de pré-fabricados de pequena espessura: estudo de caso*. (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal de São Paulo, São Carlos, SP, Brasil.
- Guo, T., Yang, H., Liu, Q., Hannian, G., Wang, N., Yu, W., & Dai, Y. (2018). Adsorptive removal of phosphate from aqueous solutions using different types of red mud. *Water Sci. Technol.* 2017, 570-577.
- Instituto Brasileiro de Mineração – IBRAM. (2021). IBRAM. <http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00002806.pdf>.
- Lau, P. C., Teo, D. C. L., & Mannan, M. A., (2017). Characteristics of lightweight aggregate produced from lime-treated sewage sludge and palm oil fuel ash. *Construction and Building Materials*, 152, 558-567.
- Medeiros, L. T. B., & Lima, A., M., M., (2021). Método de dimensionamento espacial aplicado para vazamentos hipotéticos de depósitos de rejeitos de mineração. *Research, Society and Development*, 10(9), 1-13.
- Mehta, P. K. & Monteiro, P. J. M. (2008). *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*. (3a ed.), São Paulo, Pini.
- Mörtel, H., & Heimstadt, K. (1994). *Ceramics. Werkstoffe und Korrosion-Materials and Corrosion*, 45(3), 128-136.
- Reis, A. W. (2014). *Caracterização mineralógica do agregado obtido a partir da lama vermelha do processo Bayer*. (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal do Pará, Belém, PA, Brasil.
- Ribeiro, D. V. & Morelli, M. R., (2008). *Estudo da viabilidade da utilização do resíduo de bauxita como adição ao cimento Portland*. In: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Pernambuco.
- Rosário, K. A. (2013). *Concreto com utilização de agregado graúdo sintético produzido a partir da lama vermelha: estudos de dosagem, propriedades e microestrutura*. (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal do Pará, Belém, PA, Brasil.
- Rossignolo, J. A., (2009). *Concreto leve estrutural: Produção, propriedades, microestrutura e aplicações*. Pini.
- Santos, D. H., (2011). *Utilização do rejeito do processo Bayer como matéria prima na produção de agregados leves*. (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal do Pará, Belém, PA, Brasil.
- Santos, D. H., (2019). *Influência da sílica e temperatura nas propriedades físicas dos agregados sintéticos produzidos com resíduo do processo Bayer*. (Tese de Doutorado). Universidade Federal do Pará, Belém, PA, Brasil.
- Santos, D. H., Figueiredo, W. B., Dalmeida, A. P., Valente, A. L., & Souza, J. A. S., (2014). *Influência do teor de sílica livre nas propriedades do agregado sintético a partir a sinterização da lama vermelha*. In: XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química, Florianópolis, SC, Brasil.
- Santos, D. H., Dalmeida, A. P., Figueiredo, W. B., Valente, A. L., & Souza, J. A. S., (2014). *Utilização do rejeito do processo de Bayer como matéria prima na produção de agregados leves*. In: XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química, Florianópolis, SC, Brasil.
- Santos, J. E. A. dos, Pereira, L. F. S., Quaresma, D. S., Macêdo, E. N., & Souza, J. A. S., (2017). *Obtenção de agregado sintético por meio de sinterização em reator de leito fixo*. In: XII Congresso Brasileiro de Engenharia Química, São Carlos, SP, Brasil.
- Santos, M. A. R. C. & Galvão, M. G. A. *A elaboração da pergunta adequada de pesquisa. Residência pediátrica*. 4(2), 53-56.
- Santos, M. E., et al., (1986). *Argila expandida como agregado para concreto leve*. In: Reunião Anual do IBRACON, São Paulo, SP, Brasil.

Santos, R. M., Magalhães, R. S., Sobrinho, N. O., & Gomes, E. R., (2021). Incorporação de lama vermelha na indústria cerâmica: uma revisão. *Research, Society and Development*, 10(10), 1-8.

Souza, J., (2010). *Estudo e avaliação do uso de resíduos do processo Bayer como matéria prima na produção de agregados sintéticos para a construção civil*. (Tese de Doutorado). Universidade Federal do Pará, Belém, PA, Brasil.

Souza, P. H. R., Arraes, L. A. X., Marques, M. S. P., & Santos, J. C. M., (2019). Utilização da lama vermelha para a produção de agregado sintético. *Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento*, 6(3), 30-43.

Tsakiridis, P. E., Agatzini-Leonardou, S., Oustadakis, P. (2004). Red mud addition in the raw meal for the production of Portland cement clinker. *Journal of Hazardous Materials*. 103-110.

Tuan, B. L. A., Hwang, C. L., Lin, K. L., Chen, Y. Y., & Young, M. P., (2013). Development of lightweight aggregate from sewage sludge and waste glass powder for concrete. *Construction and building materials*, 47, 334-339.

Venâncio, L. C. A., (2013). *Desenvolvimento de unidade piloto de transferência de massa gás/líquido: redução da reatividade do resíduo da indústria de alumina através de reação com gases de combustão*. (Tese de Doutorado). Universidade Federal do Pará, Belém, PA, Brasil.

Vilar, L. F. S., (2002). *Estudo do adensamento de resíduos de mineração e processamento de bauxita*. (Tese de Doutorado). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.