

## Estudo da Produção do Agregado Sintético Fabricado com Resíduo do Processo Bayer para indústria da construção civil - Parte I

### Study of the Production of Synthetic Aggregate Made with Waste from the Bayer Process for the Construction Industry - Part I

José Antônio da Silva Souza<sup>1</sup>, Lêda de Azevedo Racanelli<sup>1</sup>,  
João Nazareno Nonato Quaresma<sup>1</sup>

<sup>1</sup> UFPA/ITEC/PRODERNA – programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia, CEP: 66075-110, Belém, PA, Brasil.  
e-mail: lbsracanelli@hotmail.com, jass@ufpa.br, quaresma@ufpa.br

---

#### RESUMO

A grande quantidade de resíduos sólidos, oriundos da indústria de mineração e metalurgia, constitui um sério problema sócio-ambiental, devido a grande quantidade de volume que é gerado. Estes resíduos despertam grande interesse para outras indústrias, como a de cerâmica, por exemplo, e este trabalho apresenta estudos realizados para a reciclagem da lama vermelha (red mud), como matéria prima na produção de agregado sintético, visando à construção civil. A lama vermelha, principal rejeito industrial da fabricação de alumina, mostrou-se um insumo de extrema importância na fabricação de diferentes tipos de agregado para ser utilizado em concreto devido a suas características físico-químicas. Obteve-se como resultado a possibilidade de fabricação de agregados com diferentes características físico-químicas, que dependem unicamente da composição das misturas entre sílica, argila e lama vermelha. Para primeira fase deste trabalho (parte I) a caracterização física do agregado produzido foi avaliado pela massa específica aparente (MEA) e porosidade aparente (PA) variando em temperatura de 1200°C, 1250°C e 1300°C. Por fim, a uma análise de difração de raios X (DRX).

**Palavras-chave:** Lama vermelha. Agregado. Construção civil.

---

#### ABSTRACT

The large amount of solid waste, coming from the mining and metallurgy industry, constitutes a serious socio-environmental problem, due to the large amount of volume that is generated. These residues are of great interest to other industries, such as ceramics, for example, and this work presents studies carried out for the recycling of red mud (red mud), as a raw material in the production of synthetic aggregate, aimed at civil construction. Red mud, the main industrial waste in the manufacture of alumina, proved to be an extremely important input in the manufacture of different types of aggregate to be used in concrete due to its physical and chemical characteristics. The result was the possibility of manufacturing aggregates with different physicochemical characteristics, which depend solely on the composition of the mixtures between silica, clay and red mud. For the first phase of this work (part I) the physical characterization of the produced aggregate was evaluated by the apparent specific gravity (MEA) and apparent porosity (PA) varying at temperatures of 1200°C, 1250°C and 1300°C. Finally, to an X-ray diffraction (XRD) analysis.

**Keywords:** Red mud. Aggregate. Concrete. Construction.

---

#### 1. INTRODUÇÃO

Todas as atividades humanas são marcadas pela busca do equilíbrio entre o tirar e repor [1]. E isso acontece pelo reconhecimento de que a crise ambiental global é, em última análise, impulsionada por estilos de vida, necessidades e desejos intensivos em recursos [2, 3].

Com todo esse desenvolvimento acelerado é importante a busca contínua da recuperação, ou pelo menos em parte, desses recursos. Mais especificamente, daqueles não renováveis, como os minerais por exemplo.

No Brasil, as grandes empresas mineradoras possuem política de reciclagem de resíduos industriais, porém com índices insignificantes frente ao montante produzido, e que a cada dia agride mais o meio ambiente em virtude da falta de tratamentos adequados, fiscalização sobre a manipulação e descarte correto dos rejeitos [4].

Quanto ao descarte desses rejeitos industriais, o reaproveitamento se tornou uma alternativa que tem dado certo em vários países [5], sendo três as principais razões que motivam os países a reciclarem seus rejeitos industriais; primeiro, o esgotamento das reservas de matérias-primas confiáveis; segundo, o crescente volume de resíduos sólidos, que põe em risco a saúde pública, ocupa o espaço e degrada os recursos naturais e, terceiro, a necessidade de compensar o desequilíbrio provocado pelas altas do petróleo [6].

Observando o setor da construção civil, a indústria cerâmica é uma das que mais se destacam na reciclagem de resíduos industriais e urbanos, em virtude do elevado volume de produção que possibilita o consumo de grandes quantidades de rejeitos [7, 8]. As características físico-químicas das matérias-primas cerâmicas e às particularidades do processamento cerâmico, envolvendo elevadas temperaturas, torna a indústria cerâmica uma das grandes opções para a reciclagem de resíduos sólidos [9, 10]. Ademais, a indústria cerâmica normalmente obtém vantagens no seu processo produtivo com a incorporação de resíduos entre suas matérias-primas que a cada dia encontra-se mais escasso e caro, a argila neste caso [11].

Vários são os resíduos industriais absorvidos pela indústria cerâmica, ao qual se pode citar os resíduos de mineração da indústria do papel e celulose, metalúrgica e energética, resíduos urbanos (após tratamento adequado) e etc. [12-17], que independentemente de sua origem, têm-se utilizado como matérias-primas alternativas.

Com essas considerações, pode-se falar também de um resíduo conhecido comumente como lama vermelha (*red mud*), material insolúvel que surge após a digestão da bauxita, através de soluções de hidróxido de sódio (NaOH), na fabricação de alumina metalúrgica pelo processo *Bayer* [18, 19]. Como países do mundo trabalham com o minério bauxita, inclusive o Brasil [20-24], a lama vermelha passou a ser interessante, por se tratar de um rejeito presente em grandes quantidades, baixo custo e fácil aquisição. A Figura 1 mostra a forma de armazenagem da lama vermelha da Alunorte situada no município de Barcarena, PA, Brasil.



**Figura 1:** Mostra a área ocupada com a armazenagem de resíduo da empresa ALUNORTE em Barcarena – PA

Sabe-se que a lama vermelha é um resíduo classificado como classe II não inerte. Há, portanto, riscos ambientais associados em função de sua elevada alcalinidade e capacidade de troca iônica [25]. Considera-se que o mesmo representa um passivo ambiental importante para a indústria de beneficiamento de alumínio, devido aos riscos de contaminação do meio ambiente e aos custos associados ao seu manejo e disposição, os quais representam uma grande parte dos custos de produção da alumina. Como constatação, a comissão mundial sobre meio ambiente e desenvolvimento, cita entre as atividades industriais mais poluentes a indústria de metais não-ferrosos e dentre estes, a do alumínio [26].

Em 2018 somente a empresa Alunorte produziu 6,3 milhões de toneladas de alumina gerando aproximadamente a mesma quantidade de lama vermelha [27]. O potencial de utilização da lama vermelha como matéria prima na indústria cerâmica, foi estudado diversas vezes sempre direcionado para o potencial de produção de insumos para a construção civil [28-30]. Tal deve-se principalmente a presença em grande quantidade de óxidos, de ferro e alcalinos que juntamente com os sílico aluminatos, podem atuar como fundentes nas reações de estado sólido, para a formação das estruturas dos materiais cerâmicos [31].

Observando esse potencial da lama vermelha, pensou-se em se produzir agregado sintético a partir do desenvolvimento de misturas de rejeito do processo *bayer* (lama vermelha), sílica e argila para utilização em concreto. A ideia surgiu uma vez que é notório a utilização de agregados naturais para aplicação em concretos, daí a busca dessa alternativa para diminuir a dependência dos naturais pelos

recicados [32].

Então, a fase um ( parte I) dessa pesquisa consiste na avaliação de algumas propriedades físicas do agregado produzido em três temperaturas diferentes, tais como a porosidade, massa específica, e a caracterização por difração de raios X da(s) melhores misturas das matérias-primas, antes de partir para a fase dois ( parte II ) que trará outros ensaios do agregado aplicado ao concreto de acordo com também com as normas ABNT.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento da pesquisa utilizou-se o rejeito do processo *Bayer* (Lama vermelha) cedido pela empresa Alunorte. Sílica, oriunda de jazidas utilizadas para a extração de material utilizado na construção civil, com teores de sílica acima de 95% em peso, e argila retirada das margens do Rio Guamá – PA, Brasil.

A granulometria da sílica utilizada neste trabalho ficou abaixo da malha 100 mesh (100#), peneira Tyler, para que pudéssemos alcançar morfologia esférica e de alta área superficial, estando assim adequada para a conformação dos corpos de prova. E argila, utilizada para melhorar a plasticidade e possibilitar a conformação dos corpos de provas (granulometria abaixo de 200# ).

Estão descritas na Tabela 1 as misturas proporcionadas das matérias-primas as quais estão representadas pelas abreviaturas M-05 – amostra com 5% em peso de SiO<sub>2</sub>, M-10 – amostra contendo 10% em peso de SiO<sub>2</sub> e assim por diante.

**Tabela 1:** Proporções dos componentes em cada mistura.

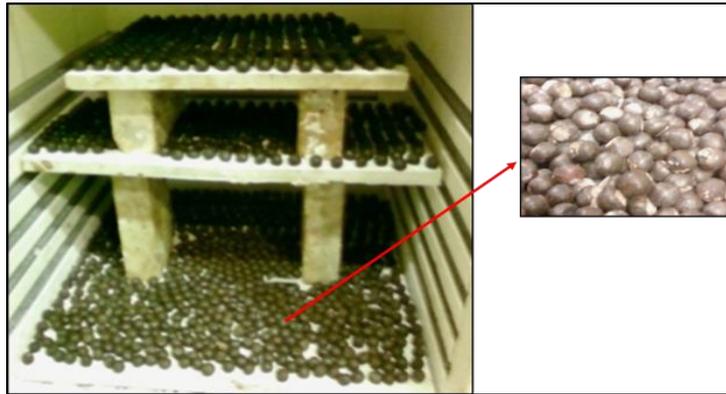
| Formulação | Lama Vermelha (%) | Sílica (%) | Argila (%) |
|------------|-------------------|------------|------------|
| M-05       | 90                | 05         | 5          |
| M-10       | 85                | 10         | 5          |
| M-15       | 80                | 15         | 5          |
| M-20       | 75                | 20         | 5          |
| M-25       | 70                | 25         | 5          |
| M-30       | 65                | 30         | 5          |

Cada formulação foi submetida a ação de aglomeração com auxílio de um tambor rotativo como pode ser visto na Figura 2. A partir dessa etapa, o agregado é seco em estufa com circulação de ar, a uma temperatura de até 90°C para que seja retirada a maior parte da água livre e tornando-se apto à queima [33].



**Figura 2:** Produção de agregado com auxílio de tambor rotativo (a) e queima em forno elétrico de câmara (b).

Após o processo de secagem o agregado foi queimado com auxílio de forno elétrico (marca: elektro therm) às temperaturas de 1200°C, 1250°C e 1300°C em um patamar (rampa) de 180 min. Após este tempo o material é resfriado com entrada de ar forçada no forno. A Figura 3 resume como fica o agregado produzido após todo o processo.



**Figura 3:** Agregado após a queima

Após a queima dos agregados nas temperaturas já citadas, realizou-se ensaios físicos de porosidade aparente (PA (%)) e massa específica aparente (MEA ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )). Também complementando com análise de DRX dos agregados produzidos.

Vale ressaltar que estas análises exploradas aqui neste artigo é para a primeira fase (parte I) desta pesquisa, a fase dois (parte II) que conta com outros ensaios ainda está em andamento para posterior publicação.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2 tem-se os valores percentuais médios da porosidade aparente (PA) em cada um dos ensaios experimentais em que se variou a temperatura e a concentração da sílica.

**Tabela 2:** PA obtida a diferentes temperaturas - tempo de queima de 180 minutos

| Temperatura<br>(°C) | Corpos de prova |      |      |      |      |      |
|---------------------|-----------------|------|------|------|------|------|
|                     | M-05            | M-10 | M-15 | M-20 | M-25 | M-30 |
| 1200                | 3,26            | 2,12 | 1,97 | 1,78 | 1,84 | 1,87 |
| 1250                | 1,12            | 1,91 | 1,78 | 2,53 | 3,89 | 2,51 |
| 1300                | 1,0             | 4,50 | 6,54 | 9,51 | 7,89 | 6,15 |

Como pode-se notar os dados obtidos na tabela acima, revelam que a porosidade diminui com o aumento da concentração da sílica na mistura até 20% (M-20) em temperatura de 1200°C. Porém, quando se eleva a quantidade de sílica na amostra (M-25 e M-30), há uma tendência ao aumento da porosidade. Colocando, agora, os dados de todas as formulações a 1200°C, na Figura 4 é possível perceber que a redução da porosidade é responsável pelo aumento da massa específica, apresentando um mínimo de porosidade para o teor de 20% em peso de sílica, logo, pode-se perceber que se pode controlar a faixa de massa de específica variando a temperatura de sinterização para o mesmo teor de sílica.

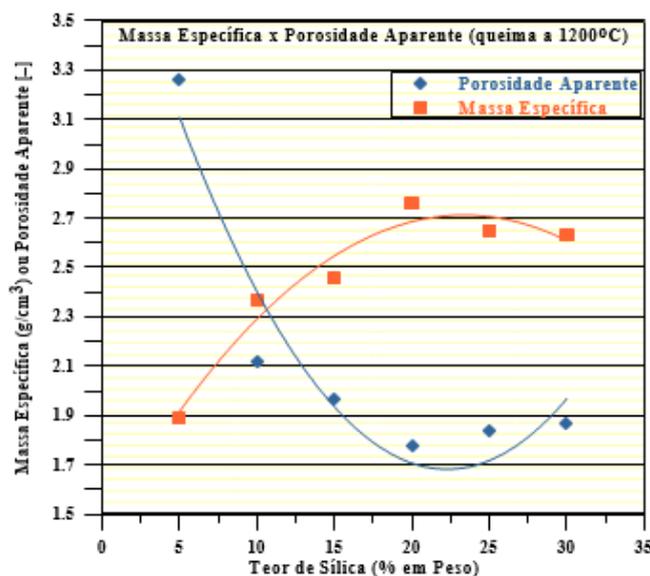


Figura 4: Comportamento da massa específica e da porosidade aparente com o teor de sílica

A Figura 5 mostra a porosidade do material queimado a 1300°C, sendo assim possível observar como fica o material poroso nesta temperatura.



Figura 5: Macrografia em corte longitudinal no agregado sintético

A Tabela 3 mostra os resultados médios da massa específica aparente (g/cm<sup>3</sup>), apresentados pelos corpos de prova submetidos às queimas de 1200°C, 1250°C e 1300°C. Verifica-se que as massas específicas obtidas a 1200°C foram maiores que as de 1250°C e 1300°C. Isso acontece porque a temperatura de 1200°C não é suficiente para que ocorra a expansão pirolástica do material, portanto, ao se aumentar a concentração da sílica, possibilitou-se a redução da viscosidade da fase amorfa, facilitando as reações de geração de gases e, portanto, uma expansão do material. Este fato é comprovado na mistura M-20, a qual apresenta uma massa específica mínima de 1,11 g/cm<sup>3</sup> para o agregado sinterizado a 1300°C, quer dizer, este resultado está de acordo com o apresentado por [34], os quais atribuem a redução de viscosidade ao aumento do teor de sílica.

Tabela 3: Valores da massa específica obtidos a diferentes temperaturas de queima.

| Temperatura (°C) | Corpos de prova |      |      |      |      |      |
|------------------|-----------------|------|------|------|------|------|
|                  | M-05            | M-10 | M-15 | M-20 | M-25 | M-30 |
| 1200             | 1,89            | 2,37 | 2,46 | 2,76 | 2,65 | 2,63 |
| 1250             | 1,98            | 1,77 | 1,67 | 1,59 | 1,42 | 1,60 |
| 1300             | 2,45            | 1,40 | 1,23 | 1,11 | 1,23 | 1,21 |

A Figura 6 mostra a influência do teor de sílica na massa específica para temperaturas de 1200°C e 1300°C. Para a temperatura de 1200°C pode ser observado o aumento da massa específica, sugerindo como consequência, um maior grau de sinterização, ou seja, mais formação de massa vítrea associada à formação de mulita secundária, de acordo como já demonstraram [35, 36]. Para o caso de temperaturas maiores que 1200°C há uma tendência à redução da massa específica, a qual está ligada a alguns fatores, como o aumento do teor de sílica, sendo as reações de vitrificação favorecidas pelo aumento de tempera-

tura, reduzindo a viscosidade da fase amorfa e favorecendo a retenção dos gases gerados no interior do material e, conseqüentemente, piro-expandindo as pelotas de agregado [37].

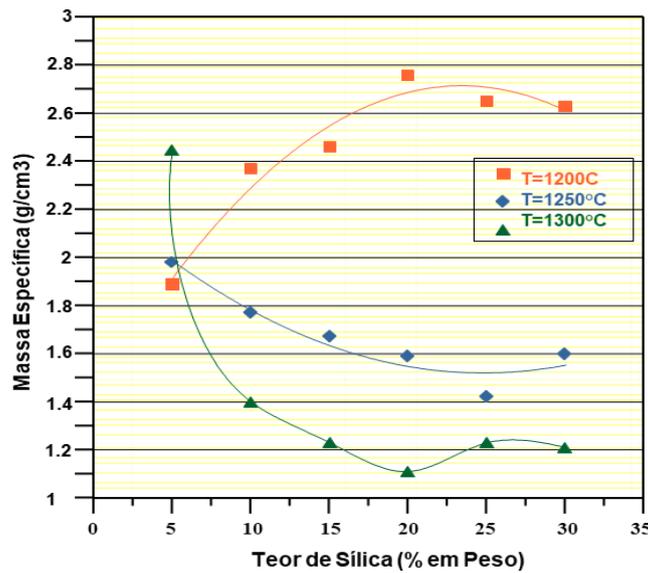


Figura 6: Comportamento da massa específica com o teor de sílica a diferentes temperaturas de queima

Para o caso da amostra M-20 (20% em peso de sílica) a diferença de massa específica foi nitidamente mais acentuada, como pode ser visualizada na Figura 7. Comparando as duas fotos dos agregados sinterizados a 1200°C e a 1300°C, pode-se verificar que o volume aumenta a medida que se aumenta a temperatura, o que explica a redução na massa específica, com o conseqüente aumento da porosidade. Neste caso pode-se concluir que com o controle do teor de sílica e da temperatura é possível sinterizar agregado na faixa de massa específica entre 1 e 3 g/cm<sup>3</sup>.

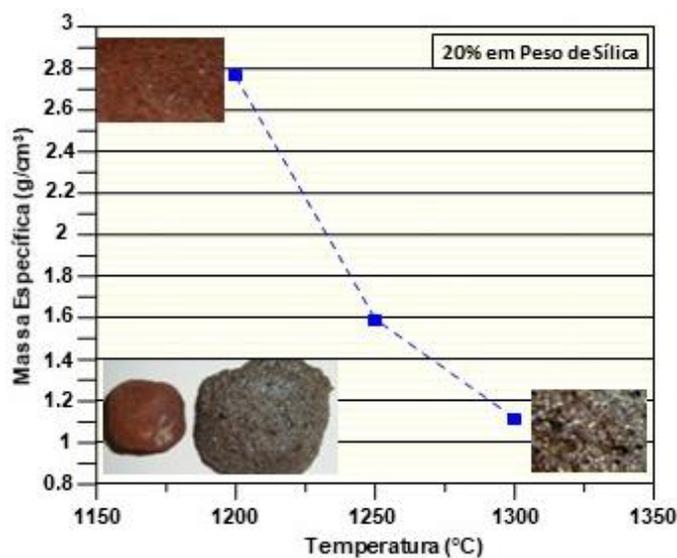
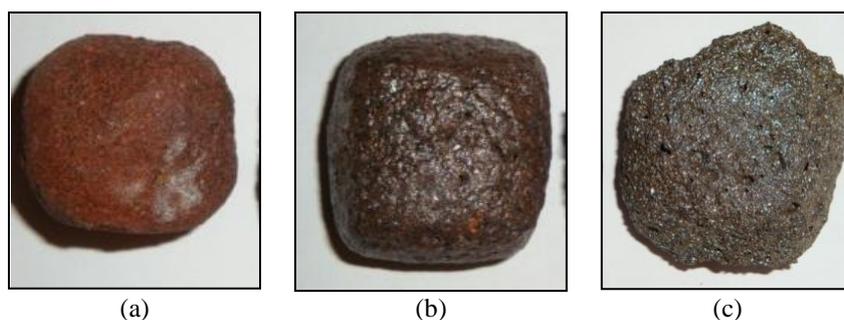


Figura 7: Massa específica em função da temperatura de queima para 20% em peso de sílica e texturas das superfícies para as temperaturas de 1200°C e 1300°C

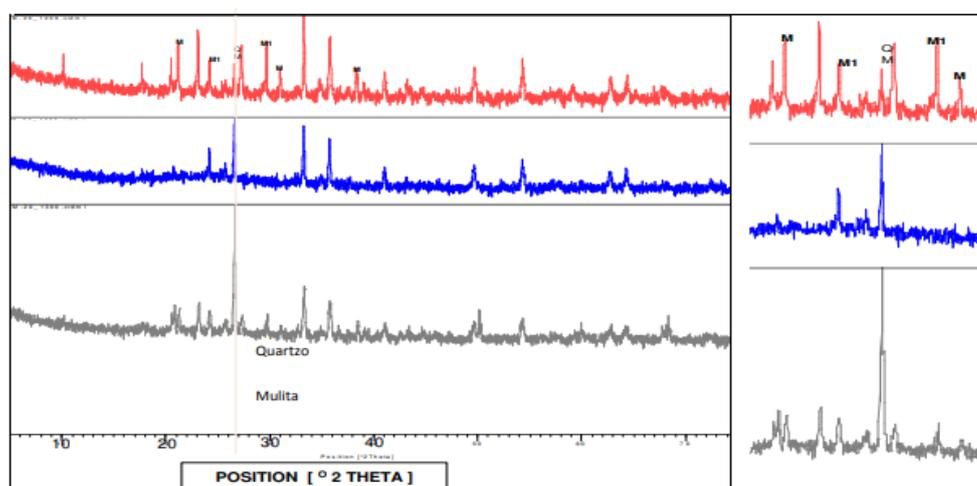
A Figura 8 permitiu visualizar que para misturas com elevado teor de ferro e de metais alcalinos (lama vermelha, argila e sílica) é bastante influenciada com o aumento da temperatura na faixa de 1100°C até 1350°C [38].



**Figura 8:** Efeito da temperatura na expansão do agregado sinterizado a 1200°C (a), a 1250°C (b) e a 1300°C (c)

Como a amostra M-20 foi a que melhor resultou na faixa de massa específica para fabricação de agregados. Complementou-se o estudo com a análise de difração de raios X, pois é nela que se pretende encontrar a formação de fase mulita, fundamental para a resistência mecânica do material cerâmico [38, 39].

O resultado do DRX para esta amostra nas três temperaturas de queima ( 1200°C, 1250°C e 1300°C), mostrou que as principais fases cristalinas do agregado produzido é o Q-quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), N-Nefelina ( $\text{Na}_3\text{K}_4\text{Si}_4\text{O}_{16}$ ), H-Hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), R- Rutilo ( $\text{TiO}_2$ ), T-Tridimita ( $\text{SiO}_2$ ) e mulita. Porém, percebe-se que o comportamento da amostra muda a medida que se aumenta a temperatura, por exemplo, são observadas mais fases de mulita na amostra submetida a temperatura de 1200°C do que na de 1300°C e esse decréscimo de mulita provavelmente pode está associado a dissolução da mulita com o aumento da temperatura e a liberação da sílica [40]. Portanto, provavelmente os agregados produzidos a 1200°C com adição de 20% de sílica na matriz de lama vermelha, terá maior resistencia que a de 1300°C. Contudo, seria necessário testes mecânicos nesta amostra e nas outras também para efeito de comparação, e isso será mostrado na parte II deste trabalho, dentre outras análises já que o agregado será testado para concreto.



**Figura 9:** Difratograma de raios X das três temperaturas de queima. Em que Mulita (M), Mulita primária (M1) e Quartzo (Q)

#### 4. CONCLUSÕES

A aplicação de rejeito em misturas com sílica oferece grandes alternativas para utilização de agregados leves, sobretudo porque consiste em uma matéria-prima de baixo custo e gerada em grande quantidade.

Com as formulações estudadas pode-se concluir que o efeito da temperatura é marcante nestes casos, pois está associado a formação de fase amorfa necessária para a expansão do material e redução da densidade.

O controle do teor de sílica e da temperatura de sinterização é possível produzir agregado sintético com diferentes densidades para diferentes aplicações, desde a substituição da brita ou do seixo, como a possibilidade de produção de agregado com baixa densidade (agregado leve).

Como o uso na construção civil pode ser em grande quantidade, será uma forma de destinar parte da lama vermelha, que é estocada em lagoas e sistemas de contenção, para uso direto, reciclando uma grande quantidade deste material para a fabricação de agregado leve com elevado teor de lama vermelha,

caracterizando uma alternativa viável para redução dos impactos ambientais, reduzindo a extração de materiais utilizados como agregado da natureza.

## 5. AGRADECIMENTOS

Autores deste trabalho agradecem ao Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), a Universidade Federal Do Pará (UFPA) e a empresa alunorte por pelo suporte para o desenvolvimento deste trabalho.

## 6. BIBLIOGRAFIA

- [1] LOVELOCK, J.E., “Um modelo para a dinâmica planetária e celular”, In: Thompson, W. I. (org.), Gaia - Uma Teoria do Conhecimento, Gaia Editora, 1990.
- [2] VÁSQUEZ, F., VITA, G., MÜLLER, D., “Food security for an aging and he avier population”, Sustainability (10), 3683. Disponível em <http://www.mdpi.com/2071-1050/10/10/3683>. 2018.
- [3] VITA, G., HERTWICH, E.G., STADLER, *et al.* “Connecting global emissions to”, Environ. Res. Let.14 (1), 014002.<http://stacks.iop.org/17489326/14/i=1/a=014002?key=crossref.7ebdb6d35d4aeace64743d94e5915a3c>. 2019.
- [4] ARRUDA FILHO, N.T., MENENZES, R.R., NEVES, G.A., *et al.* “Impactos ambientais causados pela atividade mineradora em Pedra Lavrada – PB”, Revista Brasileira de Geografia Física, v.10, n.01, pp.176-193, 2017.
- [5] N. LI., RURU HANB., XIAOHUI LU., “Bibliometric analysis of research trends on solid waste reuse and recycling during”. pp. 1992–2016, *Resources, Conservation & Recycling* 130, pp. 109–117, 2018.
- [6] CASTRO, R.J.S., SOARES, R.A.L., NASCIMENTO, R.M., “Produção de revestimento cerâmico semi-poroso com adição de chamote de telhas”, Revista Matéria, v. 17, n. 4, pp. 1166 –1175, 2012.
- [7] M, CONTRERAS., M.J, GÁZQUEZ., M, ROMERO., *et al.* “Reciclagem de resíduos industriais para aplicações de valor agregado em produtos cerâmicos à base de argila: uma revisão global (2015–19)”, *New Materials in Civil Engineering*. pp. 155-219. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818961-0.00005-3>. 2020.
- [8] ALMEIDA, K.S., SOARES, R.A.L., MATOS, J.M.E., “Efeito de resíduos de gesso e de granito em produtos da indústria de cerâmica vermelha: revisão bibliográfica”, Revista Matéria, v.25, n.1, 2020.
- [9] MENEZES, R. R., NEVES, G.A., FERREIRA, H.C.O., “Estado da arte sobre o uso de resíduos como matérias-primas cerâmicas alternativas”, Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v. 6, n. 2, pp. 303-313, 2002.
- [10] V., CARLOS, M., FONTES; N.M., SERGIO, “Cerâmica Argilosa Incorporada com Resíduo Oleoso Proveniente do Setor Petrolífero”, Revista Matéria, n.11, n.3, pp. 217- 222, 2006.
- [11] FARIA JR., R.T., SOUZA, V.P., VIEIRA, C.M.F., *et al.* “Caracterização de cerâmica com base na reciclagem de resíduos industriais - uso de técnicas fototérmicas para determinação de propriedades térmicas e emissões de gases cerâmicas durante o processo de queima de argila”. DOI: 10.5772 / 21376, 2011.
- [12] ZHANG, L., “Production of bricks from waste materials – a review”. *Construct. Build. Mater*, 47, pp. 643–655, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.043>, 2013.
- [13] ELICHE-QUESADA, D., LEITE-COSTA, J., “Use of bottom ash from olive pomace combustion in the production of eco-friendly fired clay brick”, *Waste Manag.* 48, pp. 323–333. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.11.042>. 2016.
- [14] ELICHE-QUESADA, D., SANDALIO-PÉREZ, J.A., MARTÍNEZ-MARTÍNEZ, *et al.* “Investigation of use of coal fly ash in eco-friendly construction materials: fired clay bricks and silica-calcareous non fired bricks”, *Ceram. Int.* 44 (4), pp. 4400–4412. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.12.039>. 2018.
- [15] MAZA-IGNACIO, O.T., JIMÉNEZ-QUERO, V.G., GUERRERO-PAZ, *et al.* “Recycling untreated sugarcane bagasse ash and industrial wastes for the preparation of resistant, lightweight and ecological fired bricks”, *Construct. Build. Mater.* 23420, 117314. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117314>. 2020.
- [16] LUO, L., LI, K., WENG, F., *et al.* “Preparation, characteristics and mechanisms of the composite sintered bricks produced from shale, sewage sludge, coal gangue powder and iron ore tailings”, *Construct. Build. Mater.* 30, 117250. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117250>. 2020.
- [17] REHMAN, M.U., AHMAD, M., RASHID, K., “Influence of fluxing oxides from waste on the production and physico-mechanical properties of fired clay brick: a review”, *J. Build. Eng.* 27, 100965. <https://doi.org/10.1016/j.job.2019.100965>. 2020.

- [18] LU, G.Z., ZHANG, T.A., ZHENG, C.Z., *et al.* “The influence of the silicon saturation coefficient on a calcification carbonation method for clean and efficient use of bauxite”, *Hydrometallurgy*, 174, pp. 97–104, 2017.
- [19] SILVA FILHO, E.B., ALVES, M.C.M., DA MOTTA, M., “Lama vermelha da indústria de beneficiamento de alumina: produção, características, disposição e aplicações alternativas”, *Revista Matéria*, vol.12, n.º.2, ISSN 1517-7076, 2007.
- [20] POWER, G., GRÄFE, M., KLAUBER, C., “Bauxite residue issues: I. Current management, disposal and storage practices”. *Hydrometallurgy* 108, pp. 33–45. 2011.
- [21] ZHANG, T.A., ZHU, W.X., LU, G.Z., “Aluminum Metallurgy Technology”. *Science press, Beijing*, pp. 5–7, 2014.
- [22] LI, R.B., ZHANG, T.A., LIU, Y., *et al.* “Calcification–carbonation method for red mud processing”, *J. Hazard. Mater.* 316, 94–101, 2016.
- [23] GUO-ZHI LU, TING-AN ZHANG, LI-NAN MA, YAN-XIU WANG, *et al.* “Utilization of Bayer red mud by a calcification–carbonation method using calcium aluminate hydrate as a calcium source”. *Hydrometallurgy* 188, 248–255, 2019.
- [24] ZHANG, J.Z., LIU, S.J., YAO, Z.Y., *et al.* “Environmental aspects and pavement properties of red mud waste as the replacement of mineral filler in asphalt mixture”, *Constr. Build. Mater.* 178, 288–300, 2018.
- [25] LIU, S., GUAN, X., ZHANG, S., *et al.* “Sintered bayer red mud based ceramic bricks: microstructure evolution and alkalis immobilization mechanism”, *Ceram. Int.* 43 (15), 13004–13008. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.07.036>. 2017.
- [26] M. V. P. O. CUNHA, J. A. M. CORRÊA. “Síntese e caracterização de hidróxidos duplos a partir da lama vermelha”, *Cerâmica* 57, 85-93. 2011.
- [27] 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, pp.359-374, 1999.
- [28] HILDEBRANDO, E.A., SOUZA, J.A.S., NEVES, R.F. “Aplicação do rejeito do processo Bayer (lama vermelha) como matéria-prima na indústria de cerâmica estrutural - Estudos preliminares”, *Cerâmica*, v. 44, n. 285/286, pp. 44, 1988.
- [29] SILVA FILHO, E.B., ALVES, M.C.M., DA MOTTA. “Lama vermelha da indústria de beneficiamento de alumina: produção, características, disposição e aplicações alternativas”, *Revista Matéria*, v. 12, n. 2, pp. 322 – 338, 2007.
- [30] MACÊDO, A.N., COSTA, D.H.P., TRINDADE, S.R.S., *et al.* “Comportamento de blocos cerâmicos estruturais produzidos a partir da mistura de lama vermelha e argila”, *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 11, n. 4, p. 25-36. ISSN 1678-8621, out./dez, 2011.
- [31] MACÊDO, A.N., PEREIRA E COSTA, D.H., TRINDADE, S.R. S., *et al.* “Comportamento de blocos cerâmicos estruturais produzidos a partir da mistura de lama vermelha e argila”, *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 11, n. 4, p. 25-36, ISSN 1678-8621, 2011.
- [32] SILVA, C.M.M.A., CAPUZZO, V.M.S. “Avaliação da durabilidade de concretos produzidos com agregados de resíduo de concreto utilizando a abordagem de mistura dois estágios”, *Revista Matéria*, v.25, n.1, ISSN 1517-7076, 2020.
- [33] FUNTAC - FUNDAÇÃO DE TECNOLOGIA DO ESTADO DO ACRE; IEL, Instituto Evaldo Lodi/ Núcleo Regional. Diagnóstico das Indústrias Cerâmicas de Rio Branco. Relatório Técnico, Rio Branco, AC, 1990.
- [34] MÖRTEL, H., STOLZ, R. Die Bildung der Phasen in Kalksandsteinen bei Kalkubershuss und hohen Temperaturen; Mitteilung aus der Institut fur Werkstoffwissenschaften glass und ceramic der Universitate Erlangen, 1989.
- [35] SCHÜLLER, K.H., “Reactions between mullite and glassy phase in porcelains”, *Transactions of the British Ceramic Society*, v. 64, pp. 103-117, 1964.
- [36] SOUZA, J.A., MACÊDO, E.N., QUARESMA, J.N.N., “Reciclagem de da Indústria de Alumina. In: Relatório Final”, CONVÊNIO n. 867 UFPA/FADESP/ALUNORTE SUBPROJETO, 2002.
- [37] DA SILVA, E.M., “Estudo da reciclagem de lodo de ETA na fabricação de agregado sintético em mistura com cinza volante de carvão mineral” Tese de D.Sc., PRODERNA/UFPA, Belém, PA, Brasil, 2016.
- [38] 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.
- [39] SANTOS, K.C.V., GONÇALVES, W.P., SILVA, V.J., *et al.* “Formação de Mullita a Partir de Composições de Caulim e Alumina com Diferentes Tamanhos de Partículas”, *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*, v. 11, n. 3, pp. 136–142, ISSN 1809-8797, 2016.
- [40] SCHÜLLER, K.H., JAEGER, H., 1979, “Chemismus und eigenschaften von feldspaten und deren auswirkungen in porzellan”, *Deutschen Keramischen Gesellschaft*, v. 56, Issue 2, pp. 29-35.



**ORCID**

José Antônio da Silva Souza <https://orcid.org/0000-0002-1784-9217>  
Lêda de Azevedo Racanelli <https://orcid.org/0000-0002-0422-6803>  
João Nazareno Nonato Quaresma <https://orcid.org/0000-0001-9365-7498>