

Utilização de resíduo do processo Bayer e biomassa da Amazônia para a produção de agregado sintético

Use of Bayer process waste and amazonia biomass for the production of synthetic aggregate

Bruno Levy da Silva Magalhães¹, Daniel Bonifácio Rabelo¹, Ricardo Silva Lima¹, Roberto de Sousa Cruz Júnior^{1*}

RESUMO

A mineração é uma das maiores atividades econômicas do estado do Pará, no entanto gera um resíduo nocivo advindo do processo Bayer chamado de lama vermelha(LV), a qual já se mostrou uma matéria-prima bastante potencial na produção de agregados sintéticos. Os agregados podem ser produzidos com uma vasta gama de materiais como a biomassa e nesse trabalho utilizou-se o carvão de caroço de açaí além de outros materiais, como sílica e a argila proveniente do município de São Miguel do Guamá. Produziu-se quatro composições diferentes, nas quais variou-se os teores de LV e carvão, fixando os outros teores nas duas temperaturas de calcinação e analisou-se os resultados através de métodos para determinar a porosidade, absorção de água e massa específica aparente das amostras, além da caracterização por MEV. Os resultados mostraram uma maior porosidade e, conseqüentemente, menor massa específica para os agregados em menor temperatura e maior teor de carvão vegetal, além disso, foi constatado aumento da massa específica com o aumento da temperatura. Ademais, nas imagens da análise por MEV mostraram a presença de mullita, importante para a resistência mecânica do material.

Palavras-chave: Resíduos; Lama vermelha; Carvão vegetal; Agregado sintético

ABSTRACT

The mining is one of the mayor economic activities of the Pará state, however, generates a harmful waste from the Bayer process called red mud (RM), it already shows as a raw material with big potential in the production of synthetic aggregates. The aggregates can be produced with a wide array of materials as the biomass and in this study was used the açaí seed charcoal apart from other materials, as the silic and the clay from São Miguel of Guamá city. Was produced four different compositions, in which it varied the RM and charcoal contents, fixing the other contents in two calcination temperatures and was analysed the results through methods to determine the porosity, water absorption and apparent specific mass, besides the characterization by SEM. The results showed a major porosity and, consequently, less specific mass for the aggregates in minor temperature and major charcoal content, moreover, it was found increase of the specific mass with the rise of temperature. Furthermore, in the images by SEM analysis showed the presence of mullite, important to the mecanic resistance of the material.

Keywords: Waste; Red mud; Charcoal; Synthetic aggregate

¹ Universidade Federal do Pará
*E-mail: robdescjr@gmail.com

INTRODUÇÃO

Um dos maiores impasses na produção de materiais e produtos pelas indústrias é a geração de resíduos, os quais constituem um sério problema sócio-ambiental. A reciclagem desses resíduos incorporados com outros materiais é uma das áreas de pesquisa que mais gera discussões nas áreas da Engenharia, afim de minimizar ou evitar esses problemas ambientais. A indústria da mineração, uma das maiores atividades econômicas da região norte do país, produz rejeitos em larga escala em todas as fases de produção, um desses é a lama vermelha, advinda do processo Bayer, no beneficiamento da bauxita.

A lama vermelha é o resíduo mais abundante desse processo e com bastante potencial para o uso em produtos visando à construção civil. O seu uso na fabricação de diferentes tipos de agregados sintéticos sob diferentes condições já foi avaliado (SUN, et al., 2021; TIAN, et al., 2021) produzindo resultados satisfatórios. A variedade de aplicações, como nos concretos e argamassas, e as diferentes composições as quais podem ser utilizadas para a produção desses agregados (sílica, argila, cinzas, etc.) mostram que esse produto é uma ótima alternativa para a reciclagem desse material.

Dentre a variedade de materiais os quais podem ser usados na sua composição é o carvão vegetal que pode ser obtido de várias fontes de biomassa, como o caroço de açaí, muito abundante na região amazônica. Devido à grande quantidade gerada desses materiais todos os anos e o potencial sustentável que seu reuso trás para as indústrias, este trabalho busca produzir agregados sintéticos de acordo com a norma estabelecida, avaliar a influência do carvão vegetal na composição sob diferentes condições e, além disso, determinar qual a melhor composição e condição de produção para o agregado.

MATERIAIS E MÉTODOS

Foram utilizados na execução deste presente trabalho lama vermelha (LV) no seu estado sólido provindas das lagoas sedimentares da empresa Hydro Alunorte S. A., argila provinda do município de São Miguel, areia e as cinzas do caroço de açaí (carvão vegetal) obtidas após a queima a 500 °C por período de 3 horas em um forno de calcinação Linn elektro therm. O material total a ser usado foi pesado em uma balança de precisão Bel L3102iH para posterior separação de suas composições.

Transferiu-se então as amostras, após a sua aferição, para uma estufa de secagem e esterilização com circulação e renovação de ar MA035/5/10P à 105 °C por 24 horas, buscando a eliminação de qualquer excesso de umidade presente. Em seguida, as amostras de LV, caroço de açaí queimado e argila foram moídas separadamente num moinho de bolas Vilitex vbm series, enquanto que a areia foi destinada a um moinho de discos Brimaq MD500; os processos foram efetuados em um período de 30 min e tiveram por finalidade a redução da granulometria por meio da moagem realizada nos equipamentos.

Posteriormente, determinou-se a granulometria adequada para cada amostra por peneiração em diferentes aberturas de malha. Estabeleceu-se segundo as normas da ABNT a abertura de 48# mesh (300 µm) como sendo a adequada para que o material passante obtivesse uma maior área superficial e preenchimento dos interstícios elevado, evitando o deslocamento de umidade para o interior dos poros. Assim, levou-se primeiramente a areia para o agitador de peneiras Produtest por 5 min, determinando sua massa passante, e em seguida foi efetuado o peneiramento manual da LV, cinza, e argila para que se tivesse o material necessário à formação das pelotas. Ademais, por meio de uma peneira com abertura de malha de 200# mesh (75 µm), se realizou o peneiramento manual de 2 g de carvão, 4 g de LV, e 4 g de argila, para as análises de DRX.

Anteriormente ao início da pelotização, foram determinadas as porcentagens de material que seria utilizada em cada composição. Como um dos objetivos desse trabalho é observar a influência que a introdução do carvão vegetal do caroço de açaí promove no agregado, decidiu-se manter as porcentagens de areia e argila constantes para todas as composições e variar apenas as quantidades de LV e carvão vegetal. A Tabela 1 abaixo demonstra a porcentagem de cada composição produzida neste trabalho. Foi produzido 1 kg de cada composição.

Tabela 1 – Porcentagem dos materiais em cada composição

Composição	Lama Vermelha	Carvão Vegetal	Areia	Argila
C0	90%	0%	5%	5%
C1	60%	30%	5%	5%
C2	70%	20%	5%	5%
C3	80%	10%	5%	5%

Fonte: Autores

Para a pelletização, as amostras foram homogeneizadas com suas devidas composições em um misturador Solotest série 5151 por 10 min. Logo depois, as composições foram transferidas para uma betoneira Fischer MOB-130 G2, onde ocorreu a formação das pelotas. Com a alteração em diferentes períodos do eixo do equipamento e uma pequena adição de umidade (borrifador de água), as pelotas foram formadas obtendo uma esfericidade adequada para o uso como agregado. Devido ao controle da velocidade angular e do tempo de residência, e a formação de um agregado mais heterogêneo, foi utilizado a betoneira no processo de pelletização; pois o mesmo representa em menor escala muito bem o forno de tambor rotativo. O produto obtido após a pelletização é apresentado na Figura 1 abaixo.

Figura 1 – Pelotas úmidas da composição 3 (C3) formadas na bentoneira



Fonte: Autores

Em seguida transferiu-se cada composição à estufa MA035/5/10P, permanecendo por 24 horas em uma temperatura de 105 ° C, para a retirada da umidade adicionada na amostra durante a pelletização. Na secagem, praticamente toda água livre é eliminada,

ocorrendo a diminuição em peso do material de 15 % para 1 % aproximadamente, adquirindo assim uma maior resistência mecânica (FUNTAC IEL, 1990). Após a secagem os componentes foram levados ao forno Linn elektro therm para se iniciar a queima. O forno foi operado a temperaturas de 1200 °C e 1250 °C, para se verificar a influência da mesma sobre cada componente. Segundo o estudo de SCHÜLLER (1979) uma temperatura de queima igual ou superior a 1200 °C proporciona uma mulita na forma de agulhas na microestrutura; ademais, para temperaturas maiores que 1400 °C a grande parte da mulita é dissolvida. Para as duas temperaturas utilizadas, o tempo de queima aplicado para as devidas composições foi de 180 min.

Posteriormente ao período de queima, o material foi esfriado a temperatura ambiente, e em seguida transportado para uma balança analítica Bel L3102iH onde se realizou a sua devida pesagem. Escolheu-se então, um agregado da composição C1 (maior porcentagem de carvão) para as duas diferentes temperaturas, ou seja, dois agregados, que foram direcionados para a Morsa de bancada n°5 – nocram, onde ocorreua fissura do material necessária para a posterior análise do MEV realizada. Após isso retirou-se de cada composição 15 agregados que foram destinados aos testes do material produzido. As amostras foram pesadas; determinando assim, a massa de sólido seco dos corpos de prova que, posteriormente, foram introduzidas em um recipiente contendo água destilada por 24 horas. Prontamente ao período, retirou-se as amostras da água e também o excesso do líquido presente nas mesmas, para que então fosse definida a massa úmida dos corpos. Logo depois, colocou-se uma balança de precisão sobre uma estrutura de madeira, a qual continha em sua parte superior uma haste feita de tubos de PVC que ficou equilibrada horizontalmente sobre a balança, haste essa que era conectada por fios de barbante à um suporte mergulhado em água em sua parte inferior, onde se colocou as amostras para a aferição da massa imersa. Os valores encontrados para a massa de sólido seco, massa úmida e massa imersa, foram utilizados na determinação da porosidade aparente (PA (%)), absorção de água (AA (%)) e massa específica aparente (MEA (g/cm³)).

A medida de porosidade aparente foi determinada pela equação abaixo:

$$PA (\%) = \frac{(M_u - M_s)}{(M_u - M_i)} \times 100$$

O cálculo da absorção de água foi feito por meio da seguinte equação:

$$AA (\%) = \frac{(M_u - M_s)}{M_s} \times 100$$

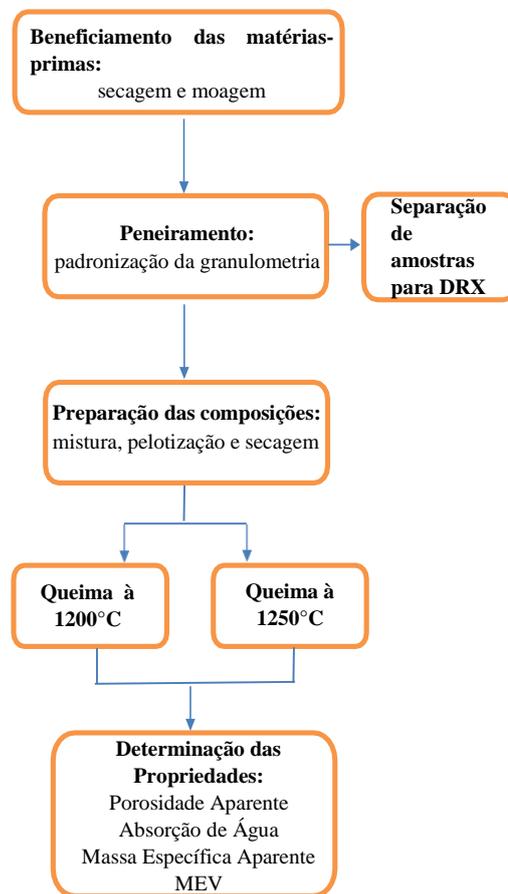
O cálculo da massa específica aparente foi realizado por meio da seguinte equação:

$$\text{MEA (g/cm}^3) = \frac{M_s \cdot \rho_L}{(M_u - M_i)}$$

Onde M_u , M_s e M_i são as massas úmida, seca e imersa do corpo de prova em gramas, respectivamente, medidas comuns às três propriedades cerâmicas e ρ_L é a massa específica do líquido (água).

Abaixo, na Figura 2, encontra-se um fluxograma do procedimento adotado neste experimento:

Figura 2 – Fluxograma do procedimento experimental utilizado



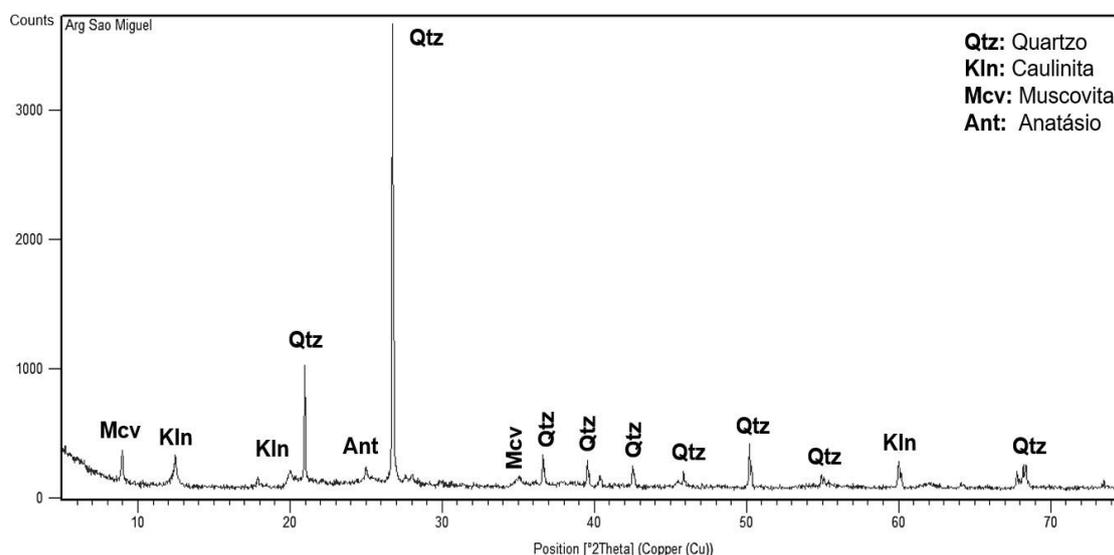
Fonte: Autores

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise química por difração de raios-X realizada para se determinar a identificação e quantificação das fases cristalinas, bem como o grau de cristalinidade desses materiais. Essa análise foi feita para as amostras de argila e lama vermelha.

A Figura 3 apresenta o difratograma para a argila de São Miguel que mostra as fases cristalinas da caulinita (Kln), quartzo (Qtz), muscovita (Mcv) e anatásio (Ant), sendo os picos predominantes referentes à caulinita e ao quartzo, os quais podem ser observadas com maior intensidade devido a sua alta cristalinidade. Os resultados obtidos estão de acordo com trabalhos produzidos anteriormente (RACANELLI et al., 2019).

Figura 3 – Difratograma da argila utilizada nas composiç (argila de São Miguel)

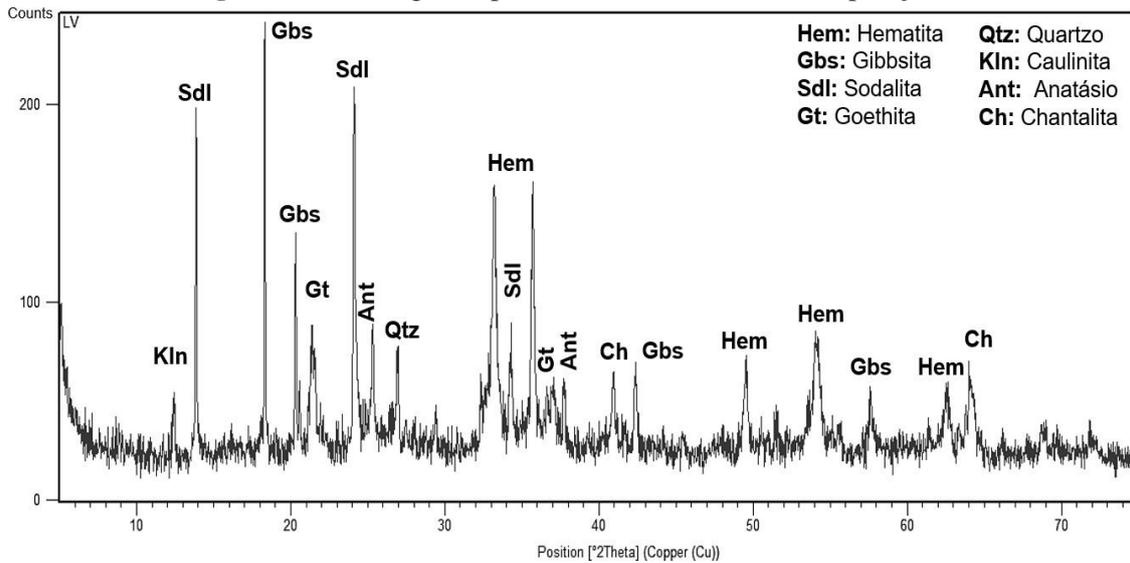


Fonte: Autores

A argila é utilizada nesse experimento por possibilitar a plasticidade e uma boa conformação do material trabalhado. Por possuir quantidades consideráveis de caulinita e quartzo em sua composição, é uma boa fonte de substâncias como Al_2O_3 e SiO_2 , elementos importantes no processo de sinterização.

Já a Figura 4 apresenta o difratograma para a LV, o qual mostra as fases para hematita (Hem), caulinita (Kln), sodalita (Sdl), gibbsita (Gbs), goethita (Gt), quartzo (Qtz), chantalita (Ch) e anatásio (Ant), com picos predominantes para hematita, gibbsita e sodalita semelhante a outras caracterizações (RIVAS et al., 2010) sobre esse material.

Figura 4 – Difratoograma para a lama vermelha nas composições



Fonte: Autores

A lama vermelha destaca-se como uma importante fonte de substâncias que fornecem resistência mecânica para materiais cerâmicos como ferro, alumínio e silício comprovado pela grande presença de minerais como hematita, caulinita e quartzo. Além disso, a LV também é responsável por fornecer cátions, tais como sódio e ferro, responsáveis por facilitar o processo de vitrificação presente em agregados produzidos com esse material.

É fundamental ressaltar também que a adição de areia nas composições é responsável por fornecer maiores teores de sílica (SiO_2) para a o material, a qual vai influenciar na processo de vitrificação dos agregados, bem como na formação do mineral mulita. Já a presença do carvão do caroço de açaí fornece produtos derivados da queima de compostos carbonosos, tais como o carbono (C).

Por intermédio da mesma metodologia utilizada por SOUZA (2010), calculou-se os valores de PA (%), AA (%) e MEA (g/cm^3) para cada composição de agregado através das equações apresentadas anteriormente. Os resultados são apresentados nos Quadros 1, 2 e 3 abaixo:

Quadro 1 – Resultados de porosidade aparente para cada composição de agregado nas temperaturas de 1200 e 1250 °C

Temperatura de Queima (°C)	Composição do Agregado			
	PA (%) para C0	PA (%) para C1	PA (%) para C2	PA (%) para C3
1200	15,45	31,64	34,48	24,89
1250	4,65	4,92	10,08	5,46

Fonte: Autores

Pode-se observar que a introdução do carvão vegetal influencia para o aumento da porosidade nos agregados, já que as maiores porcentagens de porosidade encontram-se nas composições onde o carvão vegetal está presente. Ademais, percebe-se que o aumento da temperatura de queima dos agregados favorecem uma significativa diminuição dessa característica do material.

Quadro 2 – Resultados de absorção de água para cada composição de agregado nas temperaturas de 1200 e 1250 °C

Temperatura de Queima (°C)	Composição do Agregado			
	AA (%) para C0	AA (%) para C1	AA (%) para C2	AA (%) para C3
1200	7,51	19,63	28,18	13,72
1250	1,98	2,20	4,80	2,38

Fonte: Autores

Como entende-se que a absorção de água está intimamente relacionada à porosidade de um material, os valores de absorção de água calculados apresentaram o mesmo comportamento dos resultados obtidos para a porosidade: aumento da absorção de água nas composições que apresentam o carvão vegetal na sua composição e uma redução significativa dessa propriedade para os corpos de prova que foram queimados em maior temperatura.

Quadro 3 – Resultados de massa específica aparente para cada composição de agregado nas temperaturas de 1200 e 1250 °C

Temperatura de Queima (°C)	Composição do Agregado			
	MEA (g/cm ³) para C0	MEA (g/cm ³) para C1	MEA (g/cm ³) para C2	MEA (g/cm ³) para C3
1200	2,06	1,63	1,56	1,82
1250	2,36	2,18	2,17	2,32

Fonte: Autores

De acordo com o quadro apresentado acima, observa-se um aumento nos valores de MEA para todas as composições à medida que a temperatura de queima do material é elevada. Esses resultados podem ser explicados devido à porcentagem constante de areia (sílica) utilizada nas composições, pois esse material é responsável pela formação de uma camada vítrea na superfície do agregado durante a queima, onde é liberado gases e substâncias devido às reações ocorridas no interior do agregado. Nesse sentido, a camada vítrea é responsável por reter os gases e espaços vazios dentro do material sinterizado, ocasionando uma diminuição da massa específica (SOUZA, 2010). No entanto, a pouca quantidade de sílica utilizada favoreceu reduzidamente para a ocorrência desse processo, ocasionando compactação do material e consequente aumento da MEA observada no experimento.

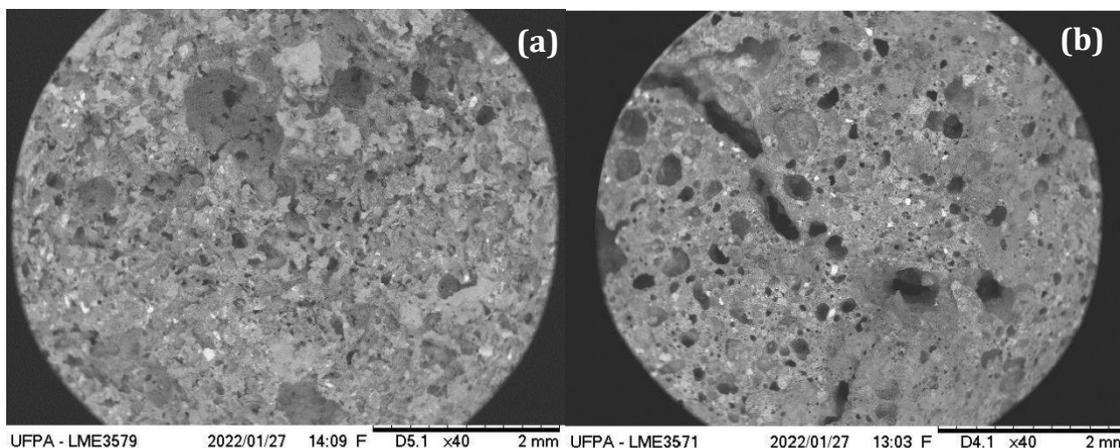
Segundo a NBR 12655 (ABNT, 2006), agregados com massa específica igual ou inferiores à $1,8 \text{ g/cm}^3$ são considerados agregados leves e igual ou acima de 3 g/cm^3 , são considerados densos ou pesados – agregados com MEA dentro dessa faixa são considerados normais. Nesse contexto, pode-se observar que as composições C1 e C2, as quais apresentam o carvão vegetal de açaí na sua estrutura são satisfatórias para a produção de agregado leve em uma temperatura de queima de $1200 \text{ }^\circ\text{C}$. Entretanto, a queima desses materiais em temperaturas maiores promove a produção de agregados normais. Esse fato difere do ocorrido nas propriedades de porosidade e absorção de Água, onde a elevação da temperatura favoreceu positivamente para a redução dessas características.

É importante pontuar também que, na temperatura de $1200 \text{ }^\circ\text{C}$, a adição do carvão vegetal favorece a produção de agregados com menor MEA, pois as composições C1, C2 e C3 apresentam menores valores dessa propriedade quando comparados à composição C0.

O processo de sinterização realizado tem como objetivo fazer com que as partículas liguem-se por meio de difusão no estado sólido, transformando o material poroso num produto resistente e denso (SOUZA, 2010). A sinterização ocorre por meio de estágios, onde observa-se principalmente, a conformação dos poros e densificação final do material. A porosidade está intimamente conectada à densidade do agregado, quanto maior a porosidade apresentada, menor a densidade, pois a presença de espaços vazios (poros) contribui para a não compactação do material. A Figura 5 abaixo é um

MEV de dois agregados da mesma composição (C3), queimados em temperaturas diferentes.

Figura 5 – Agregado da C3 sinterizado (a) à 1200 °C e (b) à 1250 °C



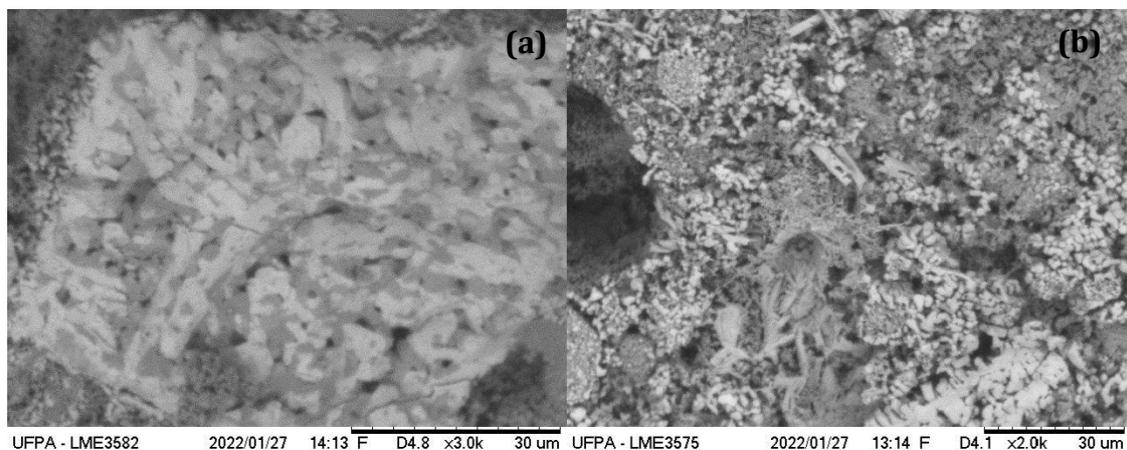
Fonte: Autores

É possível observar a diferença na conformação dos poros apresentados pelas duas amostras. Como as duas amostras possuem a mesma quantidade de sílica para a formação da camada vítrea, pode-se verificar que a elevação da temperatura foi responsável por gerar poros mais esféricos e isolados (bem característicos do terceiro estágio da sinterização). Ademais, a observação de (a) demonstra que o terceiro estágio de sinterização não foi tão favorecido pela temperatura. Nesse contexto, a porosidade apresentada em (a) – poros conectados e abertos – pode ser responsável pela menor densidade apresentada nesse material quando comparado a temperatura de 1250°C na mesma composição.

É fundamental pontuar também que a sinterização promove a formação da mulita, que é um mineral silicato-aluminoso (71,8% Al₂O₃ e 28,2% SiO₂) responsável direto pela resistência mecânica dos materiais cerâmicos (HIDELBRANDO et al., 1999). Na sinterização, a mulita apresenta-se como uma fase amorfa a qual surge em duas etapas, a mulita primária e a secundária. A fase primária da mulita é conhecida como metacaulinita e é responsável por dar origem à mulita secundária, que se observa em forma de cristais e morfologia acicular (formato de agulhas). MÖRTEL & BOUBACAR (1977) afirmam que o crescimento da fase acicular da mulita depende da viscosidade da fase vítrea para se completar. Nesse sentido, a presença de cátions vitrificantes (sódio, cálcio e ferro) na

lama vermelha e nos outros materiais das composições podem influenciar positivamente na formação de uma camada vítrea com menor viscosidade, tornando possível a nucleação e o crescimento da mulita secundária de morfologia acicular. Além disso, SOUZA (2010) mostra que a quantidade de mulita presente em um material aumenta à medida que a temperatura também é elevada, evidenciando total dependência nesse caso. A Figura 6 a seguir mostra a mulita secundária em duas amostras da composição C3 queimadas em diferentes temperaturas.

Figura 6 – (a) bolsão com mulita secundária de morfologia acicular em temperatura de 1200 °C e (b) mulita secundária espalhada pela amostra em temperatura de 1250 °C.



Fonte: Autores

A figura acima mostra a morfologia acicular da mulita secundária assim como prevista na literatura, evidenciado principalmente no bolsão do minério observado em (a). Ademais, pode-se perceber uma coloração mais clara do minério em relação aos outros componentes das amostras, assim como previsto por HIDELBRANDO et al. (1999).

CONCLUSÃO

A utilização da lama vermelha juntamente com o carvão do caroço de açai em misturas com sílica e argila, demonstrou-se, após a realização de todas as análises, satisfatória para a produção de agregados sintéticos. A adição da biomassa na mistura foi favorável para a diminuição da massa específica por meio do aumento da porosidade do material, formando agregados com valores menores a $1,8 \text{ g/cm}^3$ na temperatura mais baixa – como observado nas composições C1 e C2 – enquanto que na temperatura maior, houve um aumento considerável na massa específica, resultando na produção de agregados normais – percebido nas quatro composições – de acordo com as normas da NBR 12655 (ABNT, 2006). Vale ressaltar que o carvão introduzido não influenciou na formação de mulita muito importante para a resistência do material. No entanto, é necessário mais testes para definir a utilização do agregado que foi produzido em áreas como a indústria civil. Nesse sentido, por intermédio do controle de parâmetros como a temperatura de queima e teor de biomassa na composição, pode-se prever as características do agregado produzido e destinar sua aplicação de maneira mais correta, de acordo com as condições de realização do procedimento experimental.

REFERÊNCIAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006, “NBR 12655: Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento – Procedimento” Rio de Janeiro.

FUNTAC – FUNDAÇÃO DE TECNOLOGIA DO ESTADO DO ACRE; IEL – INSTITUTO EVANDRO LODI/NÚCLEO REGIONAL, 1990. **Diagnóstico das Indústrias Cerâmicas de Rio Branco**. In: Relatório Técnico, Rio Branco, AC, Brasil.

HIDELBRANDO, 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 Cerâmica e 4º Congresso de Cerâmica do Mercosul**, p. 28101-28111, Florianópolis, SC, Brasil.

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

RACANELLI, L. E. *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 Development**, v. 5, n. 4, p. 3803-3812, 2019.

RIVAS, J. M. *et al.* Estudo do comportamento térmico e propriedades físico-mecânicas da lama vermelha. **Revista Matéria**, v. 15, n. 3, p. 445-460, 2010.

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

SOUZA, J. A. S., 2010, Estudo e Avaliação do Uso de Resíduos do Processo Bayer como Matéria-Prima na Produção de Agregados Sintéticos para Construção Civil. **Dissertação (Doutorado)**, PRODERNA-ITEC/UFPA, Belém, PA, Brasil.

SUN, Y. *et al.* Production of lightweight aggregate ceramsite from red mud and municipal solid waste incineration bottom ash: Mechanism and optimization. **Construction and Building Materials**, v. 287, 122993.

TIAN, K. *et al.* Alkali-activated artificial aggregates fabricated by red mud and fly ash: Performance and microstructure. **Construction and Building Materials**, v. 281, 122552.

Recebido em: 11/10/2022

Aprovado em: 16/11/2022

Publicado em: 24/11/2022