

Avaliação da distribuição granulométrica a partir da velocidade de moagem do vidro de soda-cal

Evaluation of particle size distribution based on the grinding speed of soda-lime glass

Jônatas de Oliveira Sousa¹, Belmira Benedita de Lima Kuhn¹, Antonio Renato Bigansolli^{1*}

RESUMO

O avanço tecnológico e científico alavancado pela demanda da sociedade tem estimulado a criação de novos materiais capazes de desempenhar funções antes inexploradas. A utilização de materiais particulados para o desenvolvimento de materiais compósitos tem se destacado nos últimos anos. O presente trabalho estudou a influência da velocidade de rotação do moinho de alta energia na distribuição granulométrica do vidro de soda-cal com velocidades que variaram de 100 a 500 rpm, bem como as possíveis mudanças microestrutural do material por meio de difração de raios-X (DRX) e infravermelho por transformada de Fourier (FTIR). Os resultados foram positivos, indicando alterações na curva granulométrica que possibilita aplicações futuras.

Palavras-chave: Distribuição granulométrica, Vidro de soda-cal, Velocidade de rotação.

ABSTRACT

The scientific and technological advance driven by society demand promotes the creation of new materials, capable of performing unexplored functions. The use of fine powders in the development of composite materials has stood in recent times. The present work investigated the influence of the high-energy mill rotation speed on the granulometric distribution of the soda-lime glass with speeds varying from 100 to 500 rpm, as well as the possible microstructural changes of the material X-ray diffraction (XRD) and Fourier transform infrared (FTIR). The results indicate changes in the granulometric curve that allows future applications.

Keywords: Granulometric distribution, Soda-lime glass, Rotational speed.

1. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro – Departamento de Engenharia Química – Rio de Janeiro/RJ – Brasil

Autor correspondente: bigansolli.arb@gmail.com

Recebido: 04/12/2019 **Aceito:** 30/01/2020

INTRODUÇÃO

Um dos materiais mais versáteis da atualidade é o vidro de soda-cal. O Brasil vem se destacando como um dos maiores produtores de vidro da América Latina. Cerca de 45% da matéria-prima utilizada na produção do vidro é substituída por cacos oriundos de coleta seletiva e de refugos nas fábricas. Os cacos provenientes de coleta seletiva são constituídos de lâmpadas, potes de alimentos, garrafas e outros tipos. Não obstante, apesar da alta reciclabilidade do vidro e da substituição de parte da matéria-prima por cacos de vidro na produção industrial, aproximadamente 2% do material não mais utilizado tem como destino os aterros sanitários, gerando acúmulo. O vidro tem um tempo de decomposição estimado em um milhão de anos, sendo assim, esse acúmulo a longo prazo pode representar um somatório alarmante. Em virtude de tais fatos, são essenciais o desenvolvimento e o estudo de diversas maneiras de reinserção desse material no processo produtivo. Várias pesquisas utilizam o pó de vidro como carga, fundente ou substituto no desenvolvimento de materiais compósitos como porcelanato, cimentos e paver que apresentaram resultados satisfatórios¹.

Paiva² afirma que um dos problemas em torno da destinação dos vidros acumulados é sua aplicação como carga ou aditivo em concretos, enfatizando que a composição do vidro baseada em sílica melhoraria as propriedades mecânicas e a durabilidade da argamassa.

A reciclagem de resíduos envolve análise química e microestrutural do resíduo além da caracterização física do material. A viabilidade do uso de um determinado resíduo leva em consideração a possibilidade de risco ambiental gerado com seu uso, incluindo os impactos ambientais advindos do novo produto e seus benefícios aos usuários³.

Diversas áreas têm se preparado para melhorar as propriedades e a eficiência de seus produtos fazendo uso de partículas a nível micrométrico e nanométrico. A indústria farmacêutica vem desenvolvendo pesquisas utilizando tecnologias que facilitam a absorção de partículas lipídicas sólidas, o que resulta em uma dispersão homogênea do composto encapsulado na matriz sólida⁴.

A classificação granulométrica das partículas é essencial para o desenvolvimento científico. Leal⁵ destaca que a forma esférica da partícula atende os requisitos de dispersão e comportamento mecânico. Ele destaca também que o tamanho das partículas determina a distância si durante a dispersão, logo, o tamanho de partícula é proporcional à distância, mantendo-se a fração volumétrica. A distribuição granulométrica das partículas obtidas por moagem contém informações importantes sobre o processo de utilizado. A moagem tem como princípio a pressão exercida sobre as partículas ultrapassando a resistência delas, levando à fratura do material em partículas menores.

O diâmetro de Sauter (D)^{2,3} é uma medida de tamanho de partícula definida como o diâmetro de uma esfera que tem a mesma relação volume por área da superfície de uma partícula

de interesse (nesse caso o vidro de soda-cal). A Eq. 1 representa o diâmetro de Sauter.

$$d_p = \frac{1}{\sum \frac{x_i}{d_{pi}}} \quad (1)$$

onde: d_p é o diâmetro de Sauter; X_i é a fração mássica retida; d_{pi} é o diâmetro médio de cada partícula.

O desenvolvimento contínuo de equipamentos e técnicas de processamento dos pós tem alavancado a crescente demanda de produtos com alto desempenho. As extrusoras de moldagem por injeção e os moinhos de alta energia são exemplos de equipamentos oriundos do desenvolvimento da tecnologia do pó⁶.

Um método bastante eficaz na redução de tamanho de partículas é a moagem de alta energia. Esse processo é diferente dos métodos convencionais pela velocidade com a qual os meios de moagem (esferas) são submetidos⁷. Técnicas de moagem de alta energia têm sido utilizadas tanto na indústria quanto em laboratórios devido à sua praticidade para o estudo de obtenção de fases metálicas, materiais amorfizados, modificação de materiais cerâmicos, entre outros⁸.

OBJETIVOS

A globalização da tecnologia demanda o desenvolvimento de novos materiais assim como o aprimoramento dos materiais existentes. Com base nessa demanda e na eficiência da tecnologia do pó, o presente trabalho tem por objetivo analisar os resultados da distribuição granulométrica, obtidos a partir da variação da velocidade de rotação na moagem de alta energia, bem como investigar possíveis alterações estruturais do vidro de soda-cal através das técnicas de difração de raios-X (DRX) e infravermelho por transformada de Fourier (FTIR).

MATERIAL E MÉTODOS

O vidro utilizado neste trabalho foi oriundo de garrafas do tipo soda-cal provenientes da Companhia de Bebida das Américas (AmBev). Esse tipo de garrafa possui as seguintes características: 440 gramas de peso, cor âmbar, altura de 286,4 mm, diâmetro de 73 mm e capacidade volumétrica de 635 mL. As garrafas utilizadas nesse trabalho foram lavadas, seus rótulos retirados, e posteriormente secadas em estufa. As garrafas foram quebradas inicialmente de forma manual e posteriormente colocadas no moinho tipo martelo, o que permitiu uma redução do material a ser cominuído no moinho de bolas.

Após a fragmentação no moinho martelo, o material passou por um processo de redução de tamanho no moinho de bolas. O material permaneceu no moinho de bolas sendo processado por 5 h. Com o auxílio de peneiras e um agitador de peneiras foi feita uma separação granulométrica para obtenção de amostras com

tamanho padronizado de partículas entre 1,7 e 2 mm. O material retirado do moinho de bolas deu origem a cinco amostras.

As cinco amostras foram processadas com tempo de moagem fixado em 10 min, variando-se a velocidade de rotação do equipamento para cada amostra (100, 200, 300, 400 e 500 rpm respectivamente). As amostras foram identificadas conforme Tabela 1.

Tabela 1: Identificação das amostras utilizadas no presente trabalho.

Amostra	Rotação (rpm)
C ₁	100
C ₂	200
C ₃	300
C ₄	400
C ₅	500

Todos os equipamentos utilizados para fragmentação da garrafa (moinho martelo, moinho de bolas, agitador de peneiras e moinho de alta energia) foram providos pelo laboratório do Curso de Engenharia de Materiais (DEQ/IT) da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ).

As técnicas de difração a laser e difração de raios-X foram realizadas no Departamento de Engenharia Química (DEQ/IT) na UFRRJ e a técnica de FTIR foi realizada no laboratório do Departamento de Química Orgânica (DQO/IQ) também na UFRRJ.

No processamento das amostras foram utilizadas 50 g de material. Todas as cinco amostras foram submetidas a um processo de secagem em estufa antes de serem levadas ao moinho de alta energia modelo PM 100 da Restch. O moinho utilizado possui um jarro de aço inox e trabalha com um conjunto de seis esferas também de aço inox. Outro ponto importante trata-se da quantidade de material utilizado para o preenchimento do moinho, que não deve ultrapassar um terço do volume do jarro do moinho.

Depois de processadas, as amostras foram analisadas por DRX em um equipamento Rigaku, modelo Miniflex II. As análises foram feitas sob radiação CuK α , tensão de 30 kV, corrente de 15 mA, passo angular de 0,050°, tempo de contagem por ponto de 2,0 s e 2 θ variando de 5 a 70°.

As amostras também foram analisadas por FTIR em um espectrômetro de infravermelho (modelo Vertex 70, Bruker) aplicando-se a técnica ATR Platinum em uma faixa de varredura com comprimento de onda entre 4000 a 400 cm⁻¹.

A amostra C₁ foi analisada por um agitador elétrico de peneiras da Edutec. Utilizou-se um conjunto de peneiras de 9#, 10#, 20#, 32#, 60#, 48#, 80#, 150#, 200#, 270#, 325# (com aberturas de 2,0 e 1,70 mm; 850, 500, 300, 250, 180, 106, 75, 53 e 45 μ m, respectivamente). O material foi

peneirado durante 20 min. Em seguida, o procedimento foi repetido por mais 10 min para assegurar a estabilidade das massas retidas nas peneiras.

As amostras C₂, C₃, C₄, e C₅ foram analisadas em um difratômetro da marca Malvern Mastersizer 2000. As condições utilizadas foram: índice de refração da partícula de 1,513; o índice de absorção de luz foi 0,1; a obscuridade dentro do padrão do equipamento foi mantida entre 15 e 16% e ultrassom foi aplicado por 3 min em cada análise com o intuito de desagregar as partículas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Figs. 1 e 2 apresentam os difratogramas de raios-X das amostras com 100 e 500 rpm respectivamente. A análise dos difratogramas de ambas as amostras sinaliza uma modificação na linha de base dos difratogramas que formam bandas (halos) caracterizando a ausência de fase cristalina e a presença de um material amorfo.

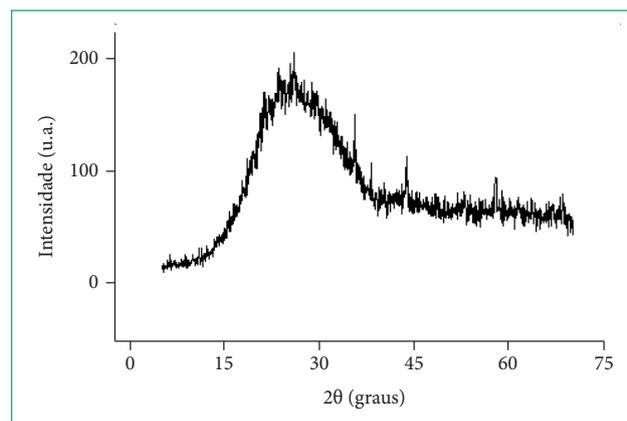


Figura 1: Difratograma de raios-X da amostra A.

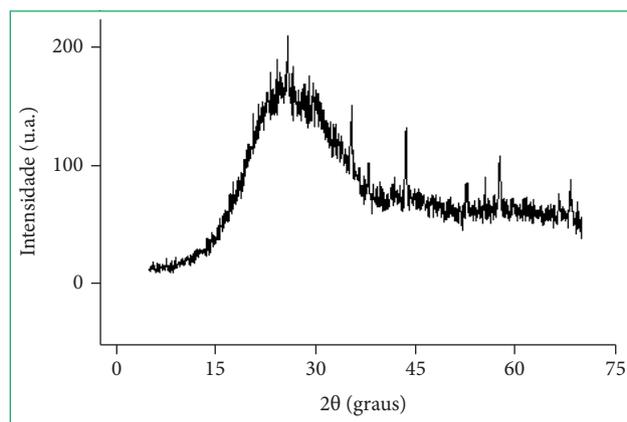


Figura 2: Difratograma de raios-X da amostra B.

Gobbo⁹ informa que a presença de substâncias amorfo promove a formação de um arqueamento muito comum em materiais com fase vítrea.

No entanto, as variações existentes nos difratogramas da presente análise não foram suficientes para caracterizar uma alteração na estrutura das amostras.

Os resultados obtidos nas análises por FTIR são apresentadas nas Figs. 3 e 4 respectivamente. Picos característicos dos vidros de soda-cal relatados por Silva¹⁰ foram encontrados nos espectros. O espectro abaixo apresenta algumas frequências características como picos de ligações de silício e oxigênio para SiO₄ tetraédrico (442·cm⁻¹), picos de ligações SiO₄ de grupos tetraédricos (771·cm⁻¹), picos indicando superfícies tetraédricas SiO₄ (987·cm⁻¹) e picos que indicam a presença de água livre presente apenas na amostra de vidro do grupo B (2880·cm⁻¹). As duas figuras apresentam picos aparentemente próximos característicos do vidro de soda-cal.

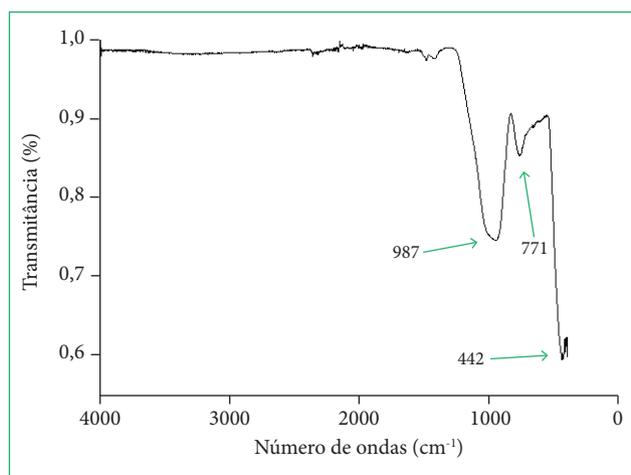


Figura 3: Espectro de infravermelho da amostra do vidro do grupo A.

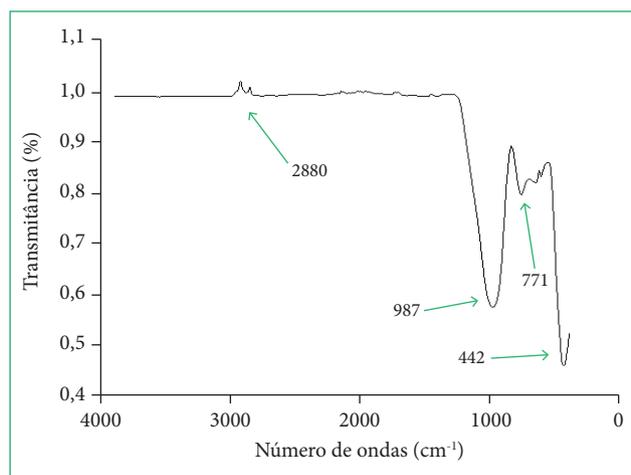


Figura 4: Espectro de infravermelho da amostra do vidro do grupo B.

As amostras foram submetidas à técnica de difração a laser para verificar a distribuição granulométrica. Nessa análise, a distribuição do tamanho de partícula se dá por gráficos que expressam o volume percentual de cada tamanho.

A amostra C₁ apresentou redução de tamanho de partícula muito inferior às demais amostras. Acredita-se que o movimento

rotacional do equipamento a 100 rpm não gerou energia suficiente para obter cominuição eficiente da amostra. A Tabela 2 representa a distribuição granulométrica da amostra C₁ após o processamento no moinho de alta energia.

Tabela 2: Distribuição granulométrica da amostra C₁.

Tamanho de partícula (mm)	Massa (g)	% mássica
0,04	0,013	0,02
0,05	0,032	0,05
0,07	0,036	0,06
0,10	0,157	0,26
0,18	0,130	0,22
0,25	0,045	0,07
0,30	0,175	0,29
0,50	0,544	0,90
0,85	2,964	4,91
1,70	56,269	93,21

Ao analisar a distribuição granulométrica da amostra C₁, percebeu-se que aproximadamente 93% da amostra mantiveram seus tamanhos dentro da faixa de tamanho estipulado como material de partida. Menos de 1% da amostra ficou com tamanho de partícula menor que 500 μm.

A Fig. 5 representa a distribuição granulométrica das amostras C₂, C₃, C₄ e C₅. As amostras apresentaram uma redução significativa do tamanho de partícula. Da amostra C₂, 50% das partículas apresentaram tamanhos menores que 90 μm com diâmetro de Sauter de 18,286 μm.

Mendes¹¹ relaciona a distribuição granulométrica de microesferas de vidro com o coeficiente de atrito. Tais esferas possuíam uma distribuição média de partículas consideradas finas se comparadas com as outras amostras analisadas em seu trabalho. Não houve uma variação tão pronunciada se comparada às análises anteriores. Pode-se observar na Fig. 5 uma redução do tamanho de partícula na distribuição granulométrica com o aumento da velocidade de rotação do moinho de alta energia.

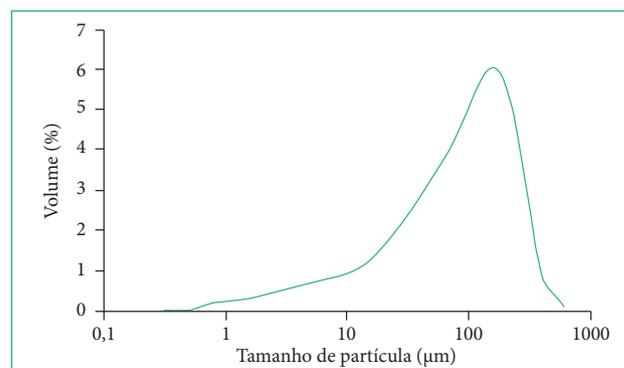


Figura 5: Relação entre tamanho de partículas e partículas passantes das amostras.

A Fig. 6 ilustra a relação da velocidade de rotação do moinho com o diâmetro de Sauter. A Tabela 3 apresenta o erro experimental de velocidade de cada amostra.

A Fig. 7 representa a distribuição granulométrica de composição monomodal com um pico de concentração de volume da amostra C_2 com tamanho entre 100 e 200 μm . A amostra C_3 apresentou um salto na redução no tamanho de partícula em relação à amostra C_2 . A distribuição granulométrica da amostra C_3 também é monomodal assimétrica crescente, todavia uma leve concentração de partículas com tamanhos entre 20 e 30 μm representada na Fig. 8 sinaliza a formação de um segundo pico.

A amostra C_4 apresentou um diâmetro de Sauter de 3,688 μm (pequena variação em relação a C_3). A Fig. 9 acentua a formação de uma distribuição granulométrica de composição bimodal assimétrica, fenômeno que pode ser causado pela influência do atrito presente entre as partículas. De fato, com o aumento da velocidade de rotação do moinho, as partículas

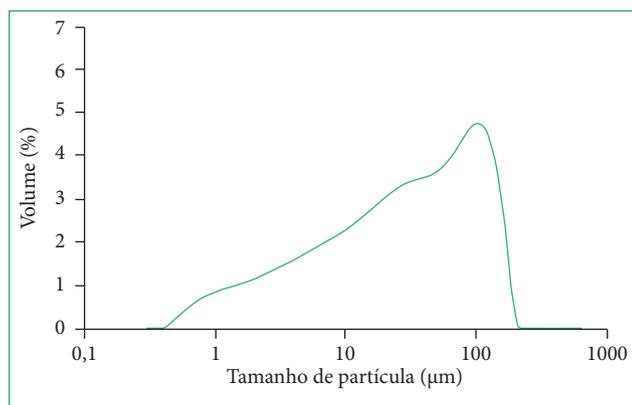


Figura 6: Relação da velocidade de rotação do moinho com o diâmetro de Sauter.

Tabela 3: Erro experimental de cada amostra.

Velocidade (rpm)	Erro experimental
200	18,286 \pm 0,8 μm
300	6,77 \pm 0,1 μm
400	3,688 \pm 0,03 μm
500	3,059 \pm 0,01 μm

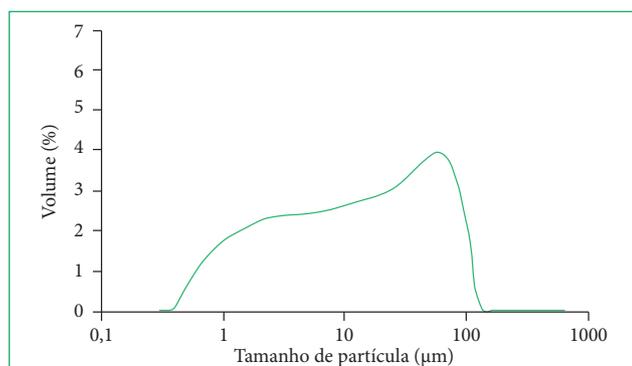


Figura 7: Distribuição granulométrica da amostra C_2 .

passam a ter maior contato com os meios de moagem, assim como maior contato com as outras partículas presentes do processamento.

Tais fatos corroboram a curva da amostra C_5 (Fig. 10) que acarretou em uma distribuição granulométrica de composição bimodal bem mais definida que nas análises anteriores. Conforme as partículas das amostras assumem valores cada vez menores, a curva da distribuição granulométrica passa de uma composição monomodal para uma composição bimodal.

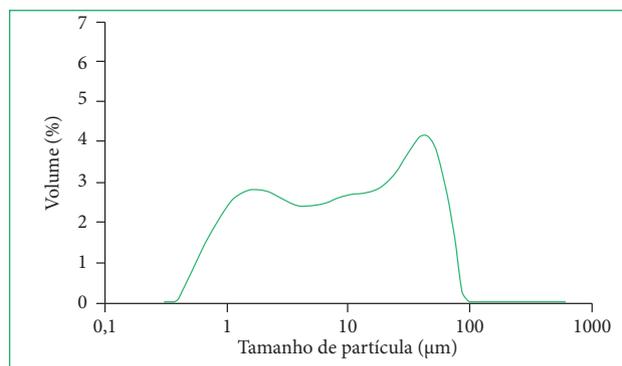


Figura 8: Distribuição granulométrica da amostra C_3 .

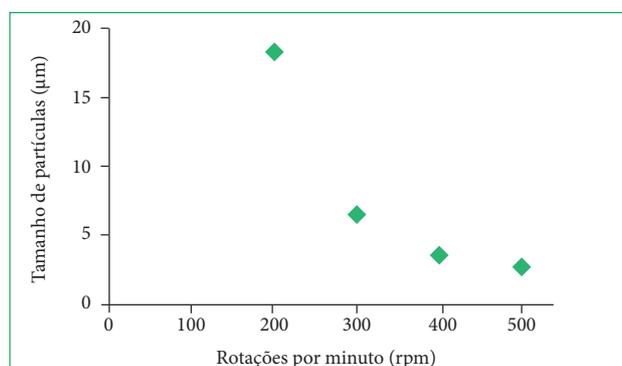


Figura 9: Distribuição granulométrica da amostra C_4 .

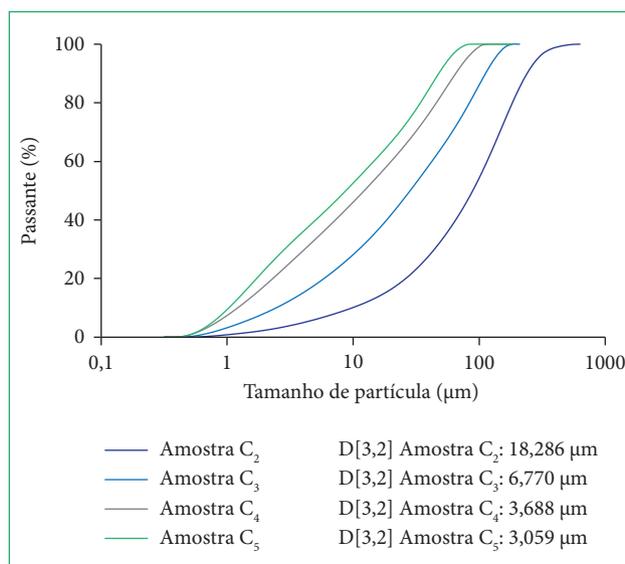


Figura 10: Distribuição granulométrica da amostra C_5 .

A curva apresenta ainda uma possível formação de uma composição bimodal simétrica caracterizada por dois picos bem definidos e com tamanhos próximos, justificada pelo aumento do volume de partículas em torno de 9 µm e a redução de partículas com tamanhos próximos a 4,5 µm. Na análise da última amostra, as partículas apresentaram um diâmetro médio de Sauter de 3,054 µm.

CONCLUSÃO

As análises realizadas neste trabalho evidenciam que a velocidade de rotação na moagem em moinho de alta energia do tipo planetário teve grande influência na distribuição granulométrica do vidro de soda-cal. Os tamanhos de partículas alcançados permitem o uso do moinho de alta energia para a obtenção de partículas finas. Verificou-se que, para rotações muito baixas próximas de 100 rpm, e devido a dureza do material em estudo (vidro de soda-cal), este tempo de moagem não foi promissor para esta amostra. Observou-se que acima de 200 rpm o equipamento mostrou-se eficaz para o presente trabalho.

As análises de DRX indicam uma estrutura amorfa comum nos materiais à base de sílica. Nos resultados das análises de FTIR observou-se a presença das bandas características dos vidros de soda-cal.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao DEQ/IT/UFRRJ pelo apoio na realização das análises.

REFERÊNCIAS

- López DAR, Azevedo CAP. III-065 - Avaliação da utilização de vidro cominuído como material agregado ao concreto. In: 22º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental; 2003 Set 14-19; Joinville (SC): ABES; 2003. [Acesso: 20 Dez. 2019]. Disponível em: <https://docplayer.com.br/8857585-22o-congresso-brasileiro-de-engenharia-sanitaria-e-ambiental-iii-065-avaliacao-da-utilizacao-de-vidro-cominuido-como-material-agregado-ao-concreto.html>
- Paiva OA. Resíduo Industrial de Vidro Moído em Argamassa de Cimento Portland. Dissertação [Mestrado em Engenharia Civil]. Manaus (AM): Universidade Federal do Amazonas; 2009. [Acesso: 20 Dez. 2019]. Disponível em: <https://tede.ufam.edu.br/handle/tede/3480>
- Bardini IS, Marchiori TB. Um Estudo Exploratório do Uso de Vidro Reciclado como Agregado de Concretos. Trabalho de Conclusão de Curso. Tubarão (SC): Universidade do Sul de Santa Catarina; 2007.
- Weiss J, Decker EA, McClements DJ, Kristbergsson K, Helgason T, Awad T. Solid Lipid Nanoparticles as Delivery Systems for Bioactive Food Components. *Food Biophys.* 2008;3:146-54. <https://doi.org/10.1007/s11483-008-9065-8>
- Leal JM. Tecnologia do Pó de Turmalina Preta. Tese [Doutorado em Engenharia de Materiais]. Ouro preto (MG): Universidade Federal de Ouro Preto; 2008. [Acesso: 20 Dez. 2019]. Disponível em: <https://repositorio.ufop.br/handle/123456789/2768>
- Kaysser WA, Weise W. Powder Metallurgy and Sintered Materials. *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry.* 2000;30:1-40. https://doi.org/10.1002/14356007.a22_105
- Suryanarayana C. Mechanical alloying and milling. *Prog Mater Sci.* 2001;46(1-2):1-184. [https://doi.org/10.1016/S0079-6425\(99\)00010-9](https://doi.org/10.1016/S0079-6425(99)00010-9)
- Kubaski ET. Efeito das variáveis de moagem e dos moinhos de alta energia sobre a síntese do composto intermetálico NiAl. Tese [Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais]. São Paulo (SP): Escola Politécnica, Universidade de São Paulo; 2010. <https://doi.org/10.11606/T.3.2010.tde-12082010-164815>
- Gobbo LA. Aplicação da difração de Raios-X e Método de Rietveld no estudo do cimento Portland. Tese [Doutorado]. São Paulo (SP): Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo; 2009.
- Silva AC. Incorporação de resíduo galvânico em vidro silicato obtido a partir de finos de sílica. Dissertação [Mestrado]. São Paulo (SP): Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares; 2004.
- Mendes TM. Influência do coeficiente de atrito entre os agregados e da viscosidade da matriz no comportamento reológico de suspensões concentradas heterogêneas. Dissertação [Mestrado em Engenharia Civil]. São Paulo (SP): Escola Politécnica, Universidade de São Paulo; 2008. <https://doi.org/10.11606/D.3.2008.tde-15082008-153402>