PREPARO E OTIMIZAÇÃO DE FINOS RESIDUAIS PARA A PRODUÇÃO DE CIMENTOS DE SILICATO DE MAGNÉSIO HIDRATADO (M-S-H)

Preparation and optimization of residual fines for the production of Magnesium Silicate Hydrate (M-S-H) cements

Victor Rezende Carvalho
Universidade Federal de Ouro Preto | Ouro Preto, Minas Gerais | victor.rezende.carvalho@gmail.com

Marialaura Herrera Rosas
Universidade Federal de Ouro Preto | Ouro Preto, Minas Gerais | marialaura.rosas@aluno.ufop.edu.br

Isabelly de Almeida Tambasco
Universidade Federal de Ouro Preto | Ouro Preto, Minas Gerais | isabelly.tambasco@aluno.ufop.edu.br

Maria Antônia Lopes Barbosa
Universidade Federal de Ouro Preto | Ouro Preto, Minas Gerais | maria.alb@aluno.ufop.edu.br

Augusto Cesar da Silva Bezerra
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais | Belo Horizonte, Minas Gerais | augustobezerra@cefetmg.br

Ricardo André Fiorotti Peixoto
Universidade Federal de Ouro Preto | Ouro Preto, Minas Gerais | ricardofiorotti@ufop.edu.br

RESUMO

Este trabalho propõe uma estratégia de preparo e otimização de finos residuais para serem utilizados na produção de cimentos de silicato de magnésio hidratado (M-S-H). Foram avaliados resíduos da mineração de quartzito (RQT) e esteatito (pedra-sabão; RPS) como potenciais fílers e uma cinza de bagaço de cana-de-açúcar (CBCA) como potencial fonte de sílica (SiO_2). Inicialmente, os resíduos foram caracterizados por fluorescência de Raios-X. Em seguida, os materiais foram submetidos a um estudo de moagem e então caracterizados quanto à morfologia, massa específica e superfície específica. Os resultados mostraram que a CBCA beneficiada possui elevado teor de sílica (60,1%) e elevada área superficial (49,9 m^2/g), enquanto o RQT e o RPS beneficiados apresentam elevada finura (D_{90} de 13,5 e 42,9 µm, respectivamente) e boa distribuição granulométrica. O estudo apresenta novas possibilidades para a pesquisa sobre ligantes M-S-H, oferecendo alternativas para o aproveitamento de resíduos agroindustriais e de mineração na construção civil.

Palavras-chave: Cimentos magnesianos; Resíduos industriais; Cinza de bagaço de cana-de-açúcar; Quartzito; Pedra-sabão.

ABSTRACT

This work proposes a strategy for preparing and optimizing residual fines to be valorized as raw materials for producing magnesium silicate hydrate (M-S-H) cement. Quartzite (QT) and steatite (soapstone; ST) mining tailings were evaluated as potential fillers, and sugarcane bagasse ash (SCBA) as a potential silica (SiO_2) source. Initially, the residues were characterized by X-ray fluorescence. The materials were then subjected to a grinding study and characterized regarding morphology, specific gravity, and specific surface area. The results showed that the processed SCBA has a high silica content (60.1%) and a high surface area (49.9 m^2/g), while the processed QT and ST have high fineness (D_{90} of 13.5 and 42. 9 µm, respectively) and suitable particle size distribution. This study presents new possibilities for M-S-H binders research, offering alternatives for using agro-industrial and mining waste in civil construction.

Keywords: Magnesia-based cements; Industrial residues; Sugarcane bagasse ash; Quartzite; Soapstone.

1 INTRODUÇÃO

A elevada taxa de emissão de CO_2 e o consumo massivo de matérias-primas não renováveis atribuídos à produção do cimento Portland estimulam o desenvolvimento de compósitos cimentícios de baixo carbono e o aproveitamento de resíduos na construção civil. Diante desse cenário, o desenvolvimento de cimentos de silicato de magnésio hidratado (M-S-H) com a utilização de resíduos provenientes da agroindústria e da mineração torna-se uma alternativa promissora para a indústria.

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, cujo processamento para a produção de etanol e açúcar gera uma grande quantidade de bagaço, que pode ser queimado para a produção de eletricidade em centrais termoelétricas (CONAB, 2023; PARIS *et al*., 2016). A cinza resultante da combustão do bagaço, conhecida como cinza de bagaço de cana-de-açúcar, é um resíduo que possui propriedades físicas e químicas de interesse para a construção civil. No entanto, o material vem sendo frequentemente depositado em aterros sanitários, gerando problemas de saúde e contaminação de solos adjacentes e águas subterrâneas (AMIN, 2011; FRÍAS; VILLAR; SAVASTANO, 2011; PARIS *et al*., 2016).

Além da produção agroindustrial, o Brasil também se destaca pela forte indústria de mineração. A região do quadrilátero ferrífero possui importantes polos de extração de minerais, como a microrregião de Ouro Preto-MG. A mineração de quartzito e esteatito (pedra-sabão) são exemplos de atividades de exploração desenvolvidas no local (PIRES, 2007; RODRIGUES; LIMA, 2012). Apesar de serem importantes para a economia da região, essas atividades geram resíduos que se acumulam no meio ambiente, poluindo o ar e o solo e prejudicando a saúde da população (PIRES, 2007; TORRES; VARAJÃO; SABIONI, 2015).

O presente trabalho propõe uma metodologia de preparo e otimização de resíduos industriais para a produção de matrizes de cimento M-S-H. Pesquisas anteriores demonstraram a viabilidade de utilização de cinzas de casca de arroz como fonte de sílica (SiO_2) e de fílers naturais de calcário e quartzo na produção de ligantes M-S-H (TRAN; SCOTT, 2017; CISE; UNLUER, 2019; TRAN; DHAKAL; SCOTT, 2020; CAPELO; MÁRMOL; ROSSIGNOLO, 2023). Neste estudo, uma cinza de bagaço de cana-de-açúcar foi avaliada como potencial fonte de SiO_2 e resíduos da mineração de quartzito e pedra-sabão foram avaliados como potenciais materiais de preenchimento. A pesquisa considera o contexto social, ambiental e econômico brasileiro e da microrregião de Ouro Preto-MG, propondo alternativas sustentáveis para a valorização de resíduos agroindustriais e de mineração no desenvolvimento de compósitos cimentícios ecoeficientes.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 MATERIAIS

Os resíduos propostos estão apresentados na Figura 1. A cinza de bagaço de cana-de-açúcar (CBCA) avaliada como potencial fonte de SiO_2 foi obtida de uma usina sucroalcooleira (BEVAP Bioenergia, João pinheiro-MG). Como materiais de preenchimento, foram avaliados resíduos da mineração de quartzito (RQT; Sulminas Sílicas, Três Corações-MG) e da mineração de pedra-sabão (RPS; Ouro Preto Pedra Sabão, Ouro Preto-MG).

Figura 1: Resíduos *in natura*.



Cinza de bagaço (CBCA) Resíduo de pedra-sabão (RPS) Resíduo de quartzito (RQT)

Fonte: Autores.

2.2 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA

Os resíduos propostos (CBCA, RQT e RPS) foram caracterizados quimicamente por fluorescência de Raios-X (FRX; PANalytical Epsilon3x). Para este propósito, os materiais foram cominuídos em almofariz de porcelana até passarem pela peneira com abertura de 75 µm.

2.3 ESTUDOS DE MOAGEM

Os materiais foram secos em estufa à 105 °C por 24 h e depois submetidos a um programa de moagem de alta eficiência (moinho de bolas planetário Restch PM 100; esferas de zircônia; 400 rpm). A moagem foi conduzida por até 60 minutos, com amostras sendo coletadas a cada 5 minutos.

As amostras *in natura* e coletadas nos estudos de moagem foram caracterizadas por granulometria a laser (Bettersize 2000; meio de dispersão: água destilada). Assim, a partir da análise das curvas de moagem resultantes da caracterização granulométrica, os tempos de moagem ótimos foram definidos para cada material proposto.

2.4 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E MORFOLÓGICA

As massas específicas dos materiais (CBCA, RQT e RPS) foram determinadas por picnometria à vácuo (adaptado de ABNT, 1984). As superfícies específicas dos finos obtidos pelos tempos de moagem ótimos foram determinadas através do método BET (Anton Paar Nova 600; adsorção de N_2). Por fim, as morfologias dos resíduos processados foram analisadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV; TESCAN Vega3; alto vácuo; 20 kV; elétrons secundários; amostras revestidas por ouro).

3 RESULTADOS

3.1 COMPOSIÇÃO QUÍMICA DOS MATERIAIS

A Tabela 1 exibe as composições químicas da fonte de SiO_2 e dos fílers residuais avaliados neste trabalho.

Tabela 1: Composição química dos resíduos.

Componente/Teor (%)	CBCA	RQT	RPS
SiO_2	60,1	91,9	44,5
MgO	1,4	0,2	29,9
Al_2O_3	14,9	5,4	4,1
Fe_2O_3	4,3	0,8	5,3
CaO	2,6	-	2,7
K_2O	2,6	0,9	-
P_2O_5	1,7	-	-
Outros	1,6	0,8	0,8
Perda ao fogo	10,8	0,4	12,7

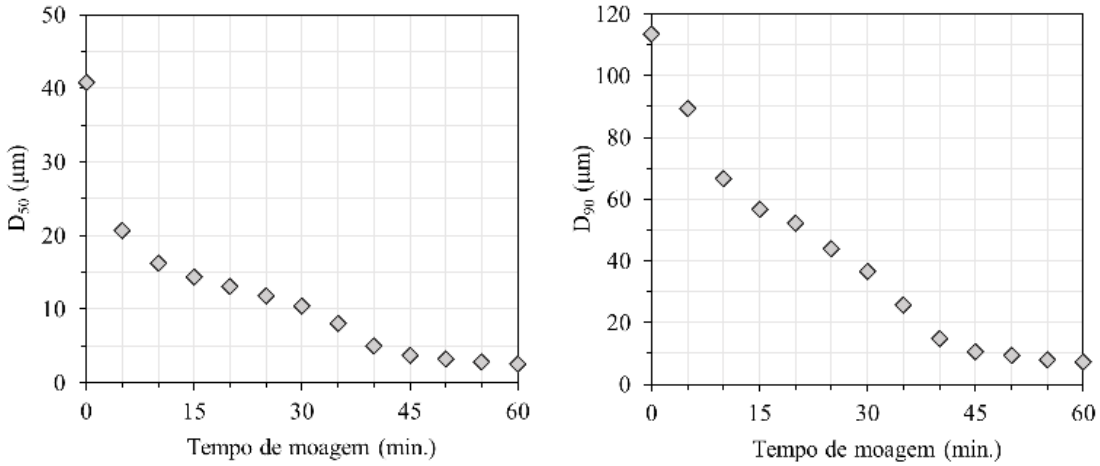
Fonte: Autores.

A CBCA é constituída majoritariamente por silício e alumínio, contendo outros elementos em menor proporção, como ferro, cálcio e magnésio. Sua reatividade é diretamente relacionada ao teor de SiO_2 amorfo (ZHANG *et al.*, 2020). Esses resultados estão em conformidade com estudos que avaliaram o material como agente pozolânico em matrizes de cimento Portland (FRÍAS; VILLAR; SAVASTANO, 2011; NETO et al., 2021) e como precursor alternativo em matrizes álcali-ativadas (SOUSA *et al.*, 2022). O RQT origina-se de uma rocha composta basicamente por quartzo, o que justifica o alto teor de SiO_2 em sua composição (MARTINS; PEIXOTO; MENDES, 2023). O RPS, por sua vez, possui elevados teores de silício e magnésio. Isso se deve ao fato de que o esteatito é uma rocha constituída principalmente por talco, mineral composto de silicato de magnésio hidratado (LUUKKONEN *et al.*, 2019; SOUZA; SILVA; D'ALMEIDA, 2021). O material estudado também apresenta teores significativos de ferro, cálcio e alumínio, possivelmente relacionados com a presença de caulinita e minerais filossilicatos do grupo clorita, como o clinocloro (RODRIGUES; LIMA, 2012).

3.2 DEFINIÇÃO DOS TEMPOS ÓTIMOS DE MOAGEM

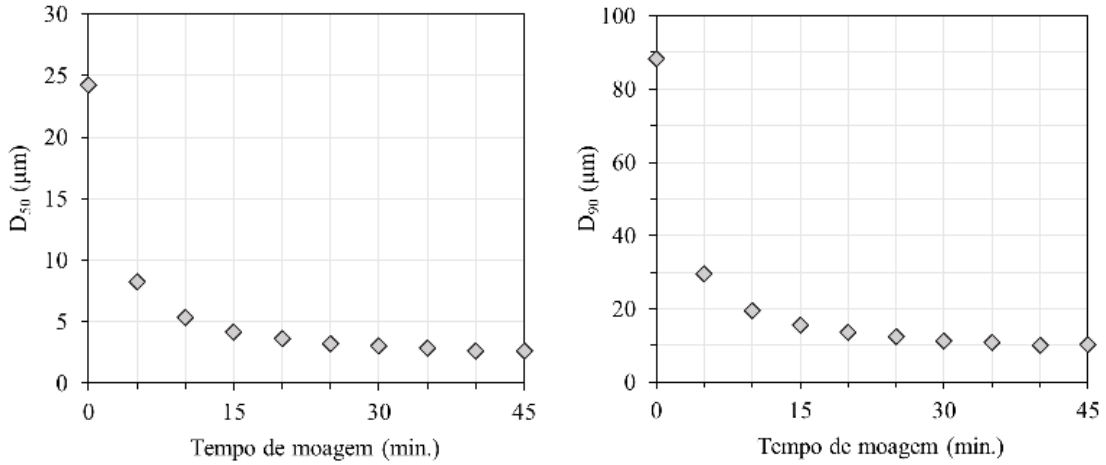
As Figuras 2, 3 e 4 apresentam os resultados dos estudos de moagem da CBCA, do RQT e do RPS, respectivamente. As curvas relacionam o tempo de moagem de alta eficiência com os parâmetros de finura D_{50} e D_{90}, que indicam os diâmetros das partículas correspondentes a 50% e 90% do volume acumulado na distribuição granulométrica, respectivamente.

Figura 2: Curvas de moagem da CBCA.



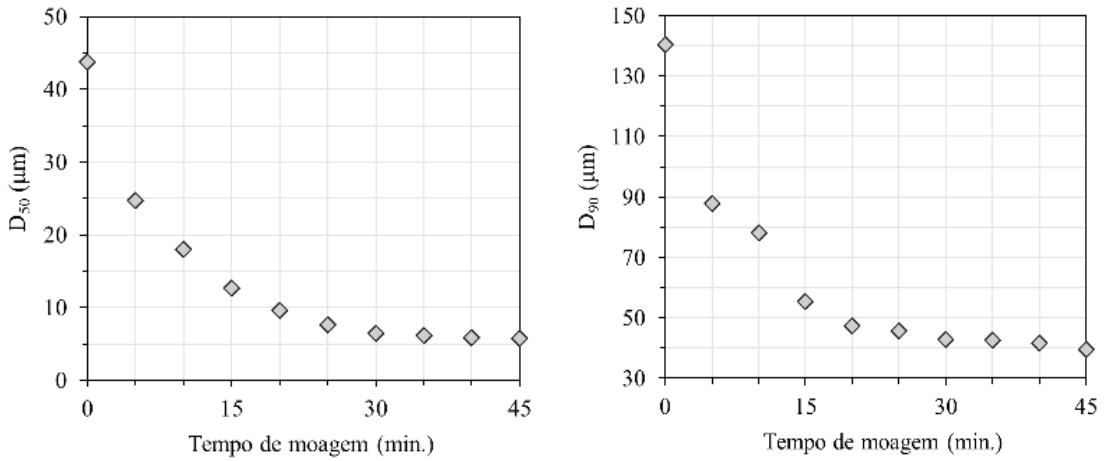
Fonte: Autores.

Figura 3: Curvas de moagem do RQT.



Fonte: Autores.

Figura 4: Curvas de moagem do RPS.



Fonte: Autores.

Após 45 minutos, a eficiência de moagem da CBCA reduziu significativamente. Assim, um tempo ótimo de 45 minutos foi definido para o seu beneficiamento, resultando em um material com D_{50} de 3,7 µm e D_{90} de 10,6 µm. Com relação ao RQT, nota-se uma importante redução dos parâmetros de finura após os primeiros 5 minutos. A eficiência da moagem, no entanto, foi pouco significativa a partir dos 25 minutos, o que induziu a determinação de um tempo ótimo de 20 minutos para o preparo do material. O RQT processado apresentou D_{50} de 3,6 µm e D_{90} de 13,5 µm. Por fim, as curvas relacionadas ao RPS indicaram um patamar a partir dos 30 minutos de moagem. Por esse motivo, um tempo ótimo de 30 minutos foi definido, resultando em um

material com D_{50} de 6,4 µm e D_{90} de 42,9 µm. As reduções de D_{90} dos resíduos in natura para os materiais beneficiados foram de 90,7% para a CBCA, 84,6% para o RQT e 69,5% para o RPS.

3.3 PROPRIEDADES FÍSICAS E MORFOLÓGICAS DOS MATERIAIS

A Tabela 2 exibe as propriedades físicas da fonte de SiO_2 e dos fílers residuais beneficiados após a determinação dos tempos ótimos de moagem.

Tabela 2: Propriedades físicas dos resíduos beneficiados.

Parâmetro	CBCA	RQT	RPS
D90 (µm)	10,6	13,5	42,9
D50 (µm)	3,7	3,6	6,4
D10 (µm)	1,1	1,0	1,5
Massa específica (g/cm³)	2,32	2,61	2,78
Superfície específica (m²/g)	49,9	4,8	14,4

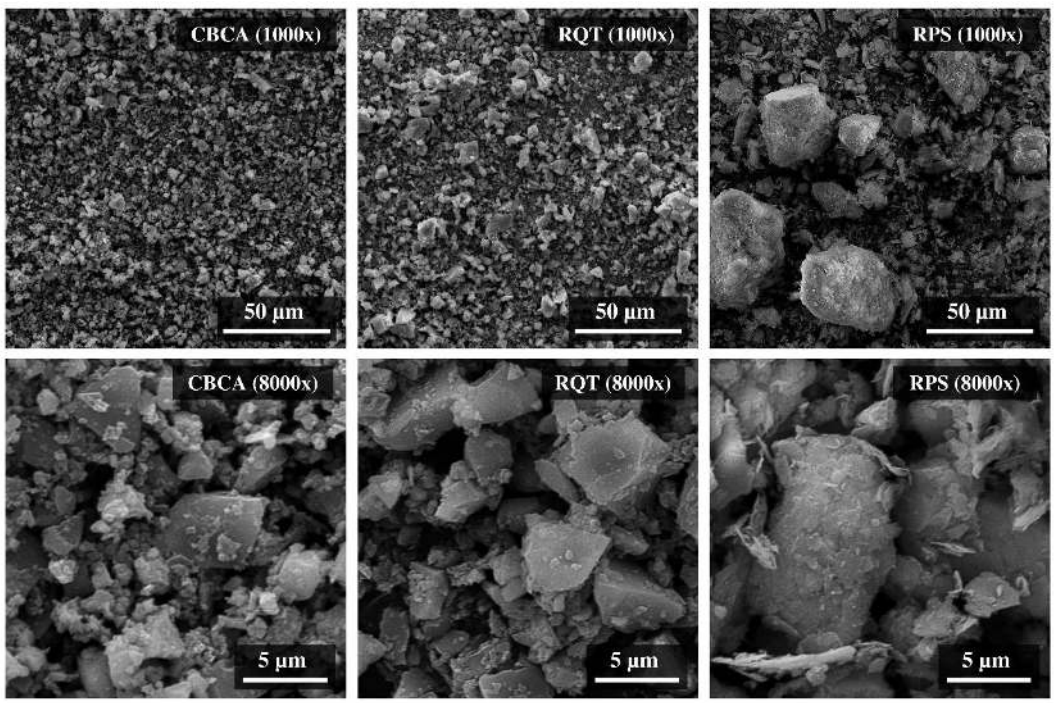
Fonte: Autores.

A CBCA apresentou a maior finura (D_{90} de 10,6 µm), com resultados semelhantes aos do RQT (D_{90} de 13,5 µm). Os resultados obtidos para esses materiais foram significativamente inferiores aos do RPS (D_{90} de 42,9 µm). De modo geral, os resíduos beneficiados neste estudo apresentaram elevada finura quando comparados aos de estudos da literatura. Sousa *et al*. (2022) e Zhang *et al.* (2020) beneficiaram CBCA e obtiveram parâmetros D_{90} de 64,4 e 22,1 µm, respectivamente. Ainda, Carvalho *et al.* (2021) e Li *et al.* (2021) processaram RQT e utilizaram powders com D_{90} de 13,0 µm e D_{50} de 6,3 µm, respectivamente. Para fins de comparação, todos os materiais propostos apresentaram finura superior ou equivalente à do cimento Portland convencional, cujo D_{90} pode variar entre 30 e 60 µm (CARVALHO *et al*., 2019, 2023; COSTA *et al*., 2022).

A maior massa específica do RPS (2,78 g/cm³) está relacionada ao seu maior teor de Fe_2O_3 (5,3%), que possivelmente também contribuiu para sua menor eficiência de moagem (PAN *et al*., 2016). Embora a CBCA também contenha um teor significativo de óxido de ferro (4,3%), o material apresenta 10,8% de perda ao fogo, associada principalmente ao CO_2 emitido durante sua queima. Assim, a maior massa específica do RQT (2,61 g/cm³) em relação à CBCA (2,32 g/cm³) pode ser justificada pela maior massa molar do SiO_2 em relação ao CO_2, visto que a perda ao fogo do resíduo de quartzito é consideravelmente inferior (0,4%).

As imagens de MEV (Figura 5) complementam os resultados apresentados na Tabela 2. Os registros com ampliação de 1.000x confirmam que o RPS beneficiado possui partículas de maior dimensão, enquanto a CBCA beneficiada é o material de maior finura.

Figura 5: Imagens dos resíduos beneficiados obtidas por MEV.



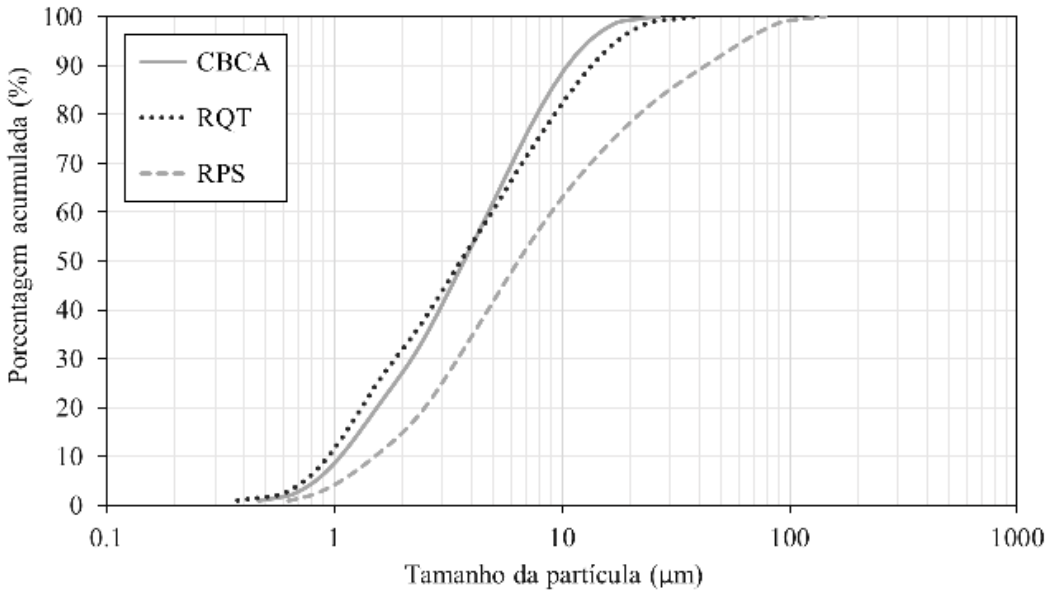
Fonte: Autores.

A imagem da CBCA com ampliação de 8.000x revela a presença de grãos irregulares e de diferentes tamanhos, como observado em outros estudos (PEREIRA *et al.,* 2018; SOUSA *et al.,* 2022; ZHANG *et al.*, 2020). As partículas mais finas do material, constituídas principalmente por óxidos de silício e alumínio, se aglomeram em torno de partículas maiores e angulares, que possivelmente correspondem a grãos de quartzo (CORDEIRO *et al.*, 2009; FRÍAS; VILLAR; SAVASTANO, 2011). A elevada finura e tendência de aglomeração do material possivelmente contribuíram para sua elevada superfície específica (49,9 m²/g), propriedade determinante para avaliação da sua reatividade (FIGUEIREDO; PAVÍA, 2020).

Com relação ao RQT beneficiado, seus grãos constituídos basicamente por quartzo apresentam formato angular e superfície pouco rugosa, assim como reportado por Li *et al.* (2021). Ainda, o RPS beneficiado possui partículas esféricas e rugosas, como mostrado por Kannaiyan *et al.* (2022). Também é possível observar formas lamelares e alongadas, estrutura característica do talco (AL-KROOM *et al.,* 2024; DING; OUYANG; YANG, 2016). A diferença nas características morfológicas, em especial na rugosidade, justifica a maior superfície específica do RPS (14,4 m²/g) em comparação ao RQT (4,8 m²/g).

Por fim, a Figura 6 exibe as distribuições granulométricas dos resíduos estudados. A inclinação das curvas referentes ao RQT e ao RPS indica uma granulometria bem distribuída, característica determinante para o bom desempenho de materiais de preenchimento. O uso dos fílers busca otimizar o empacotamento de partículas e as propriedades de hidratação das matrizes, melhorando o refinamento de poros e o desempenho mecânico dos compósitos (CARVALHO *et al.,* 2019; JOHN *et al.,* 2018).

Figura 6: Distribuição granulométrica dos resíduos beneficiados.



Fonte: Autores.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo buscou otimizar diferentes finos residuais visando sua aplicação na produção de cimentos M-S-H. Os resultados revelaram que:

- A CBCA apresentou elevado teor de SiO_2 (60,1%), além de elevada finura (D_{90} de 10,6 µm) e superfície específica (49,9 m²/g) após 45 minutos de moagem. Essas características a credenciam como potencial fonte de sílica na produção de ligantes M-S-H;

- O RQT e o RPS apresentaram D_{90} de 13,5 e 42,9 µm após 20 e 30 minutos de moagem, respectivamente. Os resíduos beneficiados também mostraram boa distribuição granulométrica, sendo potenciais materiais de preenchimento (fílers).

As estratégias apresentadas apontam novas possibilidades para a valorização de resíduos da agroindústria e da mineração. Assim, o estudo contribui de forma objetiva com a pesquisa sobre cimentos à base de óxido de magnésio e sílica, destacando os resíduos industriais como potenciais constituintes de matrizes M-S-H.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) [processo 88887.575714/2020-00], do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) [processo 403545/2020-0; 304108/2022-7], da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) [RED-00191-23], da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) e do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG). Os autores também agradecem ao grupo Vertuos (Rolth do Brasil), à Samarco Mineração, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFOP (PROPEC) e ao Grupo de Pesquisa em Resíduos Sólidos (Reciclos/CNPq) pelo apoio, infraestrutura e colaboração.

REFERÊNCIAS

ABNT. **NBR 6508: Grãos passantes pela malha da peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica aparente**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1984.

AL-KROOM, Hussein; AL-JABRI, Khalifa; TAWFIK, Taher A.; ABDEL GAWWAD, Hamdy A.; RASHAD Alaa M. Investigating the promising effect of thermally-treated talc powder on the performance of alkali-activated slag cement. **Innovative Infrastructure Solutions**, v. 9, n. 8, 1 ago. 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s41062-024-01588-1>

AMIN, Noor-ul. Use of bagasse ash in concrete and its impact on the strength and chloride resistivity. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 23, n. 5, p. 717–720, maio 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000227>

CAPELO, Alda R.; MÁRMOL, Gonzalo; ROSSIGNOLO, João Adriano. Optimization of the rice husk ash production process for the manufacture of magnesium silicate hydrate cements. **Journal of Cleaner Production**, v. 425, 1 nov. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138891>

CARVALHO, José Maria Franco de; DEFÁVERI, Keoma; MENDES, Júlia Castro; SCHMIDT, Wolfram; HANS CARSTEN, Kühne; PEIXOTO, Ricardo André Fiorotti. Influence of particle size-designed recycled mineral admixtures on the properties of cement-based composites. **Construction and Building Materials**, v. 272, n. 121640, 22 fev. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121640>

CARVALHO, José Maria Franco de; DE MELO, Tainá Varela; FONTES, Wanna Carvalho; BATISTA, Júnio Oliveira dos Santos; BRIGOLINI, Guilherme Jorge; PEIXOTO, Ricardo André Fiorotti. More eco-efficient concrete: An approach on optimization in the production and use of waste-based supplementary cementing materials. **Construction and Building Materials**, v. 206, p. 397–409, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.054>

CARVALHO, Victor Rezende; COSTA, Laís Cristina Barbosa; DA FONSECA ELÓI, Fernanda Pereira; BEZERRA, Augusto Cesar da Silva; CARVALHO, José Maria Franco de; PEIXOTO, Ricardo André Fiorotti. Performance of low-energy steel slag powders as supplementary cementitious materials. **Construction and Building Materials**, v. 392, p. 131888, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131888>

CONAB. Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar. Brasília: **Companhia Nacional de Abastecimento**, 2023. v. 10.

CORDEIRO, Guilherme Chagas; TOLEDO F., Romildo Dias; TAVARES, Luís Marcelo; FAIRBAIRN, Eduardo de Moraes Rego. Ultrafine grinding of sugar cane bagasse ash for application as pozzolanic admixture in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 39, n. 2, p. 110–115, fev. 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.11.005>

DING, Wejin; OUYANG, Jing; YANG, Huaming. Synthesis and characterization of nesquehonite (MgCO3·3H2O) powders from natural talc. **Powder Technology**, v. 292, p. 169–175, 1 maio 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.01.037>

FIGUEIREDO, R. Lima; PAVÍA, S. A study of the parameters that determine the reactivity of sugarcane bagasse ashes (SCBA) for use as a binder in construction. **SN Applied Sciences**, v. 2, n. 1515, 1 set. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03224-w>

FRÍAS, Moisés.; VILLAR, Ernesto.; SAVASTANO, Holmer. Brazilian sugar cane bagasse ashes from the cogeneration industry as active pozzolans for cement manufacture. **Cement and Concrete Composites**, v. 33, n. 4, p. 490–496, abr. 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.02.003>

JOHN, Vanderley M.; DAMINELI, Bruno L.; QUATTRONE, Marco; PILEGGI, Rafael G. Fillers in cementitious materials — Experience, recent advances and future potential. **Cement and Concrete Research**, v. 114, p. 65–78, 1 dez. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.09.013>

KANNAIYAN, Sathiyalingam; HUANG, Song Jeng; RATHNARAJ, David; SRINIVASAN, S. A. Effect of ball-milled steatite powder on the latent heat energy storage properties and heat charging–discharging periods of paraffin wax as phase change material. **Micromachines**, v. 13, n. 9, 1 set. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/mi13091456>

LI, Huajian; WANG, Zhen; SUN, Ruru; HUANG, Fali; YI, Zhonglai; YUAN, Zhengcheng; WEN, Jiaxin; LU, Lin; YANG, Zhengxian. Effect of different lithological stone powders on properties of cementitious materials. **Journal of Cleaner Production**, v. 289, n. 125820, 20 mar. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125820>

LUUKKONEN, Tero; ABDOLLAHNEJAD, Zahra; YLINIEMI, Juho; MASTALI, Mohammad; KINNUNEN, Paivo; ILLIKAINEN, Mirja. Alkali-activated soapstone waste - Mechanical properties, durability, and economic prospects. **Sustainable Materials and Technologies**, v. 22, n. e00118, 1 dez. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2019.e00118>

MARTINS, Letícia Matias; PEIXOTO Ricardo André Fiorotti; MENDES, Júlia Castro. Quartzite tailings in civil construction materials: a systematic review. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 25, n. 6, p. 1807–1824, 1 ago. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10098-023-02492-5>

NETO, José da Silva Andrade; FRANÇA, Mavisson Júlio Santos de; DE AMORIM JÚNIOR, Nilson Santana; RIBEIRO, Daniel Véras. Effects of adding sugarcane bagasse ash on the properties and durability of concrete**. Construction and Building Materials**, v. 266, n. 120959, 10 jan. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120959>

PAN, Shu-Yuhan; ADHIKARI, Rahul; CHEN, Yi-Hung; Li, Ping; CHIANG, Pen-Chi. Integrated and innovative steel slag utilization for iron reclamation, green material production and CO2 fixation via accelerated carbonation. **Journal of Cleaner Production**, v. 137, p. 617–631, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.112>

PARIS, Jerry M.; ROESSLER, Justin G.; FERRARO, Christopher C.; DEFORD, Harvey D.; TOWNSEND, Timothy G. A review of waste products utilized as supplements to Portland cement in concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 121, p. 1–18, 10 maio 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.013>

PEREIRA, A. M.; MORAES, J. C.B; MORAES, M. J.B.; AKASAKI, J. L.; TASHIMA, M. M.; SORIANO, L.; MONZÓ, J.; PAYÁ, J. Valorisation of sugarcane bagasse ash (SCBA) with high quartz content as pozzolanic material in Portland cement mixtures. **Materiales de Construcción**, v. 68, n. 330, p. e153, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3989/mc.2018.00617>

PIRES, Paulo Roberto. Caracterização sócio-econômica e ambiental da atividade do tratamento de quartzito na região de Ouro Preto. Dissertation—Ouro Preto: **Federal University of Ouro preto**, 2007. Disponível em: <http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/3108>

RODRIGUES, Marques L. M.; LIMA, R. M. F. Cleaner production of soapstone in the Ouro Preto region of Brazil: A case study. **Journal of Cleaner Production**, v. 32, p. 149–156, set. 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.03.028>

SONAT, Cem; UNLUER, Cise. Development of magnesium-silicate-hydrate (M-S-H) cement with rice husk ash. **Journal of Cleaner Production**, v. 211, p. 787–803, 20 fev. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.246>

SOUSA, Leila Nóbrega; FIGUEIREDO, Pâmella Fernandes; FRANÇA, Sâmara; SILVA, Marcos Vinicio de Moura Solar; BORGES, Paulo Henrique Ribeiro; BEZERRA, Augusto Cesar da Silva. Effect of non-calcined sugarcane bagasse ash as an alternative precursor on the properties of alkali-activated pastes. **Molecules**, v. 27, n. 4, 1 fev. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/molecules27041185>

SOUZA, Giulia Simão de; SILVA, Geovane de Almeida Santos da; D'ALMEIDA, José Roberto Moraes. Influence of soapstone waste on the mechanical and rheological properties of high-density polyethylene. **Journal of Applied Polymer Science**, v. 138, n. 38, 10 out. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/app.50966>

TORRES, Harlley Sander Silva; VARAJÃO, Angélica Fortes Drummond Chicarino; SABIONI, Antônio Claret Soares. Technological properties of ceramic produced from steatite (soapstone) residues-kaolinite clay ceramic composites. **Applied Clay Science**, v. 112–113, p. 53–61, 1 ago. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.04.016>

TRAN, Hung.; DHAKAL, Rajesh; SCOTT, Allan. Mechanical and durability properties of magnesium silicate hydrate binder concrete. **Magazine of Concrete Research**, v. 72, n. 13, p. 693–702, 1 jul. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1680/jmacr.18.00217>

TRAN, Hung M.; SCOTT, Allan N. Strength and workability of magnesium silicate hydrate binder systems. **Construction and Building Materials**, v. 131, p. 526–535, 30 jan. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.109 >

ZHANG, Ping; LIAO, Wenyu; KUMAR, Aditya; ZHANG, Qian; MA, Hongyan. Characterization of sugarcane bagasse ash as a potential supplementary cementitious material: Comparison with coal combustion fly ash. **Journal of Cleaner Production**, v. 277, n. 123834, 20 dez. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123834>