ENTAC 2024
XX ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO
Maceió, Brasil, 9 a 11 de outubro de 2024

Avaliação da reatividade de resíduos de vidro em pó pela metodologia ASTM C1897-20

Evaluation of the reactivity of glass powder waste by the ASTM C1897-20 methodology

Alexandre Lopes Borges
Universidade Federal de Goiás | Goiânia | Brasil | alexandreborges@discente.ufg.br
Juan Pablo Gevaudan Burgos
Penn State University | State College | Estados Unidos | jp.gevaudan@psu.edu
Oswaldo Cascudo
Universidade Federal de Goiás | Goiânia | Brasil | ocascudo@ufg.br
Helena Carasek
Universidade Federal de Goiás| Goiânia | Brasil | hcarasek@ufg.br

Resumo

A utilização de materiais cimentícios suplementares (MCSs) apresenta importante potencial na indústria cimenteira, visto que existem benefícios ambientais com aproveitamento de resíduos de outras indústrias e redução da emissão de CO_2 pela produção do cimento. Assim, o objetivo deste estudo foi avaliar a reatividade de vidro finamente moído por meio de caracterização física e química, além de aplicar a metodologia apresentada pela norma ASTM C1897-20. Os resultados destacaram a alta superfície específica e finura do material, que contribuem para a atividade química, ratificados pela presença do halo amorfo na análise mineralógica, característico do estado vítreo. O ensaio de calorimetria isotérmica revelou uma liberação de calor de 185,49 J/g durante a hidratação da pasta com vidro, indicando atividade pozolânica comparável ao comportamento da cinza volante, com identificação do consumo de hidróxido de cálcio pela análise termogravimétrica.

Palavras-chave: Reatividade pozolânica. Resíduo de vidro. Calorimetria isotérmica. Termogravimetria.

Abstract

The use of supplementary cementitious materials (SCMs) presents significant potential in the cement industry, as there are environmental benefits from utilizing waste from other industries and reducing CO_2 emissions from cement production. Thus, the objective of this study was to evaluate the reactivity of finely ground glass through physical and chemical characterization, as well as to apply the methodology presented by the ASTM C1897-20 standard. The results highlighted the high specific surface area and fineness of the material, which contribute to its chemical activity, confirmed by the presence of the amorphous halo in the mineralogical analysis, characteristic of the vitreous state. The isothermal calorimetry test revealed a heat

Como citar:
BORGES, A.L; BURGOS, J.P.G; CASCUDO, O; CARASEK, H. Avaliação da reatividade de resíduos de vidro em pó pela metodologia ASTM C1897-20. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 20., 2024, Maceió. **Anais**... Maceió: ANTAC, 2024.

release of 185.49 J/g during the hydration of the paste with glass, indicating pozzolanic activity comparable to the behavior of fly ash, with the consumption of calcium hydroxide identified by thermogravimetric analysis.

Keywords: Pozzolanic Reactivity. Glass Waste. Isothermal Calorimetry. Thermogravimetry.

INTRODUÇÃO E FUNDAMENTAÇÃO

A ação humana é a principal causa do aquecimento global, especialmente devida às altas emissões de dióxido de carbono das indústrias, destacando-se a produção de cimento, responsável por cerca de 7% das emissões globais de CO_2 [1]. Estratégias como a incorporação de materiais cimentícios suplementares (MCS) são difundidas para reduzir as emissões.

Esses materiais, usados com a finalidade de substituir frações de cimento, podem ser classificados pela sua reatividade, formando, assim, três grupos: materiais pozolânicos, cimentantes e fíler. O primeiro grupo se difere do segundo uma vez que não apresentam hidraulicidade (como os cimentantes), mas sim pozolanicidade. Dessa forma, as pozolanas, finamente moídas, reagem quimicamente com o hidróxido de cálcio na presença de umidade e à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades cimentantes [2]. O fíler, por sua vez, apresenta baixa atividade química e age fisicamente no concreto por meio do empacotamento granulométrico e refinamento dos poros [3-5].

Os materiais pozolânicos possuem uma ampla variação de características físico-químicas, de forma que vários fatores interferem na interação com a cal para a formação de constituintes cimentícios. Tais fatores moldam a complexidade de quantificação da atividade pozolânica de um material, dificultando a padronização de uma metodologia normativa para caracterização e hierarquização destes materiais. A compatibilização entre a aplicação e o desenvolvimento do potencial reativo das adições minerais demanda rigor científico para designar à matriz cimentícia apropriadas características físicas e mecânicas. Assim, diferentes metodologias avaliativas devem ser empregadas para investigar a atividade pozolânica de um material [6].

Nesse sentido, a norma ASTM C1897-20 [7], intitulada Standard Test Methods for Measuring the Reactivity of Supplementary Cementitious Materials by Isothermal Calorimetry and Bound Water Measurements, estabelece os procedimentos básicos para se medir a reatividade de MCSs utilizando calorimetria isotérmica e medições de água combinada.

O vidro finamente moído pode ser utilizado como material cimentício suplementar, pois apresenta um potencial pozolânico, uma vez que seu conteúdo amorfo e com alto teor de sílica confere tal característica [8-12]. Zanotto e Mauro [13] propuseram uma definição para o material, a saber: “o vidro é um estado de matéria condensada não cristalina, sem equilíbrio, que exibe uma transição vítrea. A estrutura dos vidros é semelhante à de seus líquidos super-resfriados (LSR), e eles relaxam espontaneamente em direção ao estado do LSR. Seu destino, no limite do tempo infinito, é cristalizar”.

Em sua forma química mais simples, o vidro pode consistir em sílica pura, caso em que é denominado “vidro de quartzo”. No entanto, a produção de vidro de sílica amorfa pura exige muita energia, com temperaturas em torno de 1900°C. Assim, o vidro de

quartzo é produzido apenas para aplicações que requerem alta resistência química, portanto pertencendo aos tipos de vidro especiais. Posto isto, os vidros sodocálcicos possuem o carbonato de sódio ou soda (Na_2CO_3), que é adicionado para diminuir o ponto de fusão da sílica para cerca de 1500°C [14].

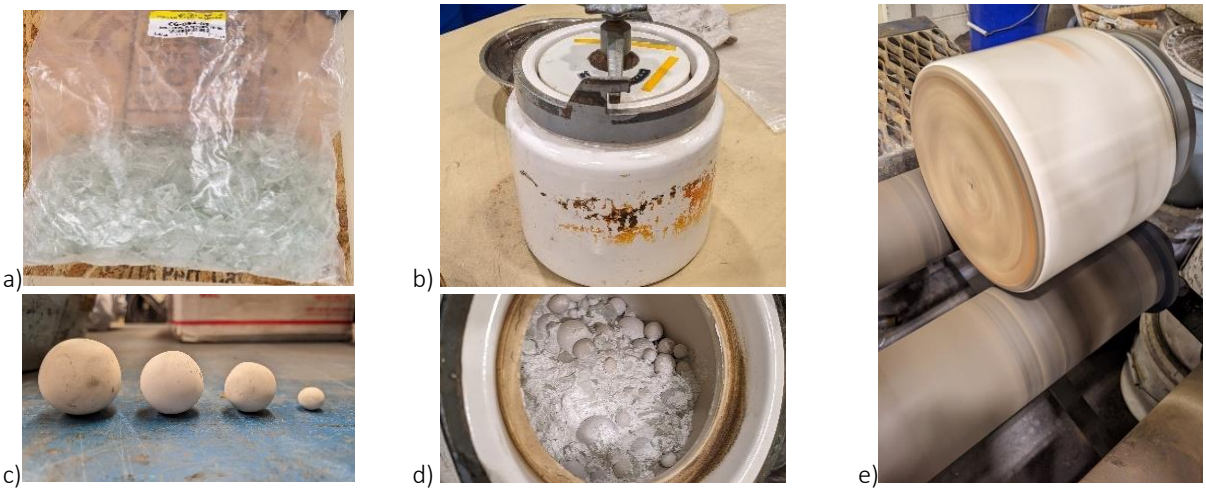
Por sua vez, a adição de soda leva à corrosão do vidro. Para proporcionar uma melhor durabilidade química do vidro, são adicionados óxido de cálcio ou cal virgem (CaO), óxido de magnésio (MgO) e óxido de alumínio (Al_2O_3). Assim, a soda serve como uma substância para baixar a temperatura na qual a sílica derrete, e a cal atua como um estabilizador da sílica. O vidro sodocálcico é economicamente acessível, possui estabilidade química e é altamente prático, já que pode ser reprocessado várias vezes conforme necessário. No entanto, é através da sílica amorfa, o principal componente dos vidros, que ocorre a reação pozolânica [15].

Dentro deste contexto do desenvolvimento sustentável pelo uso dos MCSs, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a reatividade de vidro finamente moído, proveniente de resíduos, por meio de caracterização física e química. Como contribuição adicional à análise, a reatividade do vidro é avaliada, também, pela aplicação da metodologia constante na norma ASTM C1897-20, que emprega princípios de calorimetria isotérmica e de medições de água combinada.

MATERIAIS E MÉTODOS

Como material principal da análise, foi empregado um pó de vidro (PV) proveniente de resíduos de garrafas incolores, que foram lavadas e tiveram rótulos e cola removidos, sendo, em seguida, quebradas em cacos. Logo após a quebra, o material foi processado em moinho de bolas. Para esta moagem foi utilizado um jarro cerâmico com corpos moedores de mesmo material, com 4 diâmetros diferentes. A velocidade do motor foi definida em 70 rpm, e o tempo de moagem em 20 horas. A proporção de vidro moído em relação aos corpos moedores foi de 1:1, em massa, sendo utilizado em cada moagem 500 g de cada componente. Na Figura 1 é possível observar as etapas.

Figura 1: Etapas no processamento do vidro: a) Cacos de vidro obtidos da quebra; b) Jarro de moagem; c) Corpos moedores; d) Abertura do jarro; e) Captura durante o processo de moagem.



Fonte: o autor.

O produto obtido foi um pó de vidro que foi passado pela peneira com abertura na malha de 45 µm (peneira Mesh 325). Para caracterização do pó de vidro foram realizadas determinações físicas e químicas. A análise granulométrica foi realizada por meio do granulômetro a laser, em instrumento Mastersizer 3000 produzido pela Malvern Panalytical. A determinação da superfície específica foi realizada pelo método BET com o equipamento ASAP-2420 produzido pela Micromeritics.

A caracterização mineralógica foi determinada pelo método de difração de raios X (DRX). Este método foi realizado em unidade Malvern Panalytical, modelo Empyrean, com parâmetros de 2θ/θ de varredura nominal entre 5º a 70º, operado em tensão de 45kV e 40 mA, ânodo de cobre. Também foi realizada a determinação da composição química por fluorescência de raios X (FRX). A unidade utilizada foi o espectômetro Rigaku NEX CG II.

Para a avaliação da reatividade do vidro finamente moído, foi utilizado como parâmetro o Método A apresentado pela norma americana ASTM C1897-20 [7]. Neste método, a calorimetria isotérmica é utilizada para determinar o calor de hidratação de pastas hidratadas. Estas pastas são compostas pela mistura do MCS que está sendo avaliado (no caso, o pó de vidro), hidróxido de cálcio, carbonato de cálcio, sulfato de potássio e hidróxido de potássio. O valor do calor de hidratação é usado para determinar a reatividade química do MCS.

Assim, em um primeiro momento para moldagens das pastas, foi realizada a mistura dos componentes para o preparo da solução de potássio (SP). A mistura do reagente com os solutos foi realizada na temperatura de (23 ± 3)°C. Na Tabela 1 é possível observar as quantidades de materiais necessárias (preconizadas pela norma) e que foram medidas para o preparo de 250 g da solução.

Tabela 1: Proporção de materiais para preparo da solução de potássio (SP).

Água necessária (g)	Água medida (g)	K(OH) necessário (g)	K(OH) medido (g)	$K_2(SO)_4$ necessário (g)	$K_2(SO)_4$ medido (g)
250,00	250,05	1,00	0,9980	5,00	5,0093

Nota: Para o preparo desta solução, foi utilizada água deionizada.
Fonte: o autor.

Para a mistura, a proporção de MCS para hidróxido de cálcio é de 1:3 em massa, e a de MCS para carbonato de cálcio é de 2:1 em massa. A relação entre solução de potássio e sólidos (soma de SCM, hidróxido de cálcio e carbonato de cálcio) é 1:1,2 em massa. Na Tabela 2 é possível observar as quantidades de materiais necessários e medidos para a mistura da pasta.

Tabela 2: Proporção de materiais para mistura das pastas.

SP necessário (g)	SP medido (g)	PV necessário (g)	PV medido (g)	Ca(OH) necessário (g)	Ca(OH) medido (g)	$CaCO_3$ necessário (g)	$CaCO_3$ medido (g)
54,00	54,0072	10,00	10,0056	30,00	30,0049	5,00	5,0066

Fonte: o autor.

Seguindo os requisitos estabelecidos pela ASTM C1897-20 [7], os compostos secos e a solução de potássio foram misturados durante 2 minutos a (1600 ± 50) rpm, utilizando o misturador de alto cisalhamento OS20-S, fabricado pela ONiLAB. A partir desta

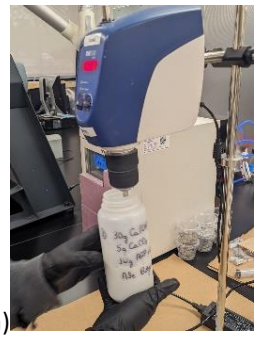
mistura, foi possível preparar duas pastas de 15 g (massa da mistura no estado fresco), que foram acondicionadas em ampolas de vidro com capacidade de 20 mL.

A partir deste preparo, prosseguiu-se para a etapa seguinte, que consistiu na realização do experimento de calorimetria isotérmica. Para isto foi utilizado o calorímetro TAM Air, produzido pela TA Instruments. Este equipamento possui oito canais de entrada, dos quais foram utilizados dois, um para cada mistura preparada. Cada canal apresenta duas portas. Na primeira foi colocada a ampola com a amostra de pasta, e na segunda foi colocada a ampola de referência. A referência consistiu na mesma ampola selada e hermética, preenchida com (9,40 ± 0,05) g de água deionizada [7].

Para execução da calorimetria, o calorímetro foi previamente preparado. Os procedimentos de preparo do equipamento consistiram em: alocação de um novo filtro, ajuste da temperatura em 40°C, realização da calibração em todos os oito canais de entrada e espera visando à estabilização de sinal nos dois canais que foram utilizados. Esta última etapa foi realizada já com as ampolas de referência alocadas no equipamento.

Desse modo, as duas ampolas com as pastas foram colocadas nas câmaras do calorímetro, no intervalo de 10 minutos após o início da mistura (a primeira após 4 min e 30 s, e a segunda após 5 min e 47 s), sendo, então, dado início à coleta de dados de liberação de calor pelo equipamento na temperatura de (40 ± 0,5)°C por 168 horas (7 dias). Na Figura 2 é possível observar as etapas e os equipamentos envolvidos na mistura da pasta, bem como na realização dos procedimentos para calorimetria.

Figura 1: a) Operador realizando o processo de mistura; b) Modelo de ampola utilizada; c) Aparato para funcionamento do calorímetro; d) Pasta após 7 dias de ensaio.

a)  b)  c)  d) 

Fonte: o autor.

Após os sete dias de coleta de dados, o equipamento retorna os valores de liberação de calor a cada 5 min (H) em Joule (J). Com este dado é possível calcular o calor liberado por grama de MCS (H_{MCS}), por meio da Equação 1.

$$H_{MCS} = \frac{H}{(m_p.0{,}101)} \qquad \text{(Eq. 1)}$$

Em que:

H = liberação de calor entre 75 min* e 7 dias (168 h ± 10) min após o início da mistura (J);

m_p = massa da pasta (g);

$0{,}101$ = fração da massa do MCS na amostra de pasta.

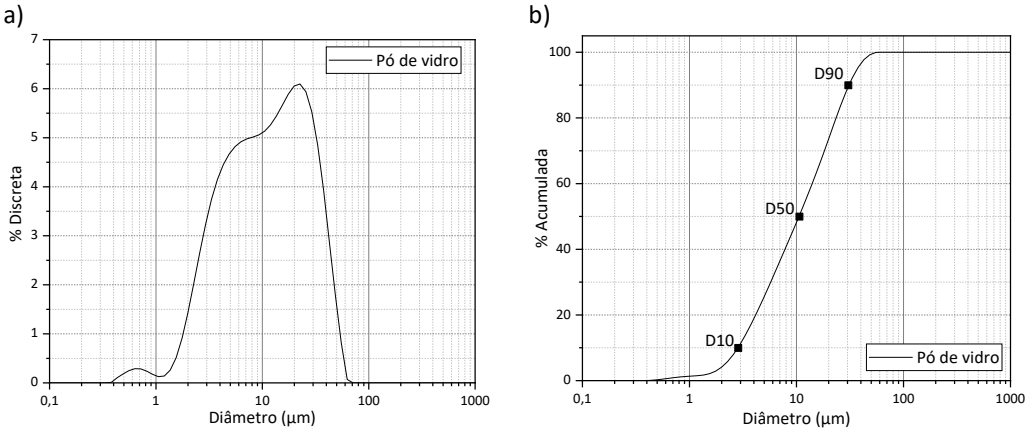
*Nota: a coleta de valores da liberação de calor pelo equipamento é iniciado 75 minutos após a mistura, de modo a permitir tempo suficiente para que a pasta e o recipiente se equilibrem a (40 ± 0,5)°C dentro do calorímetro.

Após a retirada das ampolas do calorímetro, as pastas foram levadas para realização de análise termogravimétrica (TGA) com vistas à obtenção dos dados acerca da perda de massa do material com o avanço da temperatura. Para isto foi utilizada a unidade Discovery TGA 5500, acoplada ao software Discovery MS (TA Instruments). Para este ensaio, variou-se a temperatura até 600°C a um passo de 10°C/min em atmosfera de nitrogênio.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após todas as etapas de processamento, o vidro moído apresentou pelo método BET uma superfície específica de 1 402 m²/kg. Na Figura 3 é possível observar as distribuições granulométricas discreta e acumulada do vidro finamente moído.

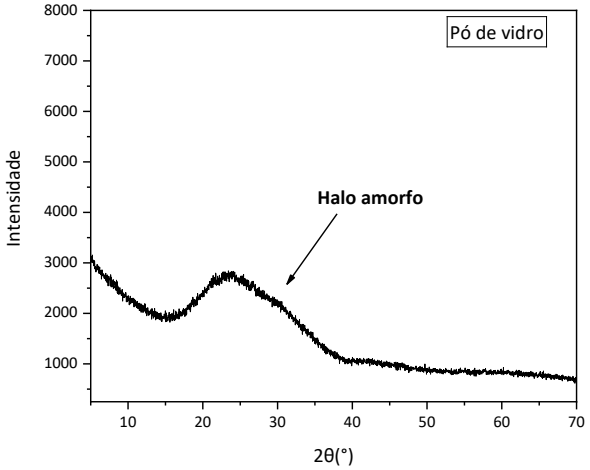
Figura 2: Distribuições granulométricas do pó de vidro: a) Discreta; b) Acumulada.



Fonte: o autor.

Pela análise da Figura 3, é possível observar que o pó de vidro apresentou os diâmetros D10, D50 e D90 respectivamente de 3,02, 11,24 e 32,96 µm. De acordo com Nwaubani e Poutos [10], para que a atividade pozolânica em vidros finamente moídos se torne evidente num curto período de tempo, a finura das partículas de vidro utilizadas deve ser pelo menos tão fina quanto a do pó de cimento: resíduo retido na peneira 75 µm ≤ 12,00% [16]. No caso em questão, pelos dados de D90 e pela superfície específica determinada por BET, percebe-se uma finura muito maior que a do cimento Portland, o que é muito favorável em termos da reatividade do material. Na Figura 4 é possível observar o difratograma resultante do ensaio de DRX realizado.

Figura 3: Difratograma de raio X do pó de vidro.



Fonte: o autor.

Pela análise mineralógica na Figura 4, é possível observar o alto grau de amorfismo do material, representado pelo halo amorfo em todo difratograma. Tal comportamento traduz a essência do estado vítreo, já que esses materiais solidificam sem se cristalizar [14].

Na Tabela 3 é possível observar a composição química do vidro utilizado neste estudo, como também a composição química apresentada por Varshneya e Mauro [14] como referência.

Tabela 3: Composição química do pó de vidro do presente estudo, tendo como referência a composição de uma amostra da literatura [14].

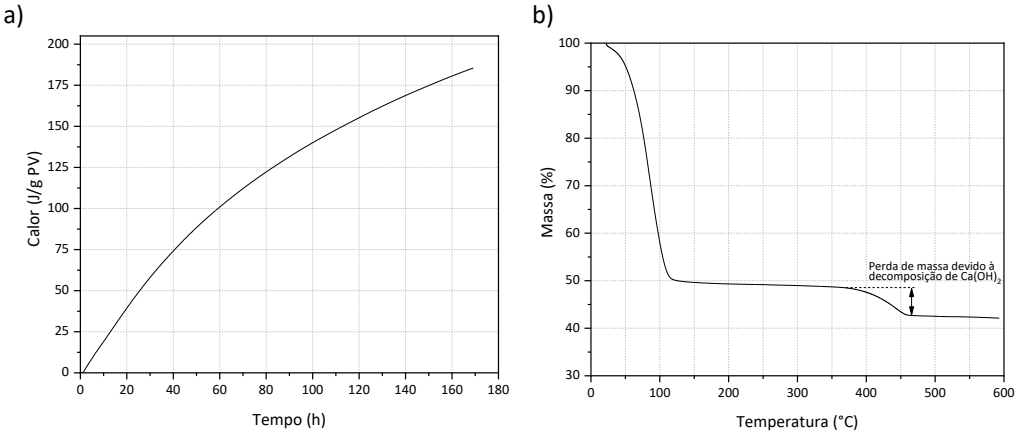
Componentes	% em massa	
	PV	Vidro sodocálcico (garrafas e recipientes) [14]
SiO_2	79,60	74,00
Na_2O	8,86	14,30
CaO	9,42	5,40
Al_2O_3	1,29	2,00
MgO	0,20	3,70
K_2O	0,18	0,60
SO_3	0,19	-

Fonte: o autor.

Observando a Tabela 3, é possível identificar uma grande quantidade (79,60%) de anidro silícico (SiO_2), como também a presença de óxido de cálcio, CaO (9,42%) e óxido de alumínio Al_2O_3 (1,29%). Diante da composição química do material, as recomendações da ABNT NBR 12653: 2014 [2] para materiais pozolânicos são válidas, já que a norma determina que a soma destes óxidos deve ser maior que 70% para pozolanas classes N e C: materiais vulcânicos, argilas calcinadas e cinzas volantes. Em comparação com os dados de referência [14], percebe-se que o vidro sodocálcico possui mais Na_2O e menos CaO do que o PV do estudo, além de um maior teor de MgO, com teor de sílica levemente mais baixo. Estes dados da literatura propiciam observar uma composição típica presente no modelo de produção de vidro comercial mais amplamente utilizado.

Na Figura 5 é apresentada a curva de calor liberado por grama de pó de vidro, obtido pelo ensaio de calorimetria isotérmica, como também a curva obtida com a análise da termogravimetria da amostra.

Figura 4: Resultados das análises de calorimetria (a) e termogravimetria (b) do pó de vidro estudado.



Fonte: o autor.

O gráfico da Figura 5 (a) mostra a liberação cumulativa de calor (J/g) para cada g de pó de vidro estudado. Os resultados são mostrados até 170 h, sendo que ao final do ensaio foi possível observar que, pela hidratação da pasta, houve liberação de 185,49 J de calor por grama de pó de vidro adicionado. Com a aplicação da mesma metodologia para calorimetria isotérmica, Suraneni e Weiss [17] apresentaram a liberação de calor para cinco diferentes materiais em estudo: sílica ativa, escória de alto forno, cinza volante, quartzo e calcário. O resultado do PV se aproxima ao da pasta com cinza volante do referido estudo, que apresentou após os sete dias uma liberação de calor da ordem de 200 J/g. A sílica ativa se destaca ao ter apresentado valores que tangem 550 J/g [17]. Porém, o comportamento do PV se distancia de materiais quimicamente inertes, como o calcário e o quatzo, que apresentaram ao final dos 7 dias valores que não ultrapassaram 50 J/g [17].

Ainda na Figura 5 (b), observa-se o gráfico obtido pelo ensaio termogravimétrico. De acordo com Kim e Olek [18], a decomposição do hidróxido de cálcio ocorre entre 350°C e 550°C, o que equivale a segunda queda expressiva na curva da perda de massa. No entanto, segundo os autores, não há um método universalmente aceito para interpretar a curva TGA com o objetivo de determinar o teor de $Ca(OH)_2$. A seleção das temperaturas de início e fim da decomposição do $Ca(OH)_2$ é crucial. Todavia, a abordagem que mede mudanças de massa a uma temperatura fixa pode ser imprecisa, pois a faixa de decomposição do $Ca(OH)_2$ depende de outros fatores, como a finura e a quantidade da amostra, a cristalinidade do material e a pressão no instrumento [18].

CONCLUSÃO

Neste trabalho foi analisada a reatividade de vidro finamente moído para aplicação do material como MCS por meio de caracterização física e química, assim como pela aplicação da metodologia da norma americana ASTM C1897-20 [7].

Conclui-se que a elevada superfície específica e finura do material concorrem para a sua atividade química, já que maiores superfícies de contato garantem melhores taxas de reação. Em mecanismos clássicos de dissolução-precipitação, as reações e interações de superfície são preponderantes, o que torna a finura do material um fator determinante para a sua reatividade. A presença do halo amorfo no difratograma de raio X e a ausência de picos cristalinos confirmam o alto grau de amorfismo, característico do estado vítreo do material. Em relação à composição química, os dados se alinham com as recomendações da norma brasileira, sugerindo que o pó de vidro pode ser considerado um material pozolânico viável.

O ensaio de calorimetria isotérmica revelou uma liberação de calor de 185,49 J/g durante a hidratação da pasta com vidro, indicando sua atividade pozolânica. Embora esse valor seja menor do que o observado para materiais altamente reativos (como a sílica ativa, por exemplo), o pó de vidro demonstrou comportamento semelhante ao de cinza volante, uma pozolana comumente utilizada.

Por fim, a análise termogravimétrica revelou a decomposição do hidróxido de cálcio em temperaturas entre 350°C e 550°C, com implicações importantes para a determinação do teor de $Ca(OH)_2$ das amostras.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES); ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelas bolsas PQ e à Eletrobras – Furnas pelo fomento da pesquisa.

REFERÊNCIAS

[1] SNIC, **Relatório Anual - Sindicato Nacional da Indústria do Cimento**. Brasil, 2019.

[2] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro. 2014

[3] SILVA, M. G. Cimento Portland com adições minerais. In: **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais.** 2a ed. São Paulo: IBRACON, 2010. p. 791–823.

[4] MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

[5] DAL MOLIN, D. C. C. Adições Minerais para Concreto Estrutural. In: **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações.** 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2005. p. 345–379.

[6] HOPPE FILHO, J. *et al*. Atividade pozolânica de adições minerais para cimento Portland (Parte I): Índice de atividade pozolânica (IAP) com cal, difração de raios-x (DRX), termogravimetria (TG/DTG) e Chapelle modificado. **Revista Matéria**, v. 22, n. 3, 2017.

[7] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1897-20:** Standard Test Methods for Measuring the Reactivity of Supplementary Cementitious Materials by Isothermal Calorimetry and Bound Water Measurements Philadelphia, 2020.

[8] MATOS, A. M.; SOUSA-COUTINHO, J. Durability of mortar using waste glass powder as cement replacement. **Construction and Building Materials**, v. 36, p. 205–215, 2012.

[9] DU, H.; TAN, K. H. Properties of high volume glass powder concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 75, p. 22–29, 2017.

[10] NWAUBANI, S. O.; POUTOS, IK. I. The Influence of Waste Glass Powder Fineness on the Properties of Cement Mortars. **International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management (IJAIEM)**, v. 2, n. 2, p. 110–116, 2013.

[11] KHMIRI, A.; CHAABOUNI, M.; SAMET, B. Chemical behaviour of ground waste glass when used as partial cement replacement in mortars. **Construction and Building Materials**, v. 44, p. 74–80, 2013.

[12] SIAD, H. *et al*. Mechanical, Physical, and Self-Healing Behaviors of Engineered Cementitious Composites with Glass Powder. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 29, n. 6, p. 04017016, 2017.

[13] ZANOTTO, E. D.; MAURO, J. C. The glassy state of matter: Its definition and ultimate fate. **Journal of Non-Crystalline Solids**, v. 471, n. May, p. 490–495, 2017.

[14] VARSHNEYA, A. K.; MAURO, J. C. **Fundamentals of Inorganic Glasses**. 3. ed. Elsevier, 2019.

[15] VIEITEZ, E. R. et al. End-of-Waste Criteria for Glass Cullet: Technical Proposals. Sevilla: The European Commission's science and knowledge service. **EUR - Scientific and Technical Research Reports**; Dez. 2011. No.: JRC68281. ISSN 1831-9424.

[16] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697**: Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro. 2018

[17] SURANENI, P.; WEISS, J. Examining the pozzolanicity of supplementary cementitious materials using isothermal calorimetry and thermogravimetric analysis. **Cement and Concrete Composites**, v. 83, p. 273–278, 2017.

[18] KIM, T.; OLEK, J. Effects of sample preparation and interpretation of thermogravimetric curves on calcium hydroxide in hydrated pastes and mortars. **Transportation Research Record**, n. 2290, p. 10–18, 2012.