Revista ALCONPAT
www.revistaalconpat.org
eISSN 2007-6835
Revista de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción

Aumentando a sustentabilidade do concreto: uso de pozolanas de vidro moído como material cimentício suplementar em concretos de baixo carbono.

P. Rangaraju[1]*
* Autor de Contato: prangar@clemson.edu
DOI: https://doi.org/10.21041/ra.v15i2.813

Recebido: 04/11/2024 | Correções recebidas: 18/03/2025 | Aceito: 25/04/2025 | Publicado: 01/05/2025

RESUMO

Esta revisão resume a disponibilidade e o processamento de resíduos de vidro e destaca seu impacto nas propriedades do concreto no estado fresco e endurecido. A indústria do concreto está buscando cada vez mais materiais cimentícios suplementares (SCMs) sustentáveis para substituir parcialmente o cimento Portland, já que SCMs tradicionais como cinza volante e escória de alto forno apresentam disponibilidade decrescente. Os SCMs melhoram as propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto, ao mesmo tempo que reduzem sua pegada de carbono. Resíduos de vidro processado surgiram como uma pozolana alternativa promissora, apoiada por extensas pesquisas e aplicações em campo. Em resposta, a ASTM desenvolveu a norma C1866/C1866M-20, uma especificação padrão para o uso de pozolana de vidro moído em concreto. Também é discutido o potencial das pozolanas de vidro moído como SCMs viáveis para a produção de concreto de baixo carbono.

Palavras-chave: pozolanas de vidro moído, materiais cimentícios suplementares, materiais de baixo carbono.

Citar como: Rangaraju, P. (2025), "*Aumentando a sustentabilidade do concreto: uso de pozolanas de vidro moído como material cimentício suplementar em concretos de baixo carbono*", Revista ALCONPAT, 15 (2), pp. 92 – 107, DOI: https://doi.org/10.21041/ra.v15i2.813.

[1] Professor and Director of SMaRT Lab Glenn Department of Civil Engineering School of Civil Engineering and Environmental Engineering and Earth Sciences Clemson University Clemson, South Carolina, USA.

Contribuição de cada autor
Neste trabalho, o autor Prasad Rangaraju contribuiu com todas as atividades.

Licença Creative Commons
Copyright (2025) é propriedade dos autores. Este trabalho é um artigo de acesso aberto publicado sob os termos e condições de uma Licença Internacional Creative Commons Atribuição 4.0 (CC BY 4.0).

Discussões e correções pós-publicação
Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no primeiro número do ano 2026, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do terceiro número do ano de 2025.

© 2025 ALCONPAT Internacional

Enhancing concrete sustainability: use of ground glass pozzolans as a supplementary cementitious material in low carbon concrete.

ABSTRACT

This review summarizes the availability and processing of glass waste and highlights its impact on the fresh and hardened properties of concrete. Concrete industry is increasingly seeking sustainable supplementary cementitious materials (SCMs) to partially replace Portland cement, as traditional SCMs like fly ash and slag face declining availability. SCMs enhance concrete's mechanical and durability properties while reducing its carbon footprint. Processed glass waste has emerged as a promising alternative pozzolan, supported by extensive research and field applications. In response, ASTM developed C1866/C1866M-20, a standard specification for ground glass pozzolan in concrete. The potential of ground-glass pozzolans as viable supplementary cementitious materials (SCMs) for producing low-carbon concrete is also discussed.

Keywords: ground glass pozzolans, supplementary cementitious materials, low-carbon materials.

Mejorando la sostenibilidad del concreto: uso de puzolanas de vidrio molido como material cementante suplementario en concreto de bajo carbono.

RESUMEN

Esta revisión resume la disponibilidad y el procesamiento de residuos de vidrio y destaca su impacto en las propiedades del concreto en estado fresco y endurecido. La industria del concreto busca cada vez más materiales cementantes suplementarios (SCMs) sostenibles para reemplazar parcialmente el cemento Portland, ya que los SCMs tradicionales como la ceniza volante y la escoria presentan una disponibilidad decreciente. Los SCMs mejoran las propiedades mecánicas y de durabilidad del concreto, al tiempo que reducen su huella de carbono. Los residuos de vidrio procesado han surgido como una puzolana alternativa prometedora, respaldada por investigaciones extensas y aplicaciones en campo. En respuesta, ASTM desarrolló la norma C1866/C1866M-20, una especificación estándar para el uso de puzolana de vidrio molido en concreto. También se discute el potencial de las puzolanas de vidrio molido como SCMs viables para la producción de concreto de bajo carbono.

Palabras clave: puzolanas de vidrio molido, materiales cementantes suplementarios, materiales de bajo carbono.

Informações legais

Revista ALCONPAT é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progreso, Merida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Website: www.alconpat.org

Reserva de direitos de uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

A reprodução total ou parcial do conteúdo e das imagens da publicação é realizada de acordo com o código COPE e a licença CC BY 4.0 da Revista ALCONPAT.

1. INTRODUÇÃO

A ampla disponibilidade do concreto de cimento Portland, juntamente com suas propriedades mecânicas e de durabilidade ajustáveis para atender a uma variedade de requisitos de carga física e ambiental, e sua versatilidade de aplicação, o tornam a principal escolha de materiais para a construção de infraestrutura na civilização moderna. No entanto, o cimento Portland, o principal agente ligante do concreto, também é conhecido por contribuir com aproximadamente 8% das emissões globais, com 2,8 G toneladas/ano de gases de efeito estufa (Ellis et al., 2019).

Entre as estratégias que têm sido exploradas para reduzir o impacto ambiental da construção em concreto estão o desenvolvimento de ligantes alternativos de baixo carbono para substituir completamente o cimento Portland e o uso de materiais cimentícios suplementares (SCMs) para substituição parcial do cimento Portland. Essas estratégias têm sido extensivamente estudadas e amplamente experimentadas na indústria. Embora ligantes de baixo carbono, como ligantes ativados por álcalis, tenham sido desenvolvidos, seu uso na indústria da construção é limitado a projetos específicos, devido a limitações impostas por suas características inerentes, como a necessidade de ativadores alcalinos agressivos, a necessidade de etapas adicionais de processamento além dos limites das operações de construção convencionais e a falta de especificações adequadas no momento, entre outras.

A substituição parcial do cimento Portland por SCMs para reduzir o impacto ambiental é uma estratégia mais amplamente praticada e bem-sucedida. A eficácia dessa abordagem também decorre do fato de que a maioria dos SCMs, como cinzas volantes e escórias, são subprodutos industriais com pouca utilidade para outros fins e, se não forem utilizados como SCMs em concreto, necessitam de estratégias de descarte dispendiosas. Além disso, concretos contendo SCMs são frequentemente considerados superiores em suas propriedades mecânicas e de durabilidade em comparação com misturas de concreto sem SCMs. Considerando que a maioria dos SCMs são subprodutos industriais, seu uso em concreto reduz inerentemente a pegada de carbono do concreto e fornece um caminho para sua ampliação em vez de descartá-los em aterros sanitários ou lagoas.

Nos últimos anos, a disponibilidade de SCMs tradicionais, como cinzas volantes e escórias, tem se tornado cada vez mais limitada nos Estados Unidos, à medida que as indústrias que produzem esses materiais passam por mudanças significativas em seus processos. A produção de cinzas volantes a partir de usinas termelétricas a carvão está diminuindo, à medida que fontes de energia renováveis e usinas a gás natural estão substituindo as tradicionais usinas termelétricas a carvão. Da mesma forma, a produção de ferro e aço é cada vez mais dominada por esforços de reciclagem e, como resultado, a produção de escória de alto-forno é significativamente reduzida. Consequentemente, há uma necessidade emergente de encontrar alternativas adequadas aos SCMs tradicionais para uso na indústria de concreto. Portanto, o objetivo desta breve revisão é avaliar a viabilidade de pozolanas de vidro moído (GGPs) como materiais cimentícios suplementares sustentáveis em concreto. O artigo fornece uma visão geral abrangente do processamento, classificação e desempenho de GGPs, incluindo suas propriedades mecânicas, características de durabilidade e benefícios ambientais, com o objetivo de promover sua adoção mais ampla no desenvolvimento de concreto de baixo carbono.

2. VIDRO MOÍDO COMO MATERIAL CIMENTÍCIO SUPLEMENTAR

O vidro é um material amplamente produzido para aplicação em uma variedade de indústrias. O tipo mais comum de vidro é o vidro de soda-cal, que é tipicamente usado na produção de recipientes e vidro plano. A fabricação de vidro de soda-cal consiste em combinar matérias-primas comumente disponíveis - areia de sílica (SiO_2), carbonato de sódio (Na_2CO_3) e calcário ($CaCO_3$) em uma mistura íntima seguida pelo aquecimento da mistura a cerca de 1500 °C para derreter as matérias-

primas e produzir vidro. O vidro fundido é então transformado tipicamente em vidro de recipiente ou vidro plano. De composição química ligeiramente diferente (teor de álcali muito menor e teor de cal e alumina mais alto) é o vidro E. O vidro E é tipicamente trefilado em filamentos finos e tecido em fios de fibra para uso na fabricação de compósitos à base de vidro-resina. A estimativa da indústria do Potencial de Aquecimento Global (PAG) do vidro é relatada em 0,66 toneladas de CO_{2eq} por tonelada de vidro produzido (CarbonCloud, 2024).

A grande maioria dos resíduos de vidro produzidos nos Estados Unidos é vidro sodo-cálcico. Dos 12,25 milhões de toneladas de vidro fabricados nos Estados Unidos em 2018, apenas 3,06 milhões de toneladas foram recicladas, e 7,55 milhões de toneladas de vidro para recipientes foram diretamente enterradas, com o restante de 1,64 milhão de toneladas enterradas após combustão com recuperação de energia (Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos, 2024). A Figura 1 mostra a tendência histórica da produção e do descarte de vidro nos Estados Unidos de 1960 a 2018 (Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos, 2024).

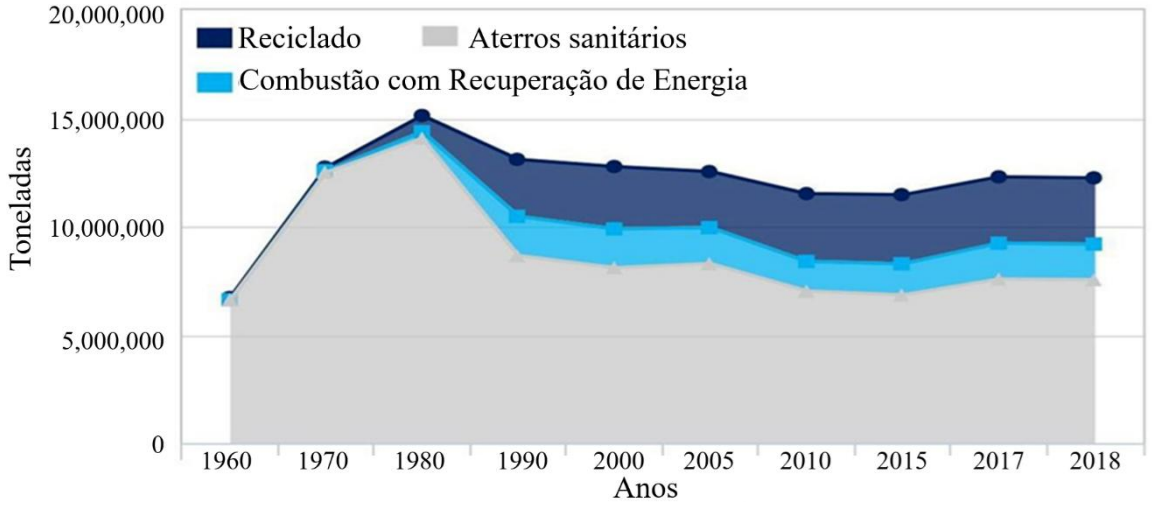


Figura 1. Tendência histórica na gestão de resíduos de vidro: 1960 – 2018.
(Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos, 2024)

A reciclagem de vidro pode conservar uma grande quantidade de matérias-primas necessárias para a produção de novo vidro; para cada tonelada de vidro reciclado, são conservados 590 quilos de areia (SiO_2), 186 kg de carbonato de sódio (Na_2CO_3), 172 kg de calcário ($CaCO_3$) e 72 kg de feldspato ($NaAlSi_3O_8$) (Glass Recycling, 2024). Embora a quantidade de resíduos de vidro reciclados anualmente tenha aumentado de forma constante de 750 mil toneladas em 1980 para mais de 3 milhões de toneladas em 2018, a taxa de reciclagem de vidro permanece muito abaixo da taxa de produção de vidro (United States Environmental Protection Agency, 2024), em grande parte devido a obstáculos encontrados nos fluxos de coleta, como vidro misturado de cores diferentes e presença de contaminantes como metal, solo, papel, orgânicos e outros contaminantes químicos. Muitas empresas de reciclagem tentam remediar esses problemas separando garrafas de vidro usadas em cores específicas ou aceitando apenas vidro não contaminado. A Figura 2 mostra uma instalação de reciclagem de vidro onde o caco de vidro classificado por cor é armazenado no local de trabalho em grandes pilhas. Devido a obstáculos consideráveis aos processos de coleta e reciclagem de vidro, a taxa de reciclagem de resíduos de vidro tem sido inaceitavelmente baixa até agora nos EUA (31%), embora a reciclagem em outros países, particularmente na Europa, seja maior, 52% atualmente, e a projeção é de que atinja 90% até 2030 (Nature Editorial, 2021). Métodos alternativos devem ser considerados para reduzir o alto volume de resíduos de vidro descartados em aterros sanitários.

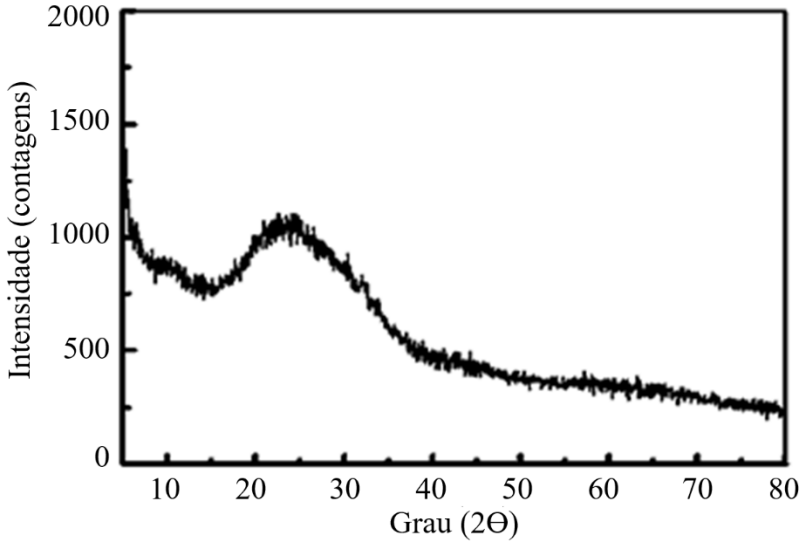


Figura 2. Instalação de coleta de resíduos de vidro e gerenciamento de cacos em uma instalação de reciclagem de vidro (Glass Recycling, 2024; Nassar e Soroushian , 2011)

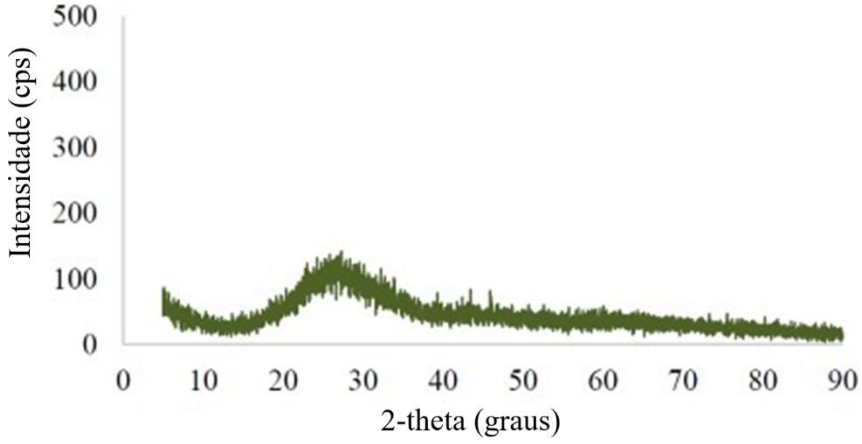
O uso de resíduos de vidro como um SCM em concreto não apenas evita seu descarte em aterros sanitários, mas também reduz o teor de clínquer do concreto e, portanto, melhora a sustentabilidade do concreto. Além disso, SCMs à base de vidro têm o potencial de melhorar não apenas a mecânica e a durabilidade do concreto, mas também sua sustentabilidade. Com base em uma estimativa preliminar do potencial de aquecimento global (PAG) da pozolana de vidro moído (GGP), descobriu-se que uma tonelada de pozolana de vidro moído processada (GGP) tinha um PAG de 56 kg CO_{2eq} em comparação com 922 kg CO_{2eq} de cimento Portland puro (Kaminsky et al., 2020). Consequentemente, uma redução significativa no PAG de misturas de concreto pode ser alcançada em misturas de concreto onde o cimento Portland é parcialmente substituído por GGP.

3. QUÍMICA E PROCESSAMENTO DE POZOLANAS DE VIDRO MOÍDO

Considerando que o vidro residual é um recurso amplamente disponível, de natureza amorfa e com composição química consistente, este material pode servir como um valioso SCM para uso em concreto. Vidros planos e de recipientes, tipicamente derivados de vidros sodo-cálcicos, contêm teores de SiO_2 e CaO de aproximadamente 70% e 10%, respectivamente, enquanto o teor de Al_2O_2 é relativamente insignificante. No entanto, o nível alcalino (Na_2O e K_2O) desses vidros varia entre 13% e 14% Na_2O_{eq} (United States Environmental Protection Agency, 2024; Glass Recycling, 2024; Kaminsky et al., 2020). Em comparação, a fibra de vidro, que normalmente é feita de vidro E, contém teores de SiO_2 e CaO de 60% e 21%, respectivamente, enquanto o teor de Al_2O_3 é tipicamente cerca de 12,5% e o teor alcalino do vidro E é tipicamente menor que 1% Na_2O (Kaminsky et al., 2020). A natureza amorfa do vidro de cal com soda e do vidro E é evidente a partir dos resultados da análise de XRD mostrados na Figura 3(a) e 3(b), respectivamente. Claramente, a composição dos vidros está muito alinhada com o que seria considerado um material pozolânico, embora no caso do vidro de cal com soda, o nível alcalino do vidro possa precisar ser cuidadosamente considerado, onde precauções contra reações álcali-agregado são necessárias.



(a) Padrão XRD de vidro de cal sodada moída (tipo GS) [7].



(b) Padrão XRD de pó de vidro tipo E moído (tipo GE) [8]

Figura 2. Padrões de difração de raios X de pozolanas de vidro (a) tipo GS e (b) tipo GE.

Normalmente, a maior parte dos resíduos de vidro é coletada por meio de sistemas de coleta municipais e processada por Instalações de Recuperação de Materiais (MRF) nos Estados Unidos. O processamento de resíduos de vidro consiste na limpeza dos resíduos de vidro para remover compostos orgânicos, papel e metal do vidro, seguido pela trituração para obter um pó fino de vidro. O processo de limpeza de vidro pode consistir em um ou mais métodos, que normalmente incluem lavagem úmida para remover compostos orgânicos do vidro; abrasão mecânica, atrito, bem como incineração térmica para remover papel e outros compostos orgânicos difíceis de remover da superfície do vidro. Além disso, componentes não vítreos, como metais ferrosos, no fluxo de resíduos podem ser removidos por meio de tecnologias de separação magnética e por correntes parasitas (Smith et al., 2019). O principal objetivo da limpeza de resíduos de vidro é reduzir o valor da perda por ignição (LOI) a um nível que não tenha impacto prejudicial no desempenho do concreto.

A operação de limpeza é seguida pela trituração dos resíduos de vidro em um sistema de circuito fechado com método de classificação de ar para reduzir o tamanho a um sistema de partículas finas para melhorar sua reatividade como pozolana, bem como atingir uma distribuição de tamanho de partículas compatível com cimento Portland para compactação eficaz no concreto.

4. ASTM C1866: ESPECIFICAÇÃO PADRÃO PARA GGP PARA USO EM CONCRETO

Resultados de pesquisas de estudos de laboratório (Dezfouli, 2017; Smith et al., 2019; Tagnit - Hamou e Bengougam, 2012; Nassar e Soroushian, 2012; Shayan e Xu, 2006; Soliman, et al., 2016; Schwarz et al., 2008; Afshinnia e Rangaraju, 2015 e Rangaraju, 2016 ; Rangaraju, 2015; Amer et al., 2022; Torres-Carrasco et al., 2015; Cyr et al., 2012; Krstic e Davalis , 2018) e estudos de campo (Nassar e Soroushian, 2011; Shayan e Xu, 2006; Krstic e Davalos, 2019) de uso de vidro moído como um SCM em concreto, foram usados como base pelo subcomitê ASTM C 09.24 sobre Materiais Cimentícios Suplementares para desenvolver um padrão industrial ASTM C1866 para uso de pozolanas de vidro moído em concreto (ASTM C1866/C1866M-20, 2020). Esta norma reconhece dois tipos de pozolanas de vidro – Tipo GS (vidro soda-cal) e Tipo GE (vidro tipo E), com limites específicos para requisitos químicos, conteúdo amorfo do vidro, bem como requisitos físicos para seu uso como materiais cimentícios suplementares em concreto (ASTM C1866/C1866M-20, 2020). A Tabela 1 mostra os requisitos químicos e físicos típicos de pozolanas de vidro moído conforme ASTM C1866.

A criação da norma ASTM C1866 representa um marco significativo no reconhecimento de pozolanas de vidro moído como SCMs viáveis. A classificação clara entre Tipo GS e Tipo GE aprimora o controle de qualidade e incentiva o uso industrial. No entanto, a norma ainda carece de orientações detalhadas sobre a mitigação da reação álcali-sílica para GGPs altamente alcalinos (especialmente Tipo GS), o que continua sendo uma preocupação em concretos com agregados reativos. Revisões futuras devem ter como objetivo incorporar limites de mitigação de ASR baseados em desempenho ou recomendar diretrizes para misturas ternárias. À medida que a adoção pela indústria cresce, espera-se que o foco mude para padrões baseados em desempenho e métricas de carbono do ciclo de vida.

Tabela 1. Requisitos químicos e físicos de pozolanas de vidro moído (ASTM C1866/C1866M-20, 2020).

Propriedades Químicas	**Requisitos Químicos**		**Propriedades Físicas**	**Requisitos Físicos**
	Tipo GS	**Tipo GE**		**Tipo GS e GE**
SiO_2 , min %	60,0	55,0	Finura (Quantidade retida quando peneirado na peneira nº 325 (45 mícrons), máx. %	5
Al_2O_3 , máx. %	5.0	15.0		
CaO, máx. %	15.0	25,0	Atividade Índice com Cimento Portland, 7 Dias, min %	75
Fe_2O_3 , máx. %	1.0	1.0		
SO_3 , máx. %	1.0	1.0		
Na_2O_{eq}, máx. %	15.0	4.0		
LOI, máx. %	0,50	0,50	Atividade Índice com Cimento Portland, 28 Dias, min %	85
Umidade, %	0,50	0,50		
Vidro amorfo, min %	95	95	-	-

5. DESEMPENHO DE MISTURAS DE ARGAMASSA E CONCRETO COM POZOLANAS DE VIDRO MOÍDO

Numerosos estudos de laboratório e de campo foram conduzidos para estudar o impacto do uso de pozolanas de vidro fosco do tipo GS e do tipo GE como SCMs em argamassas e concreto (Nassar e Soroushian, 2011; Dezfouli, 2017; Smith et al., 2019; Tagnit -Hamou e Bengougam , 2012; Nassar e Soroushian, 2012; Shayan e Xu, 2006; Soliman et al., 2016; Schwarz et al., 2008; Afshinnia e Rangaraju, 2015; Afshinnia e Rangaraju , 2016; Krstic e Davalos, 2019; Afshinnia e Rangaraju, 2015; Amer et al., 2022; Torres-Carrasco et al., 2015, Cyr et al., 2012; Krstic e Davalis, 2018). Tipicamente, a dosagem de GGPs utilizada nesses estudos variou entre 10% e 40% em substituição em massa ao cimento Portland. O uso de GGPs em misturas ternárias com cinza volante ou escória também foi relatado (Kaminsky et al., 2020; ASTM). C1866/C1866M-20, 2020; Afshinnia e Rangaraju, 2015). As seguintes observações gerais destacam o impacto dos GGPs nas propriedades frescas e endurecidas de misturas de argamassa e concreto.

5.1 Espalhamento ou Consistência do Concreto Fresco

Em termos de propriedades no estado fresco, misturas contendo GGPs Tipo GE e Tipo GS mostraram comportamento de espalhamento melhorado em comparação com a mistura de controle em uma faixa de níveis de substituição de cimento (Dezfouli, 2017). Além disso, GGPs tiveram melhor desempenho do que metacaulim (MK) em níveis de substituição de cimento comparáveis. A Figura 3 mostra o comportamento de espalhamento de misturas contendo pozolanas de vidro moído Tipo GE, Tipo GS e MK em nível de substituição de cimento de 20% em uma relação água-aglomerante constante representando a consistência normal para a mistura de controle. Nessas misturas, o aditivo redutor de água não foi empregada. O desempenho de ambos os GGPs é significativamente melhor do que o da mistura com MK e até mesmo o das misturas de controle. A principal razão para esse comportamento é que GGPs são materiais não porosos com pouca absorção de umidade. Além disso, as superfícies de fratura concoidais das partículas de vidro servem como planos de deslizamento e permitem um movimento mais fácil das partículas quando a mistura é submetida a uma tensão de cisalhamento. A Figura 4 mostra a morfologia típica das partículas de vidro moído (Cyr et al., 2012). Em comparação, SCMs como MK apresentam espalhamento significativamente menor devido à absorção de umidade. O benefício do uso de GGPs na melhoria do espalhamento é evidente mesmo em comparação com misturas de controle.

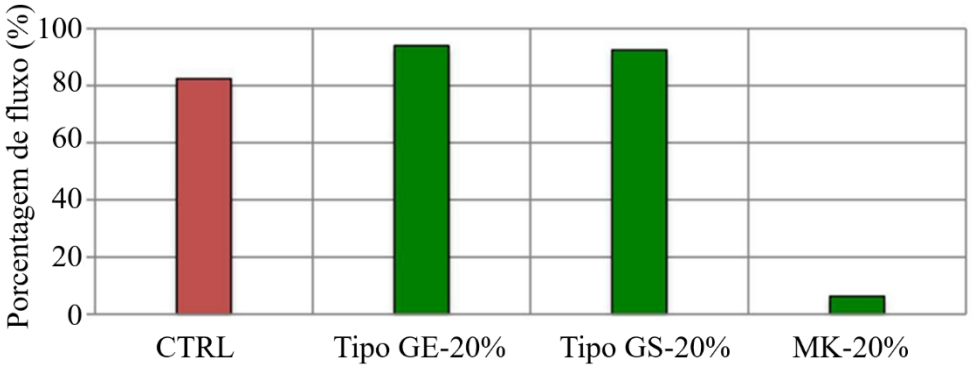


Figura 3. Comportamento de fluxo de argamassas com dosagem de 20% de pozolanas de vidro moído (tipo GE e tipo GS) e meta-caulim (Dezfouli, 2017).

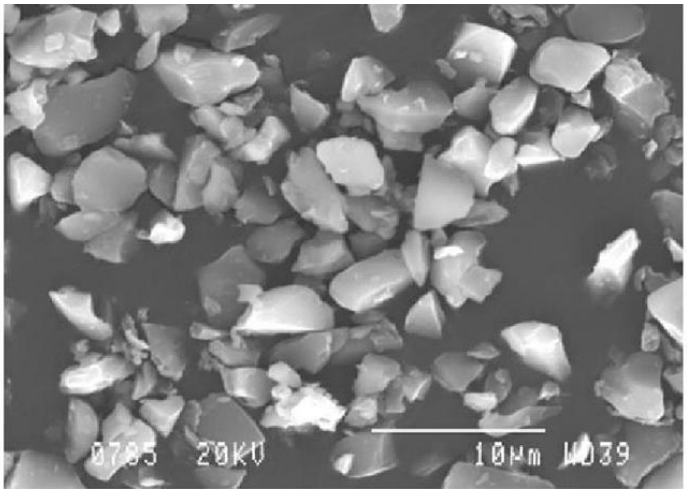


Figura 4. Morfologia da pozolana vítrea tipo GS moída (Cyr et al., 2012).

5.2 Índice Relativo de Resistência (Atividade)

Dezfouli (2017) e Afshinnia (2015, 2016) investigaram o índice de atividade de resistência dos GGPs Tipo GS e Tipo GE e o compararam ao metacaulim como referência. Nestes estudos, foram avaliados níveis de dosagem de substituição de cimento de 10%, 20% e 30% em massa (Dezfouli, 2017; Afshinnia e Rangaraju, 2015; Afshinnia e Rangaraju, 2016). A partir dos dados mostrados na Figura 5, é evidente que os GGPs Tipo GE e Tipo GS atendem ao índice mínimo de atividade de resistência de 85% em 28 dias por ASTM C1866 em níveis de substituição de 10% e 20%. No entanto, o GGP Tipo GE atendeu ao requisito até mesmo com nível de substituição de 30%. Além disso, a pozolana de cimento tipo GE apresentou melhor desempenho em comparação à pozolana de cimento tipo GS em dosagens equivalentes, o que se deve principalmente à diferença na finura das duas pozolanas. Nesses estudos, observou-se que a pozolana MK e a pozolana tipo GE apresentaram-se mais finas, com d50 de 1,5 e 7 µm, respectivamente, enquanto a pozolana tipo GS apresentou d50 de 17 µm. As misturas com MK superaram as pozolanas tipo GS e tipo GE em níveis de substituição de cimento de 10% e 20%.

A falta de trabalhabilidade adequada em misturas com 30% de MK impediu que fosse considerado nos ensaios o índice relativo de atividade de resistência.

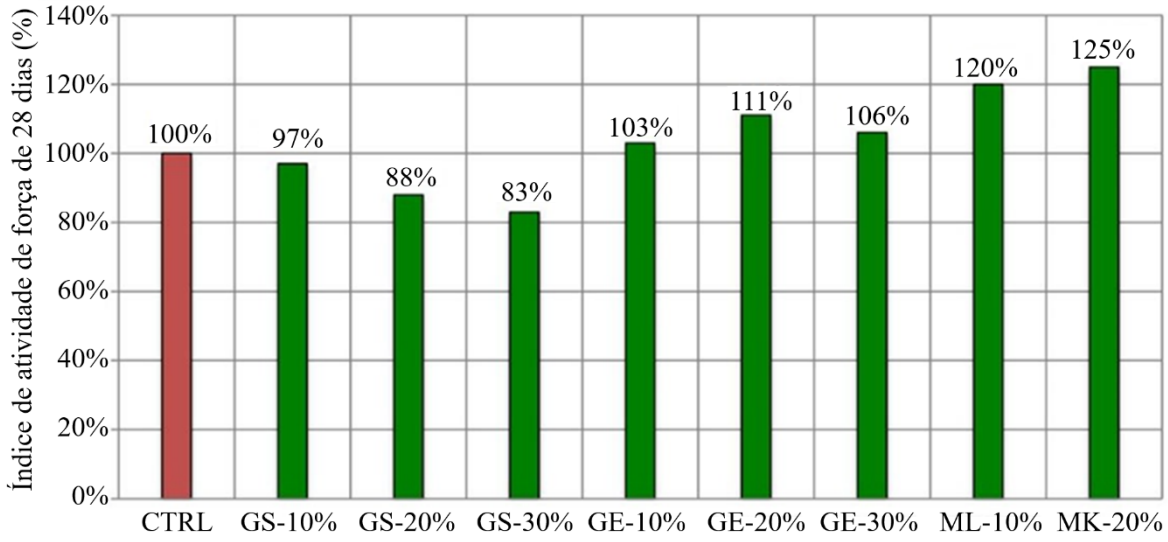


Figura 5. Índice relativo (atividade) de resistência de misturas de argamassa contendo pozolanas tipo GE, GS e MK em 28 dias (Dezfouli, 2017).

5.3 Reatividade Pozolânica

A reatividade pozolânica de GGPs e metacaulim (MK) em nível de dosagem de 20% usando análise termogravimétrica foi estudada por Dezfouli (2017). Os resultados deste estudo são mostrados na Figura 6. O teor de CH de todas as misturas foi normalizado em relação ao teor de cimento nas misturas, de modo que o efeito de diluição da substituição do cimento Portland é contabilizado. A partir desses resultados, é evidente que o MK é muito mais eficaz em sua reação pozolânica em comparação com ambos os GGPs em nível de substituição de 20% em 28 e 56 dias. No entanto, os GGPs mostram comportamento pozolânico ligeiramente melhorado em 56 dias em comparação com 28 dias. Deve-se notar que, embora o teor de CH de misturas com pozolanas seja previsivelmente menor do que a mistura de controle, ou seja, devido a uma combinação de efeitos de diluição e pozolânicos, a probabilidade de efeito de nucleação de pozolanas finas na hidratação acelerada do cimento Portland é inerentemente incorporada nesses experimentos, embora não quantificada. Portanto, a redução de CH em qualquer idade é um efeito líquido da diferença entre o maior teor de CH devido ao efeito de nucleação na presença de pozolanas mais finas e a redução no teor de CH causada por uma combinação dos efeitos de diluição e pozolânicos das pozolanas. Além disso, a reatividade pozolânica é uma função da finura das pozolanas. Neste estudo, o tamanho médio de partícula (d50) da pozolana Tipo GS foi relatado como 17 mícrons, enquanto a pozolana Tipo GE e MK foram relatadas como 7 e 2 mícrons, respectivamente, o que também explica as diferenças relativas entre os resultados das três pozolanas (Dezfouli, 2017). Os resultados dos testes de índice relativo de atividade de resistência mostrados na Figura 5 corroboram as descobertas dos resultados mostrados na Figura 6.

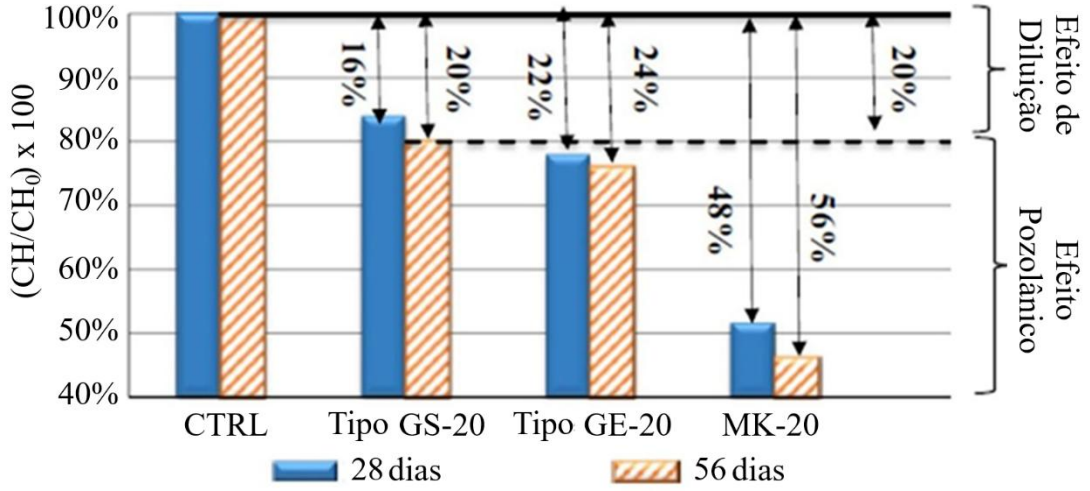


Figura 6. Teor normalizado de hidróxido de cálcio de amostras de pasta contendo 20% de nível de substituição de cimento de pozolanas tipo GS, tipo GE e MK (Chakraborty et al., 2010).

5.4 Eficácia dos GGPs na mitigação da reação álcali-sílica

O potencial de reação álcali-sílica no concreto é frequentemente mitigado pelo uso de pozolanas em dosagem suficiente, dependendo do grau de reatividade do agregado. Nesse sentido, a eficácia das pozolanas não se baseia apenas em sua capacidade de reagir com o hidróxido de cálcio por meio da reação pozolânica para produzir gel CSH ou CASH e reter os álcalis presentes na solução dos poros, mas também depende da capacidade das pozolanas de refinar a estrutura dos poros do concreto para minimizar a migração de umidade para o concreto. Esses mecanismos que ajudam a suprimir a reação álcali-sílica são, portanto, uma função tanto da composição química das pozolanas quanto de suas propriedades físicas, como sua finura. Além disso, a eficácia da mitigação da ASR de certas pozolanas alcalinas também dependerá da disponibilidade dos álcalis da pozolana na solução dos poros e do aumento da carga alcalina no concreto. Com relação aos GGPs, a

presença de álcalis no Tipo GS não deve ser motivo de preocupação quando não houver agregados reativos presentes no concreto. No entanto, o uso de GGP Tipo GS pode ser preocupante quando um agregado reativo está presente na matriz de concreto. A Figura 7 mostra os resultados de mudança de comprimento do teste de prisma de concreto em miniatura (MCPT) com base na AASHTO T380 (Dezfouli, 2017). Nesses testes, um agregado de argilita siliciosa altamente reativo foi usado em misturas de concreto com ligante consistindo de misturas binárias de cimento Portland com Tipo GS, Tipo GE e metacaulim (MK). Nesses testes, pozolanas Tipo GS e Tipo GE foram usadas em níveis de substituição em massa de 10%, 20% e 30% de cimento Portland, enquanto MK foi usado apenas em nível de substituição de 10%. Misturas com níveis mais altos de substituição de MK não foram aceitáveis em relação à trabalhabilidade e, portanto, não foram usadas. Neste teste, o agregado foi considerado reativo se o nível de expansão excedesse 0,04% aos 56 dias, e a pozolana foi considerada eficaz na mitigação da ASR se o nível de expansão fosse mantido abaixo de 0,02% aos 56 dias. Esses dois níveis limite são indicados por linhas tracejadas identificadas por * e ** na legenda da Figura 7.

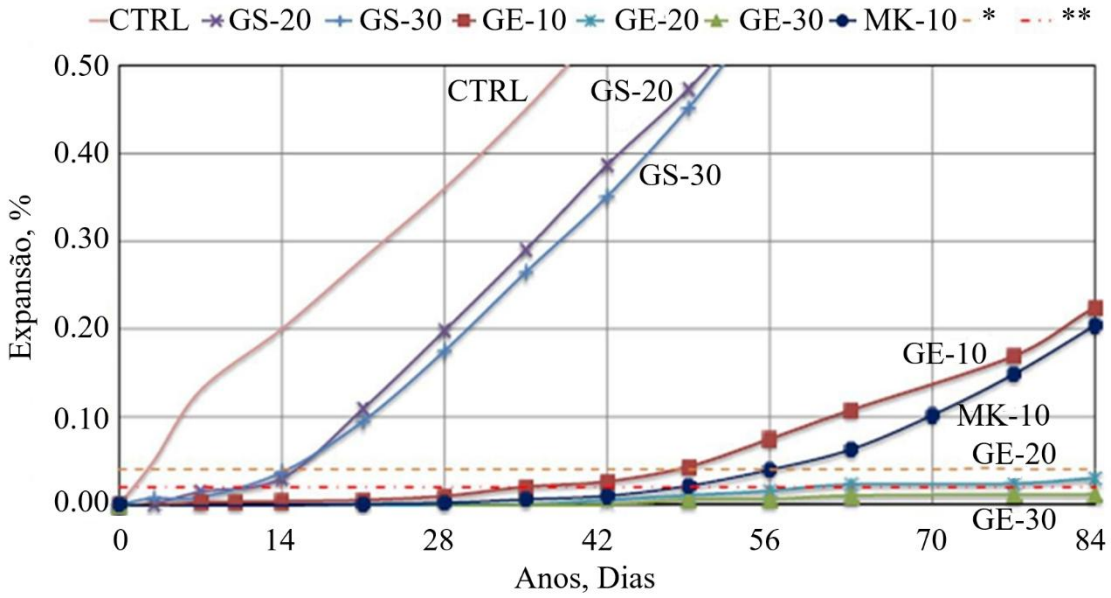


Figura 7. Comportamento de expansão de prismas de concreto no teste AASHTO T380 (Dezfouli, 2017).
*Limite de expansão (0,04%) para CTRL em 56 dias,
**Limite de expansão (0,02%) para amostras contendo SCM em 56 dias.

Os resultados desses estudos mostraram que a amostra CTRL exibiu um nível muito alto de expansão mesmo antes de 56 dias e foi claramente indicativo da presença de um agregado altamente reativo. No entanto, quando a pozolana Tipo GS foi usada em níveis de substituição de cimento de 20% e 30%, ela foi considerada ineficaz em mitigar a expansão em ambos os níveis de dosagem. No entanto, quando a pozolana Tipo GE foi usada, o comportamento de expansão do concreto foi substancialmente reduzido em todos os níveis de dosagem, embora o nível de dosagem de 10% tenha sido considerado insuficiente para mitigar a expansão abaixo do limite de 0,02% em 56 dias. A pozolana Tipo GE em níveis de dosagem de 20% e 30% foi considerada eficaz em mitigar a expansão abaixo do limite de 56 dias. Enquanto a MK foi capaz de reduzir substancialmente a expansão em prismas de concreto em um nível de dosagem de 10%, esse nível de dosagem foi inadequado para mitigar a expansão ASR abaixo do limite de 0,02% em 56 dias. Claramente, a partir deste estudo, é evidente que a pozolana Tipo GS não foi capaz de mitigar a expansão da ASR mesmo em um nível de dosagem de 30%, e o teor alcalino dentro do vidro provavelmente está

contribuindo para a carga alcalina no concreto. Tagnit-Hamou relatou que o desempenho de mitigação da ASR da pozolana Tipo GS pode ser significativamente melhorado em misturas ternárias com sílica ativa, metacaulim e escória, conforme observado na Figura 8 (Kaminsky et al., 2020). Em um estudo diferente por Amer et al., é demonstrado que o uso de pozolana Tipo GE em quantidades moderadas pode melhorar significativamente o desempenho da cinza volante Classe C (CFA) na mitigação da ASR, conforme visto na Figura 9 (Amer et al., 2022).

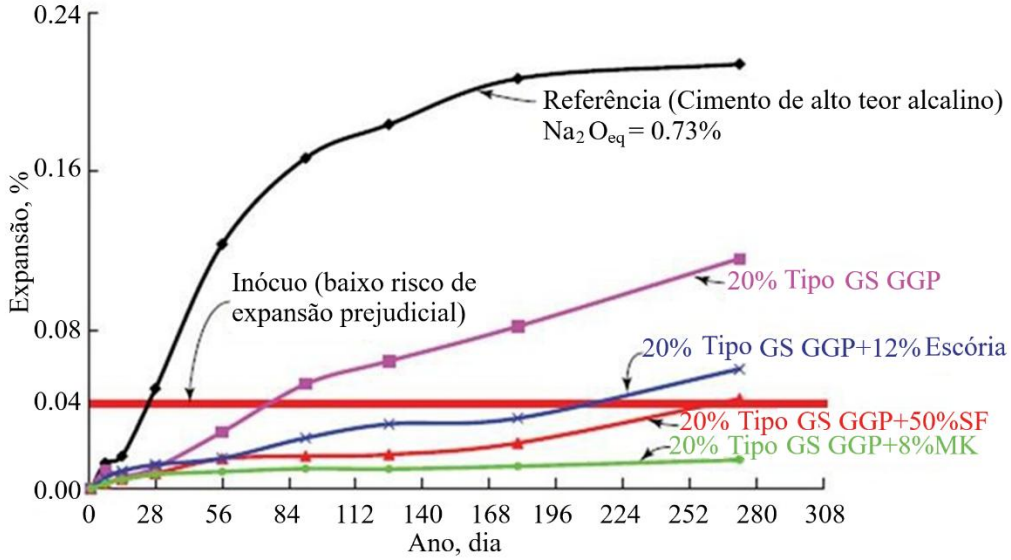


Figura 8. Comportamento de mudança de comprimento de prismas de concreto contendo agregado de calcário Spratt em misturas binárias e ternárias de pozolana tipo GS com escória, sílica ativa e metacaulim (Cortesia de Arezki Tagnit -Hamou, Universidade de Sherbrooke) (Kaminsky et al., 2020).

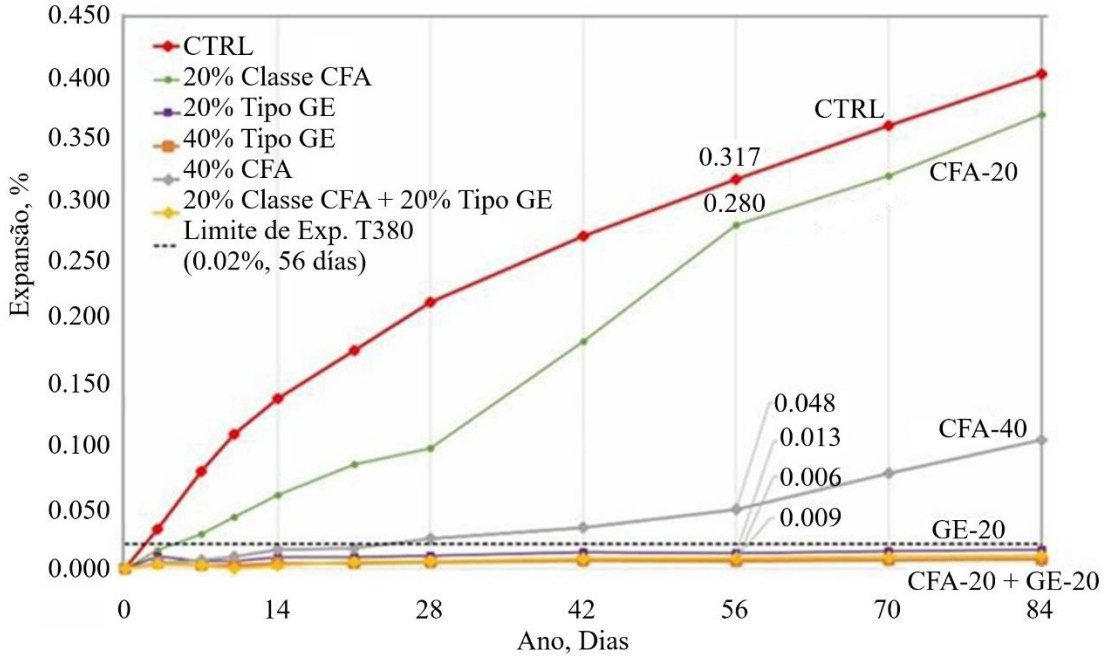


Figura 9. Comportamento de mudança de comprimento de prismas de concreto no teste AASHTO T380, contendo misturas binárias de pozolana Tipo GE e cinza volante Classe C (CFA) com um agregado de argilita siliciosa altamente reativo (Amer et al., 2022).

5.5 Eficácia dos GGPs na minimização da permeabilidade ao cloreto

Minimizar a permeabilidade do concreto ao cloreto é essencial para melhorar a durabilidade do concreto armado contra a corrosão das armaduras. Nesse sentido, a eficácia dos GGPs na redução da permeabilidade ao cloreto foi investigada em diversos estudos (Dezfouli, 2017; Amer et al., 2022; Krstic e Davalis, 2018). As Figuras 10 e 11 mostram os resultados dos testes de Permeabilidade Rápida de Íons de Cloreto conforme ASTM C1202 em três misturas contendo 20% de dosagem de pozolana. O desempenho da pozolana Tipo GS é comparável ao da cinza volante Classe F em idades posteriores (28 dias e 56 dias), enquanto o desempenho da Tipo GE é superior a outras pozolanas avaliadas neste estudo [Rashidian]. Em outro estudo, a influência de diferentes níveis de dosagem de pozolana Tipo GE foi avaliada e comparada a uma mistura Controle e outra mistura com 20% de cinza volante Classe F, conforme mostrado na Figura 11. Esses resultados indicam claramente o desempenho superior das GGPs no controle da permeabilidade ao cloreto no concreto.

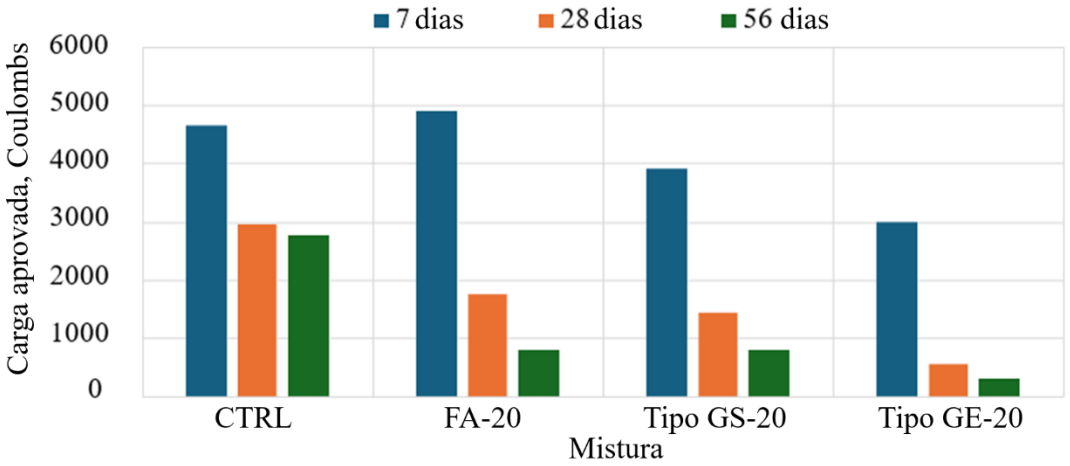


Figura 10. Influência do tipo de pozolana nos resultados do RCPT. Valores de Coulomb inferiores a 1000 são considerados de permeabilidade muito baixa (Dezfouli, 2017; Amer et al., 2022).

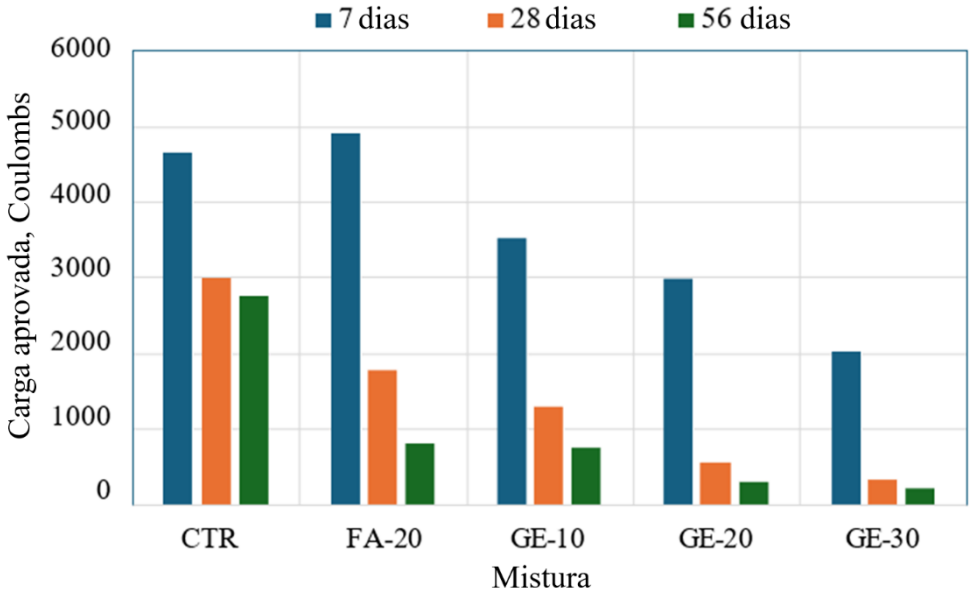


Figura 11. Influência da pozolana tipo GE nos resultados do RCPT. Valores de Coulomb inferiores a 1000 são considerados de permeabilidade muito baixa (Dezfouli, 2017).

6. CONCLUSÕES

O vidro à base de sílica é um material universalmente produzido com uma ampla variedade de aplicações na civilização moderna. Enquanto milhões de toneladas deste material são produzidas e uma fração dele reciclada a cada ano, a grande maioria do vidro é coletada como resíduo e descartada em aterros sanitários nos Estados Unidos. Dado que o vidro é um material de composição química consistente e com estrutura de sílica amorfa, é extremamente adequado como um material cimentício suplementar para uso em concreto de cimento Portland. Além disso, pode-se considerar o vidro como um material de baixo carbono em todos os sentidos em comparação com o cimento Portland. Em seu estado inicial de produção, ou seja, estado virgem, enquanto 0,66 toneladas de CO_2 são produzidas para cada tonelada de vidro fabricado, para produzir uma pozolana Tipo GS ou Tipo GE finamente moída, são necessárias apenas 0,056 toneladas de CO_{2eq} por uma tonelada de pozolana de vidro moída (Nassar e Soroushian, 2011). Isso é significativamente menor do que a pegada de carbono do cimento, que é de 0,922 toneladas de CO_2 por tonelada de cimento Portland puro, produzida. Tanto as pozolanas de vidro moído Tipo GS quanto as de vidro moído Tipo GE demonstraram ser pozolanas eficazes, não apenas melhorando as propriedades mecânicas, mas também os problemas de durabilidade do concreto. Obviamente, onde houver potencial para reação álcali-sílica, o uso da pozolana de vidro moído Tipo GS deve ser considerado em misturas ternárias com outras pozolanas, como escória, sílica ativa, cinza volante Classe F ou metacaulim. Além disso, o uso de pozolanas de vidro ajuda a melhorar a trabalhabilidade da mistura de concreto no estado fresco e pode reduzir a necessidade de aditivos redutores de água para melhorar a trabalhabilidade.

Considerando todos esses atributos positivos das pozolanas de vidro moído, o uso de pozolanas de vidro moído do tipo GS e GE pode servir como uma das muitas estratégias necessárias para reduzir a pegada de carbono em formulações modernas de concreto. Além disso, o uso de resíduos de vidro como pozolana em concreto minimiza significativamente a necessidade de aterro sanitário, demonstrando ser uma solução ambientalmente benéfica. Com o advento da norma ASTM C1866 para pozolanas de vidro moído, o futuro do uso de pozolanas de vidro moído em concreto é promissor e é racionalizado por especificações rigorosas que garantem um desempenho superior do concreto, alcançando esse objetivo por meio de uma abordagem de baixo carbono e ambientalmente sustentável.

7. AGRADECIMENTOS

O autor gostaria de agradecer aos seus antigos alunos Dr. Hassan Rashidian Dezfouli, Dr. Kaveh Afshinnia, Dr. Omar Amer, bem como aos membros do comitê ASTM C09.24 por trabalharem juntos e desenvolverem o padrão ASTM C1866 para pozolanas de vidro moído.

8. REFERÊNCIAS

Ellis, D. A., Badel, A. F., Chiang, M. L., Park, R. J. Y., Chiang, Y. .M, (2019), *Toward Electrochemical Synthesis of Cement – An Electrolyzer-Based Process for Decarbonating CaCO3 while Producing Useful Gas Streams*, Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, Vol. 117 (23) 12584-12591, https://doi.org/10.1073/pnas.1821673116

CarbonCloud (2024), https://apps.carboncloud.com/climatehub/product-reports/id/41919745467; Accessed on October 31, 2024

United States Environmental Protection Agency (2024), Report on Facts and Figures about Materials, Waste and Recycling, Glass: Material-Specific Data, Accessed on October 16, https://www.epa.gov/facts-and-figures-about-materials-waste-and-recycling/glass-material-specific-data#GlassOverview

Glass Recycling (2024), *How is Glass Recycled? Compactor Management Company*, Website Accessed on October 1, How to Recycle Glass? | Compactor Management Company (norcalcompactors.net)

Nassar, R. -U. -D. and Soroushian, P. (2011), "*Field investigation of concrete incorporating milled waste glass*," Journal of Solid Waste Technology and Management, V. 37, No. 4, pp. 307-319. https://doi.org/10.5276/JSWTM.2011.307

Kaminsky, A., Krstic, M., Rangaraju, P. R., Tagnit-Hamou, A., Thomas, M. D. A. (2020), *Ground-Glass Pozzolan for Use in Concrete*, Concrete International, Vol. 42, No. 11, pp. 24-32.

Chakraborty, R., Dey, A., Mukhopadhyay, A. K. (2010), *Loading Rate Effect on Nanohardness of Soda-Lime-Silica Glass*, Metallurgical and Materials Transactions A., Vol. 41, pp:1301-1312. https://doi.org/10.1007/s11661-010-0176-8

Dezfouli, H. R. (2017), *Characterization and Evaluation of Ground Glass Fiber as a Cementitious Component in Portland Cement and Geopolymer Concrete Mixtures*, [PhD Dissertation, Clemson University], Retrieved from https://open.clemson.edu/all_dissertations/1994.

Smith, Y. R., Nagel, J. R., Rajamani, J. R. (2019), *Eddy current separation for recovery of non-ferrous metallic particles: A comprehensive review*, Minerals Engineering, Vol. 133, pp. 149-159. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.12.025

Tagnit-Hamou, A., Bengougam, A. (2012), "*The Use of Glass Powder as Supplementary Cementitious Material*," Concrete International, Vol. 34, No. 3, pp. 56-61.

Nassar, R. -U. -D., Soroushian, P. (2012), "*Strength and durability of recycled aggregate concrete containing milled glass as partial replacement for cement*" Construction and Building Materials, V. 29, pp. 368-377. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.061

Shayan, A., Xu, A. (2006), "*Performance of glass powder as a pozzolanic material in concrete: A field trial on concrete slabs*," Cement and Concrete Research, V. 36, No. 3, pp. 457-468. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.12.012

Soliman, N. A., Omran, A. F., Tagnit-Hamou, A. (2016), "*Laboratory Characterization and Field Application of Novel Ultra-High-Performance Glass Concrete*," ACI Materials Journal, V. 113, No. 3, pp. 307-316. http://dx.doi.org/10.14359/51688827

Schwarz, N., Cam, H., Neithalath, N. (2008), "*Influence of a fine glass powder on the durability characteristics of concrete and its comparison to fly ash*," Cement and Concrete Composites, V. 30, No. 6, pp. 486-496. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2008.02.001

Afshinnia, K. Rangaraju, P. R. (2015), *Influence of fineness of ground recycled glass on mitigation of alkali–silica reaction in mortars*, Journal of Construction and Building Materials, Vol. 81, pp. 257-267. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.041

Afshinnia, K. Rangaraju, P. R. (2016), "*Sustainable Use of Recycled Glass in Portland Cement Concrete*", The Journal of Solid Waste Technology and Management, Volume 42, issue 1, pp. 16-24. https://doi.org/10.5276/JSWTM.2016.16

Krstic, M., Davalos, J. F. (2019), "*Field Application of Recycled Glass Pozzolan for Concrete*," ACI Materials Journal, V. 116, No. 4, pp. 123-131. http://dx.doi.org/10.14359/51716716

ASTM International (2020), *ASTM C1866/C1866M-20: Standard Specification for Ground Glass Pozzolan for Use in Concrete*, West Conshohocken, PA. https://doi.org/10.1520/C1866_C1866M-20

Afshinnia, K., Rangaraju, P. R. (2015), "*Efficiency of Ternary Blends Containing Fine Glass Powder in Mitigating Alkali-Silica Reaction*", Journal of Construction and Building Materials, Vol. 100, pp. 234-245. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.09.043

Amer, O. A., Rangaraju, P. R., Dezfouli, H. R. (2022), *Effectiveness of binary and ternary blended cements of class C fly ash and ground glass fibers in improving the durability of concrete.* Journal of Sustainable Cement-Based Materials, Vol. 11, No. 2, pp. 127-136. https://doi.org/10.1080/21650373.2021.189908

Torres-Carrasco, M., Tognonvi, M. T., Tagnit-Hamou, A., Puertas, F. (2015), *Durability of Alkali-Activated Slag Concrete Prepared Using Waste Glass as Alternative Activator*, ACI Materials Journal, V. 112, No. 6, pp. 791-800. http://dx.doi.org/10.14359/51687903

Cyr, M., Idir, R., Poinot, T. (2012), *Properties of Inorganic Polymer (Geopolymer) Mortars Made of Glass Cullet*, Journal of Material Science, Vol. 47, No. 6, pp. 2782-2797. https://doi.org/10.1007/s10853-011-6107-2

Krstic, M., Davalis, J. F. (2018), *Macro- and Micro-Structure Evaluations of Recycled Post-Consumer Glass Cementitious Material for Concrete*, Proceedings of SynerCrete' 18: International Conference on Interdisciplinary Approaches for Cement-Based Materials and Structural Concrete, Funchal, Madeira Island, Portugal, Oct 2018, pp. 261-266.

Nature Editorial (2021), *Glass is the hidden gem in a carbon-neutral future*, Nature, 599, pp. 7-8. https://doi.org/10.1038/d41586-021-02992-8