

**ARGAMASSAS
SUSTETÁVEIS: AVALIAÇÃO
DO DESEMPENHO
MECÂNICO COM
SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO
CIMENTO PORTLAND POR
RESÍDUO DE VIDRO E PÓ
DE PEDRA ORNAMENTAL**

**SUSTAINABLE CEMENTITIOUS MORTARS: EVALUATION OF MECHANICAL
PERFORMANCE WITH PARTIAL REPLACEMENT OF PORTLAND CEMENT
BY GLASS WASTE AND ORNAMENTAL STONE POWDER**

Engenharias • 25/09/2026

REGISTRO DOI: [10.70773/revistatopicos/790304248](https://doi.org/10.70773/revistatopicos/790304248)

Nayoung Sara Amador Nascimento¹

Geisiane Fabrícia Pereira Silva Moreira²

Jayne Carlos Piovesan³

Bruno Mesquita dos Santos⁴

Livia Maria Palácio Ribeiro⁵

Tatiane Emilio Checchia⁶

Aedjota Matos de Jesus⁷

Raduan Krause Lopes⁸

RESUMO

Diante do elevado impacto ambiental decorrente da emissão de dióxido de carbono na produção do cimento Portland e da urgente necessidade de gestão de passivos industriais regionais, a valorização de resíduos minerais constitui uma alternativa viável para impulsionar a economia circular na construção civil. Foi avaliado o desempenho mecânico e reológico de argamassas cimentícias produzidas com substituição parcial do cimento CP V-ARI-RS por resíduo de vidro moído e por pó de pedra ornamental em teores de 10%, 15% e 20% em massa, oriundos de indústrias de Porto Velho/RO. Foram produzidas sete misturas no traço unitário 1:3 (aglomerante:agregado miúdo) com relação água/cimento fixa em 0,50, submetidas aos ensaios de espalhamento no estado fresco e de resistência à compressão axial aos 7 e 28 dias de cura submersa. Os resultados indicaram que a incorporação do resíduo de vidro promoveu redução da trabalhabilidade no estado fresco, porém os teores de 10% e 15% mantiveram a resistência à compressão aos 28 dias em níveis equivalentes ao traço de referência (27,39 MPa e 27,60 MPa contra 28,17 MPa, respectivamente), no traço com substituição de 20% houve perda de resistência (21,09 MPa). Em contrapartida, o pó de pedra ornamental elevou a fluidez da mistura e apresentou comportamento não linear no estado endurecido, no qual a substituição de 10% resultou em desempenho mecânico similar à referência aos 28 dias (27,11 MPa), enquanto o teor de 15% exibiu maior queda de resistência (20,63 MPa). Conclui-se que o uso de ambos os resíduos como substituição parcial ao aglomerante é tecnicamente viável para a aplicação em argamassas para diversas aplicações na construção civil, sendo o teor de 15% para o vidro e de 10% para o pó de pedra os limites recomendados para otimizar a conservação das propriedades mecânicas da matriz.

Palavras-chave: argamassa cimentícia; resíduo de vidro; pó de pedra ornamental; economia circular; resistência à compressão.

ABSTRACT

Given the high environmental impact resulting from carbon dioxide emissions in Portland cement production and the urgent need to manage regional industrial waste, the valorization of mineral waste constitutes a viable alternative to advance the circular economy in civil construction. The mechanical and rheological performance of cementitious mortars produced with partial replacement of CP V-ARI-RS Portland cement by ground glass waste and ornamental stone powder at replacement levels of 10%, 15%, and 20% by mass, sourced from industries in Porto Velho/RO, was evaluated. Seven mixtures were produced with a 1:3 unit mix proportion (binder:fine aggregate) and a fixed water-to-cement ratio of 0.50, which were subjected to flow table testing in the fresh state and axial compressive strength testing at 7 and 28 days of submerged curing. The results indicated that the incorporation of glass waste reduced workability in the fresh state; however, the 10% and 15% replacement levels maintained compressive strength at 28 days at levels equivalent to the reference mix (27.39 MPa and 27.60 MPa compared to 28.17 MPa, respectively), whereas a loss of strength was observed for the 20% replacement mix (21.09 MPa). Conversely, the ornamental stone powder increased mixture fluidity and exhibited non-linear behavior in the hardened state, in which the 10% replacement level resulted in mechanical performance similar to the reference mix at 28 days (27.11 MPa), while the 15% level displayed the largest drop in strength (20.63 MPa). It is concluded that the use of both waste materials as a partial replacement for the binder is technically feasible for mortars across various civil construction applications, with replacement levels of 15% for glass waste and 10%

for ornamental stone powder being the recommended limits to optimize the retention of the matrix's mechanical properties.

Keywords: cementitious mortar; glass waste; ornamental stone powder; circular economy; compressive strength.

1. INTRODUÇÃO

A produção de cimento Portland responde por parcela significativa das emissões globais de dióxido de carbono (CO_2), decorrentes do processo de calcinação e da queima de combustíveis em alta temperatura (Cândido; Felix, 2023). Diante desse cenário, a substituição parcial do clínquer por subprodutos industriais e resíduos minerais constitui uma estratégia eficaz para a redução da pegada de carbono de matrizes cimentícias e para a consolidação da economia circular na construção civil (Scrivener, John e Garner, 2018).

Nesse sentido, a valorização de resíduos industriais tem ganho destaque na pesquisa científica, impulsionada pela busca por materiais cimentícios suplementares capazes de mitigar o passivo ambiental de cadeias produtivas e otimizar o desempenho de compósitos (Ebrahimi et al., 2023; Nega et al., 2023; Oliveira et al., 2023). A incorporação desses insumos residuais em substituição parcial ao aglomerante convencional representa uma alternativa viável para fechar ciclos materiais, alinhando a gestão de resíduos à demanda por materiais de construção sustentáveis.

O resíduo de vidro plano, proveniente do processo de corte e lapidação industrial, apresenta elevado teor de sílica amorfa. Quando moído a granulometria fina, esse material atua como material cimentício suplementar, combinando o efeito físico de

preenchimento de vazios (efeito fíler) com a atividade pozolânica de médio e longo prazo por meio da reação com o hidróxido de cálcio liberado na hidratação do cimento (Lopes et al., 2021; Amin et al., 2024; Ahmad & Zhou, 2023).

Por sua vez, o pó de pedra ornamental, gerado no beneficiamento e desbaste de rochas como granito e mármore, consiste em um resíduo predominantemente inerte de alta finura. Sua incorporação em compósitos cimentícios visa promover o empacotamento microestrutural da matriz, acelerar os núcleos de nucleação heterogênea do silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e reduzir o consumo de aglomerante convencional (Campos et al., 2019; Woźniak et al., 2022; Yeshiwas et al., 2025).

Entretanto, taxas elevadas de substituição de cimento por resíduos finos podem comprometer a cinética de hidratação e o desenvolvimento de resistência mecânica, impondo a necessidade de delimitação experimental de teores viáveis para insumos gerados regionalmente (Galdino et al., 2020). A avaliação isolada do comportamento mecânico dessas adições em matrizes padronizadas é fundamental para fundamentar tecnicamente o reaproveitamento de passivos ambientais gerados na região de Porto Velho, Rondônia.

Este trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho mecânico de argamassas cimentícias produzidas com substituição parcial de cimento Portland por resíduo de vidro e pó de pedra ornamental nos teores de 10, 15 e 20% em massa. A análise baseia-se na determinação da trabalhabilidade bem como a resistência à compressão axial nas idades de 7 e 28 dias, estabelecendo os limites técnicos de substituição para a viabilização do uso desses materiais.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Cimento Portland e Hidratação

O cimento Portland é produzido a partir da clínquerização de uma mistura de matérias-primas ricas em cálcio, sílica, alumina e ferro sob temperaturas da ordem de 1.450 °C, seguida da moagem do clínquer com sulfato de cálcio (gesso). A composição química do clínquer é constituída predominantemente por óxido de cálcio (CaO , 60–67%) e dióxido de silício (SiO_2 , 17–25%), além de óxido de alumínio (Al_2O_3 , 3–8%) e óxido de ferro (Fe_2O_3 , 2–6%). A reação desses óxidos durante o processamento térmico origina as quatro fases minerais principais do clínquer: silicato tricálcico (C_3S , 45–60%), silicato dicálcico (C_2S , 20–30%), aluminato tricálcico (C_3A , 5–12%) e ferroaluminato tetracálcico (C_4AF , 6–10%), utilizando a notação usual da química do cimento (Taylor, 1998).

A hidratação do cimento compreende o conjunto de reações exotérmicas e irreversíveis entre essas fases minerais e a água, resultando na formação dos compostos responsáveis pela pega e endurecimento da matriz. Os silicatos de cálcio (C_3S e C_2S) reagem para formar o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) — principal fase responsável pelo ganho de resistência mecânica e compacidade da matriz — e o hidróxido de cálcio (CH, $\text{Ca}(\text{OH})_2$), de caráter cristalino e alcalino. A hidratação do C_3S ocorre rapidamente nas primeiras idades, enquanto a do C_2S progride de forma lenta e contínua ao longo do tempo. Simultaneamente, o C_3A reage nas primeiras horas e, na presença dos íons sulfato provenientes do gesso, forma a etringita primária (AFt), que controla o tempo de pega e previne a pega rápida do compósito (Mehta; Monteiro, 2008).

A evolução microestrutural decorrente dessas reações determina o desenvolvimento da resistência à compressão do material. Nas idades iniciais (até 7 dias), a resistência é governada majoritariamente pela hidratação do C_3S . Em idades avançadas (28 dias ou mais), o contínuo consumo do C_2S e a consequente precipitação de C-S-H promovem o preenchimento dos poros capilares, densificando a pasta de cimento e elevando a capacidade de suporte de carga da matriz cimentícia (Taylor, 2017; Mehta; Monteiro, 2014).

2.2. Argamassas Cimentícias - Propriedades e Aplicações

As argamassas cimentícias são compósitos constituídos pela mistura homogênea de aglomerante hidráulico, agregado miúdo e água, apresentando propriedades de aderência e endurecimento (Carasek, 2017) . No âmbito da construção civil, conforme definição da NBR 13281-1 (ABNT, 2023) esses materiais desempenham funções estruturais secundárias e de vedação, atuando como elemento de assentamento de blocos de alvenaria e como camada de revestimento para proteção e regularização de superfícies verticais e horizontais.

No estado fresco, o desempenho das argamassas é determinado primordialmente pela sua trabalhabilidade, consistência e capacidade de retenção de água. A alteração da proporção dos materiais constituintes ou a adição de finos minerais modifica a reologia da mistura, podendo alterar a demanda de água para a manutenção da consistência adequada e afetar a densidade de massa da pasta (Silva et al., 2025). O equilíbrio dessas propriedades frescas é fundamental para garantir a adequada aplicação em obra e o adensamento eficiente sem segregação dos componentes.

No estado endurecido, as propriedades fundamentais incluem a resistência à compressão, a resistência de aderência à tração, o módulo de elasticidade e a porosidade capilar. A resistência à compressão axial constitui o principal parâmetro mecânico para a verificação do desempenho estrutural do compósito e para a sua classificação normativa (ABNT, 2023). A microestrutura da matriz endurecida, influenciada diretamente pelo grau de empacotamento de partículas e pela eficiência das reações de hidratação, determina a capacidade do material de suportar solicitações mecânicas e resistir à degradação ambiental ao longo de sua vida útil (Mehta; Monteiro, 2008).

2.3. Materiais Cimentícios Suplementares (MCSs)

A substituição parcial do clínquer por materiais cimentícios suplementares (MCSs) constitui a principal estratégia para a redução de emissões de dióxido de carbono na indústria do cimento em curto e médio prazo (Scrivener; John; Gartner, 2018). Os MCSs compreendem materiais minerais de elevada finura que exibem comportamento pozolânico ou cementício, reagindo com o hidróxido de cálcio (CH) proveniente da hidratação do cimento Portland para formar fases adicionais de silicato de cálcio hidratado (C-S-H).

Esses materiais dividem-se em pozolanas naturais e artificiais. As pozolanas artificiais abrangem subprodutos industriais e agroindustriais submetidos a tratamento térmico, como cinzas de bagaço de cana-de-açúcar, argilas calcinadas e pós de vidro (Moreira; Rego, 2020; Siqueira; Toledo Filho; Cordeiro, 2025). A incorporação dessas adições altera a cinética de hidratação do compósito, atuando tanto por nucleação heterogênea nas idades

iniciais quanto pelo consumo progressivo do Ca(OH)_2 nas idades avançadas.

Ainda segundo Siqueira, Toledo Filho e Cordeiro (2025), a utilização de MCSs proporciona ganhos em resistência mecânica, redução da porosidade capilar, aumento da durabilidade contra agentes agressivos e diminuição da ocorrência de eflorescência. No entanto, a incorporação de elevadas frações dessas adições pode aumentar a demanda de água da mistura, alterar os tempos de pega e aumentar a sensibilidade à retração por secagem.

A magnitude dessas alterações depende diretamente do teor de substituição, da finura e da reatividade do material utilizado. Substituições moderadas mantêm ou elevam o desempenho mecânico e a durabilidade da matriz ao longo do tempo, enquanto teores excessivos diluem o teor de cimento e comprometem as propriedades mecânicas do compósito (Funahashi Júnior et al., 2022). O estabelecimento de limites técnicos de substituição é, portanto, requisito fundamental para assegurar a viabilidade de compósitos cimentícios sustentáveis.

2.4. Resíduos de Pó de Vidro na Construção

O resíduo de pó de vidro é um subproduto gerado nas etapas industriais de lapidação, corte e furação de vidros planos. Devido à sua elevada finura e ao caráter amorfo de sua estrutura, esse material apresenta atividade pozolânica, atuando como material cimentício suplementar em substituição parcial ao cimento Portland (Morais et al., 2022; Li et al., 2022).

Sua composição química é típica dos vidros sodo-cálcicos, constituída predominantemente por dióxido de silício (SiO_2), óxido

de sódio (Na_2O) e óxido de cálcio (CaO), além de teores secundários de óxido de alumínio (Al_2O_3), óxido de magnésio (MgO) e óxidos de ferro e potássio (PAIVA, 2009;Lopes et al., 2021). Essa constituição favorece a reação pozolânica com o hidróxido de cálcio livre da matriz cimentícia, embora o elevado teor de álcalis exija controle granulométrico e de teor de substituição.

No que tange ao comportamento mecânico e reológico, a literatura indica que substituições de cimento por pó de vidro em teores superiores a 20% provocam redução na resistência à compressão do compósito (Elaqra; Rustom, 2018; Nahi et al., 2020). Quanto ao estado fresco, os efeitos variam em função da distribuição granulométrica e da morfologia das partículas, observando-se desde o ganho de fluidez (Nahi et al., 2020) até a alteração da consistência da mistura (Morais et al., 2022). Constata-se, portanto, a viabilidade técnica do uso do pó de vidro como adição cimentícia, desde que limitado a teores de até 20% em massa (Lopes et al., 2021).

2.5. Pó de Pedra Ornamental Como Material de Construção

O pó de pedra ornamental é um subproduto de elevada finura gerado durante o corte, serragem e polimento de blocos de rochas decorativas, predominantemente granito e mármore (Meyyappan; Carmichael, 2021; Woźniak; Chajec; Sadowski, 2022). Do ponto de vista químico, esse resíduo é constituído majoritariamente por dióxido de silício (SiO_2), óxido de alumínio (Al_2O_3), óxido de cálcio (CaO), óxido de magnésio (MgO) e óxidos de ferro e potássio, refletindo a mineralogia da rocha de origem.

Devido às suas características granulométricas, o pó de rocha ornamental atua na matriz cimentícia por meio de dois mecanismos

distintos: como fíler mineral inerte ou como material cimentício suplementar. Quando atua predominantemente como fíler, o material preenche os interstícios entre as partículas de cimento e agregados, densificando a microestrutura e fornecendo pontos de nucleação heterogênea para a precipitação dos produtos de hidratação do cimento (Woźniak; Chajec; Sadowski, 2022). Em frações com elevada finura e teores mineralógicos específicos, o pó de granito pode também apresentar reatividade pozolânica moderada (Meyyappan; Carmichael, 2021) .

Estudos experimentais indicam que a incorporação do pó de pedra ornamental em substituição parcial ao cimento Portland promove melhorias na coesão da mistura e no empacotamento do compósito (Damare, 2017; Nasr et al., 2020). Contudo, a literatura converge para o fato de que a manutenção ou o ganho de resistência mecânica é condicionado ao emprego de baixos teores de substituição, uma vez que a substituição excessiva do aglomerante por material predominantemente inerte dilui o teor de clínquer e reduz o desempenho mecânico da matriz cimentícia (Meyyappan; Carmichael, 2021; Woźniak; Chajec; Sadowski, 2022).

2.6. Influência da Substituição Mineral nas Propriedades das Argamassas

A substituição parcial do cimento Portland por adições minerais e resíduos industriais altera diretamente a cinética de hidratação, o arranjo microestrutural e o comportamento reológico e mecânico de matrizes cimentícias. O impacto dessas adições é governado pelo equilíbrio entre o efeito físico de empacotamento de partículas, a taxa de diluição do clínquer e a Reatividade Pozolânica do material

utilizado (Chindaprasirt et al., 2025; Borges et al., 2025; Sun et al., 2026).

No que tange às propriedades mecânicas, o desenvolvimento da resistência à compressão e à flexão em compósitos modificados por resíduos minerais é condicionado ao teor de substituição adotado. Incorporações em teores baixos e intermediários (entre 10% e 20%) tendem a preservar ou até mesmo elevar a resistência à compressão devido à densificação da matriz pelo efeito fíler e pela formação de C-S-H secundário (Woźniak; Chajec; Sadowski, 2022; Yeshiwas et al., 2025). Contudo, teores elevados de substituição provocam a diluição excessiva do aglomerante, resultando na perda de resistência mecânica (Ebrahimi et al., 2023; Yeshiwas et al., 2025).

A introdução de finos residuais influencia igualmente a reologia no estado fresco e a permeabilidade da matriz no estado endurecido. A elevação da finura e o formato angular de partículas minerais aumentam a área superficial específica e a retenção de água, o que reduz a trabalhabilidade da mistura e exige controle rígido da relação água/. Em contrapartida, quando o adensamento e o empacotamento granulométrico são eficientes, o preenchimento dos poros capilares promove a redução da absorção de água e melhora o desempenho da matriz frente a agentes agressivos (Woźniak; Chajec; Sadowski, 2022; Yeshiwas et al., 2025).

2.7. Economia Circular e Sustentabilidade na Cadeia Cimentícia

A implementação da economia circular na indústria da construção civil fundamenta-se no fechamento de ciclos de vida dos materiais, na redução do consumo de recursos naturais virgens e na maximização do reaproveitamento de subprodutos industriais

(Eelager et al., 2025). Esse modelo contrapõe-se ao fluxo linear tradicional de extração, fabricação e descarte, promovendo a valorização de passivos ambientais e a integração entre diferentes cadeias produtivas por meio da simbiose industrial (Ginga; Ongpeng; Daly, 2020).

No contexto dos materiais cimentícios, a valorização de resíduos como o pó de vidro e o pó de pedra ornamental proporciona benefícios ambientais diretos, com destaque para a diminuição da pressão sobre aterros industriais e a redução do consumo de matérias-primas extraídas de jazidas (Tagnit-Hamou; Soliman; Omran, 2016; Borges et al., 2025; Alyamac; Ghafari; Ince, 2017; Prakash et al., 2023). Ademais, ao substituir parcialmente o clínquer por adições de baixa pegada de carbono, reduz-se expressivamente a intensidade de emissões de CO₂ associadas à produção do aglomerante (Scrivener; John; Gartner, 2018; Ghufra et al., 2022).

A alocação desses subprodutos no ciclo de fabricação de argamassas fortalece a gestão sustentável na construção civil, estimulando a inovação tecnológica regional e a redução dos impactos ambientais de passivos gerados localmente (Eelager et al., 2025). A validação técnica do desempenho mecânico e da durabilidade de compósitos modificados por resíduos constitui, portanto, requisito indispensável para fundamentar a aplicabilidade prática e a viabilidade normativa desses materiais no mercado da construção (Ginga; Ongpeng; Daly, 2020).

3. METODOLOGIA

3.1. Delineamento Experimental

Esta pesquisa caracteriza-se como experimental, aplicada e de natureza quantitativa. O programa experimental baseou-se na avaliação do desempenho de argamassas cimentícias produzidas com substituição parcial em massa do cimento Portland por resíduo de vidro e pó de pedra ornamental. A análise fundamentou-se no confronto direto entre um traço de referência (isenção de resíduos) e seis traços modificados ao quantificar os efeitos das adições sobre a trabalhabilidade e resistência à compressão do compósito.

3.2. Materiais

3.2.1. Cimento

Foi utilizado o cimento CP V-ARI RS (marca Ciplan), cujas propriedades químicas e físicas atendem aos requisitos estabelecidos pela ABNT NBR 16697 (ABNT, 2018).

A escolha desse aglomerante fundamentou-se em critérios de controle experimental. O CP V-ARI RS caracteriza-se pelo elevado teor de clínquer e pela ausência ou mínimo percentual de adições minerais em sua composição comercial. Essa condição minimizou a interferência de matérias-primas secundárias da fabricação do cimento, permitindo isolar e atribuir com maior confiabilidade as variações no desempenho mecânico e reológico das argamassas às propriedades do resíduo de vidro e do pó de pedra ornamental incorporados.

3.2.2. Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado consistiu em areia natural de origem fluvial, proveniente de extração no Rio Jamari, no município de Candeias do Jamari, Rondônia. O material foi adquirido no comércio

local do município de Porto Velho, refletindo a tipologia de agregado miúdo predominantemente empregada na indústria da construção civil regional, o que assegura a representatividade dos resultados em relação às práticas locais de dosagem.

3.2.3. Resíduo de vidro

O resíduo de vidro empregado na pesquisa foi coletado em uma indústria de beneficiamento de vidros planos localizada em Porto Velho, responsável por mais de 70% do volume desse material comercializado para a construção civil no estado de Rondônia.

O resíduo é gerado durante as etapas mecânicas de corte e desbaste das chapas de vidro. Nessas operações, utiliza-se água como fluido de refrigeração e arraste do pó fino gerado. A suspensão aquosa é conduzida por calhas coletoras até um sistema de tanques de decantação, no qual ocorre a separação sólido-líquido. A água clarificada recircula no processo produtivo, enquanto a lama de vidro sedimentada no fundo dos tanques é extraída e armazenada em bolsas plásticas de alta resistência (big bags). Posteriormente, esse material é recolhido por uma empresa especializada em gestão de resíduos e destinado ao aterro sanitário de Porto Velho para descarte final.

3.2.4. Resíduo de Pó de Pedra Ornamental

O pó de pedra ornamental foi coletado em uma empresa de beneficiamento e acabamento de rochas localizada em Porto Velho, especializada no processamento de granitos, mármore e pedras tecnológicas (superfícies de quartzo e similares).

O resíduo é oriundo das operações de corte, lixamento e desbaste das peças. Nesses processos, a água é empregada para refrigeração do maquinário e contenção de poeira, gerando uma lama residual constituída por partículas rochosas finas em suspensão. Essa lama é direcionada a tanques de decantação, nos quais permanece retida para adensamento do material sólido. Após o processo de sedimentação, o lodo espessado é extraído e armazenado, sendo posteriormente recolhido para destinação final no aterro sanitário do município.

3.3. Método

As propriedades químicas e físicas do cimento CP V-ARI RS, do pó de vidro e do pó de pedra ornamental foram determinadas por meio de Fluorescência de Raios X (FRX) e Granulometria por Difração a Laser, permitindo mapear a composição de óxidos e a distribuição do tamanho de partículas das adições.

O agregado miúdo foi submetido à análise de composição granulométrica conforme a NBR 17054 (ABNT, 2022) e à determinação da densidade e absorção de água segundo os procedimentos da NBR 16916 (ABNT, 2021).

Para a adequação dos insumos, o pó de pedra ornamental e o resíduo de vidro foram submetidos à secagem em estufa a (100 ± 5) °C por 24 horas para eliminação da umidade livre. Na sequência, os materiais foram processados em moinho de bolas horizontal por 4 horas para cominuição e desaglomeração das partículas. Por fim, os pós moídos foram passados na peneira com abertura de malha de 0,60 mm (#30 mesh) para a retenção e descarte de eventuais aglomerados remanescentes.

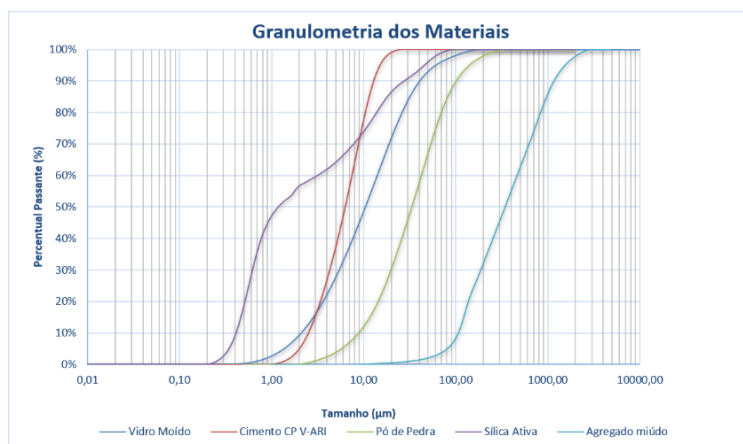
As argamassas foram dosadas no traço unitário 1:3 (aglomerante: agregado miúdo, em massa), fixando-se a relação água/cimento em 0,50. A substituição parcial do cimento pelos resíduos ocorreu nos teores de 10%, 15% e 20% em massa. A mistura dos materiais foi realizada em misturador mecânico planetário com capacidade de 5 litros.

Após o processamento, determinou-se a consistência do compósito no estado fresco por meio do ensaio de espalhamento em mesa de consistência, conforme a NBR 13276 (ABNT, 2016). Na sequência, foram moldados corpos de prova cilíndricos de 5 cm × 10 cm. Após 24 horas de desforma, as amostras foram submetidas à cura submersa contínua até as idades de ensaio. O desempenho mecânico foi determinado por meio da resistência à compressão axial aos 7 e 28 dias, conforme a NBR 7215 (ABNT, 2019).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES OU ANÁLISE DOS DADOS

A Figura 1 apresenta as curvas de distribuição granulométrica dos materiais constituintes.

Figura 1. Granulometria dos materiais empregados nas argamassas



Observa-se que a sílica ativa apresenta a maior finura entre os insumos e atua no preenchimento de vazios micrométricos e

favorece o empacotamento de partículas. O cimento CP V-ARI RS e o resíduo de vidro moído exibem curvas de distribuição granulométrica sobrepostas na faixa inferior dos finos, o que indica diâmetros equivalentes e potencial tendência à sobreposição de frações granulométricas. Essa fração mais fina e densa, conforme relatam Jiang et al. (2022), podem resultar em uma propriedade inerte durante a reação de hidratação. Ainda segundo os autores as partículas de vidro contêm superfícies mais lisas, bordas prismáticas mais nítidas e estrutura mais densa.

Por sua vez, o pó de pedra ornamental apresenta uma distribuição granulométrica mais grosseira em comparação aos demais materiais pulverulentos, atuando como um elemento de transição dimensional entre a fração ligante e o agregado. Em relação ao agregado miúdo (areia), constata-se um afastamento significativo entre a sua curva granulométrica e a dos materiais finos. Essa descontinuidade granulométrica (*gap-grading*) evidencia um hiato na faixa micrométrica intermediária, condição que exige a otimização do teor de finos para assegurar o preenchimento intersticial e minimizar o índice de vazios da matriz endurecida. Por outro lado, Li et al. (2019) demonstram em seu trabalho que esse material pode ocupar uma faixa granulométrica intermediária entre o cimento e o agregado e pode contribuir para a modificação do empacotamento das partículas. Nessa condição, o resíduo não atua exclusivamente como um fíler convencional, mas também pode desempenhar função semelhante à de um microagregado.

A areia utilizada apresentou distribuição granulométrica característica de uma areia lavada média, enquadrada nos limites granulométricos estabelecidos pela ABNT NBR 7211:2022 para

utilização como agregado miúdo. A massa específica determinada foi de 2,67 g/cm³.

Tabela 1. Composição química dos materiais constituintes obtida por Fluorescência de Raios X (FRX).

Material	Composição Química (%)				
	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO
Cimento CP V-ARI	4,44	17,56	3,05	62,75	3,87
Pó de Pedra	10,64	54,95	9,51	14,62	1,25
Resíduo de Vidro	1,00	74,07	0,66	13,27	1,93

⚠ Esta tabela possui muitas colunas e foi cortada para impressão. Para visualizá-la completa, acesse o artigo original em:

<https://revistatopicos.com.br/artigos/argamassas-sustentaveis-avaliacao-do-desempenho-mecanico-com-substituicao-parcial-do-cimento-portland-por-residuo-de-vidro-e-po-de-pedra-ornamental?noblockage>

No quadro 1 é apresentado a composição química dos materiais pulverulentos da pesquisa. A composição química dos materiais evidencia diferenças entre o cimento e os resíduos utilizados. O cimento CP V-ARI apresenta predominância de CaO (62,75%), seguido de SiO₂ (17,56%), composição associada à presença das fases responsáveis pelas reações de hidratação do cimento. O pó de pedra apresenta maior concentração de SiO₂ (54,95%), além de Al₂O₃ (10,64%), Fe₂O₃ (9,51%) e CaO (14,62%). A soma dos teores de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ corresponde a 75,10%, caracterizando o resíduo como um material de composição predominantemente silico-aluminosa.

Entretanto, a presença desses óxidos não determina, isoladamente, atividade pozolânica, pois sua reatividade também depende da estrutura mineralógica e do grau de cristalinidade das fases presentes.

O resíduo de vidro apresenta SiO_2 como principal constituinte (74,07%), seguido de CaO (13,27%) e Na_2O (7,94%). A soma de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 corresponde a 75,73%. A elevada concentração de sílica, associada à estrutura amorfa característica dos materiais vítreos, indica potencial para atividade pozolânica quando o material apresenta granulometria adequada. Destaca-se também o teor de Na_2O (7,94%), relacionado à composição de vidros do tipo soda-cal-sílica. Dessa forma, embora o pó de pedra e o resíduo de vidro apresentem valores próximos para a soma dos principais óxidos silico-aluminosos, a forma mineralógica em que esses constituintes se encontram pode resultar em diferentes níveis de reatividade na matriz cimentícia.

A Tabela 2 apresenta os resultados de espalhamento médio e de resistência à compressão aos 7 e 28 dias dos traços desenvolvidos no planejamento experimental. Observa-se que o traço de referência apresentou resistência à compressão de 24,47 MPa aos 7 dias e 28,17 MPa aos 28 dias. Entre os traços modificados, verificaram-se diferentes comportamentos em função do tipo e do teor de resíduo incorporado, tanto para a resistência mecânica quanto para o espalhamento médio.

Tabela 2. Resultados do espalhamento e da resistência à compressão aos 7 e 28 dias de cura das argamassas com substituição parcial do cimento por resíduo de vidro e pó de pedra ornamental.

Traço	Resistência aos 7 dias (MPa)	Resistência aos 28 dias (MPa)	Espalhamento médio (cm)
Ref	24,47 ± 2,35	28,17 ± 3,74	15,35
V10	22,44 ± 1,42	27,39 ± 1,19	14,58
V15	20,21 ± 2,43	27,60 ± 1,85	13,35
V20	18,15 ± 2,91	21,09 ± 4,04	12,40
P10	16,53 ± 2,44	27,11 ± 4,46	15,60
P15	20,46 ± 2,21	20,63 ± 4,35	16,35
P20	20,03 ± 3,64	25,94 ± 0,33	17,10

A substituição do cimento pelo resíduo de vidro promoveu redução progressiva da resistência aos 7 dias, de 24,47 MPa no traço de referência para 22,44, 20,21 e 18,15 MPa nos teores de 10%, 15% e 20%, respectivamente. Esse comportamento pode estar associado à menor participação do cimento na hidratação inicial, apesar do elevado teor de SiO₂ do vidro (74,07%). A granulometria fina e a estrutura amorfa favorecem a atividade pozolânica, porém seus efeitos tendem a apresentar maior contribuição em idades posteriores (Lopes et al., 2021; Nahi et al., 2020).

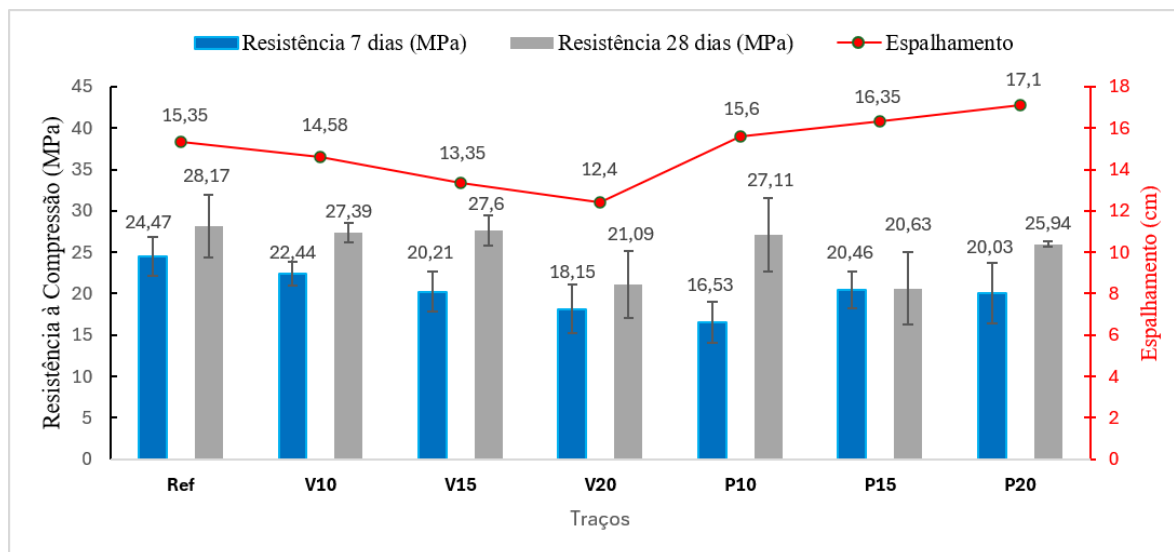
Aos 28 dias, os traços V10 e V15 apresentaram resistências de 27,39 e 27,60 MPa, próximas à referência de 28,17 MPa, enquanto V20 apresentou redução para 21,09 MPa. Esse resultado indica que, nos teores de 10% e 15%, o efeito de preenchimento associado à granulometria do vidro e a possível reação pozolânica compensaram parcialmente a redução do cimento. Em 20%, a maior diluição do aglomerante parece ter superado esses efeitos, comportamento também observado na literatura para maiores teores de pó de vidro (Lopes et al., 2021; Nahi et al., 2020).

Para os traços com pó de pedra, a resistência aos 7 dias apresentou comportamento distinto: P10 registrou 16,53 MPa, P15 alcançou 20,46 MPa e P20 apresentou 20,03 MPa. A menor resistência inicial de P10 pode decorrer da substituição de parte do cimento por um material cuja ação predominante está relacionada ao efeito fíler e ao empacotamento das partículas. Embora o pó apresente 54,95% de SiO_2 , 10,64% de Al_2O_3 e 9,51% de Fe_2O_3 , essa composição não assegura, isoladamente, elevada reatividade pozolânica (Campos et al., 2019; Woźniak; Chajec; Sadowski, 2022).

Aos 28 dias, P10 atingiu 27,11 MPa, valor próximo ao traço de referência, enquanto P15 apresentou 20,63 MPa e P20 alcançou 25,94 MPa. A ausência de relação linear entre o teor de pó e a resistência sugere influência da distribuição granulométrica e do empacotamento das partículas. O maior espalhamento de P20 (17,10 cm) também coincide com o melhor desempenho mecânico entre os traços com maior teor de pó, embora a literatura indique que o comportamento depende do equilíbrio entre finura, empacotamento e quantidade efetiva de cimento (Campos et al., 2019; Woźniak; Chajec; Sadowski, 2022).

A Figura 2 apresenta a evolução da resistência à compressão dos traços avaliados aos 7 e 28 dias, juntamente com os respectivos valores de espalhamento médio. Observa-se comportamento distinto entre os resíduos incorporados: os traços com pó de pedra (P) apresentaram valores de espalhamento superiores ao traço de referência, enquanto os traços com resíduo de vidro (V) apresentaram redução do espalhamento com o aumento do teor de substituição.

Figura 2. Gráfico de resistência à compressão aos 7 e 28 dias e espalhamento médio das argamassas com substituição parcial do cimento por resíduo de vidro e pó de pedra ornamental.



A evolução da resistência entre 7 e 28 dias evidencia comportamentos distintos entre os traços. Nos traços com resíduo de vidro, V10 e V15 apresentaram valores aos 28 dias próximos à referência, enquanto V20 registrou redução mais acentuada. Esse comportamento é compatível com estudos que relacionam o teor de substituição do cimento ao desenvolvimento da resistência, com possíveis contribuições da reação pozolânica do vidro em idades posteriores (Lopes et al., 2021; Nahi et al., 2020).

Nos traços com pó de pedra, P10 apresentou aumento expressivo da resistência entre 7 e 28 dias, passando de 16,53 para 27,11 MPa, enquanto P15 praticamente manteve o valor obtido aos 7 dias. P20 apresentou comportamento intermediário, com aumento de 20,03 para 25,94 MPa. A variabilidade observada pode estar relacionada à influência do teor de substituição e do empacotamento das partículas, fatores que condicionam a formação e a densificação da matriz cimentícia (Woźniak; Chajec; Sadowski, 2022).

A relação entre resistência e espalhamento também evidencia comportamentos distintos entre os resíduos. Nos traços com vidro, o aumento do teor de substituição reduziu progressivamente o espalhamento, enquanto nos traços com pó de pedra ocorreu aumento dessa propriedade. Entretanto, essa variação não acompanhou diretamente a resistência aos 28 dias, pois P20 apresentou o maior espalhamento (17,10 cm), mas resistência inferior à referência. Esse comportamento confirma que a trabalhabilidade isoladamente não determina o desempenho mecânico das argamassas (Nahi et al., 2020; (Woźniak; Chajec; Sadowski, 2022).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo avaliou as propriedades de argamassas cimentícias com substituição parcial do cimento Portland por resíduo de vidro e pó de pedra ornamental, nos teores de 10%, 15% e 20%. Para isso, foram caracterizados os materiais quanto à granulometria e composição química, produzidos os diferentes traços e avaliadas a consistência no estado fresco e a resistência à compressão axial aos 7 e 28 dias.

A caracterização dos insumos evidenciou diferenças granulométricas e químicas entre os materiais. O resíduo de vidro apresentou elevada concentração de SiO_2 e granulometria próxima à do cimento, enquanto o pó de pedra apresentou distribuição mais grosseira e composição predominantemente silico-aluminosa. Essas características indicam mecanismos distintos de atuação na matriz, associados ao preenchimento dos vazios, ao empacotamento das partículas e ao potencial de reatividade.

Quanto à resistência à compressão, os traços com resíduo de vidro apresentaram redução progressiva aos 7 dias com o aumento do

teor de substituição. Aos 28 dias, V10 e V15 mantiveram valores próximos ao traço de referência, enquanto V20 apresentou redução mais expressiva. Esse comportamento indica que os efeitos associados à granulometria e à possível contribuição pozolânica foram mais favoráveis nos teores intermediários, enquanto a maior substituição intensificou a diluição do cimento.

Os traços com pó de pedra apresentaram comportamento menos linear. P10 alcançou resistência próxima à referência aos 28 dias, P15 apresentou o menor valor e P20 recuperou parte do desempenho mecânico. Esse resultado evidencia a influência conjunta da granulometria, do empacotamento e da composição dos materiais. O aumento do espalhamento nos traços com pó de pedra, especialmente em P20, também demonstra que a maior fluidez não resultou diretamente em maior resistência.

Os resultados demonstram, portanto, que o desempenho das argamassas não depende exclusivamente da composição química dos resíduos ou do teor de substituição, mas da interação entre composição, granulometria, empacotamento e comportamento no estado fresco. O resíduo de vidro apresentou maior estabilidade do desempenho mecânico nos teores de 10% e 15%, enquanto o pó de pedra apresentou maior variabilidade entre os teores avaliados.

Para estudos futuros, recomenda-se aprofundar a investigação dos mecanismos responsáveis pelas diferenças observadas entre os resíduos, com ênfase na caracterização mineralógica e na avaliação da atividade pozolânica. Também são pertinentes estudos com diferentes distribuições granulométricas e teores de substituição, além da avaliação de outras propriedades das argamassas, de modo

a ampliar a compreensão do comportamento desses resíduos como materiais cimentícios.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMAD, Jawad; ZHOU, Zhiguang. Development of high strength self compacting concrete with waste glass and waste marble. **Construction and Building Materials**, v. 408, 8 dez. 2023.

ALYAMAC, Kursat Esat; GHAFARI, Ehsan; INCE, Ragip. Development of eco-efficient self-compacting concrete with waste marble powder using the response surface method. **Journal of Cleaner Production**, v. 144, p. 192–202, 15 fev. 2017.

AMIN, Mohamed *et al.* Effect of industrial wastes on the properties of sustainable ultra-high-performance concrete: Granite, ceramic, and glass. **Construction and Building Materials**, v. 428, 17 maio 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697: Cimento Portland - requisitos**. Rio de Janeiro, p. 16, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16916: Agregado miúdo — Determinação da densidade e da absorção de água**. Rio de Janeiro, p. 7, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Determinação do índice de consistência**. Rio de Janeiro, p. 2, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR13281-1: Argamassas inorgânicas — Requisitos e métodos de ensaios**

Parte 1: Argamassas para revestimento de paredes e tetos. Rio de Janeiro, p. 20, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR17054 - Agregados — Determinação da composição granulométrica — Método de ensaio.** Rio de Janeiro, p. 5, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR7215: Cimento Portland — Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, p. 13, 2025.

BORGES, Alexandre Lopes *et al.* Filler effect and pozzolanic effect of glass powder in mortar. **Ambiente Construído**, v. 25, 2025.

CAMPOS, H. F. *et al.* Determination of the optimal replacement content of Portland cement by stone powder using particle packing methods and analysis of the influence of the excess water on the consistency of pastes. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 12, n. 2, p. 210–232, abr. 2019.

CÂNDIDO, Renan Alves; FELIX, Emerson Felipe. Estimativa das emissões de CO₂ associadas à produção do concreto via técnicas de aprendizado de máquina. *In*: 25 out. 2023. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/enarc/article/view/3721>

CARASEK, Helena. Argamassas. *In*: ISAIA, Geraldo Cechella (Org.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 3. ed. São Paulo: Ibracon, 2017. v. 2 p. 922–969.

CHINDAPRASIRT, Prinya *et al.* Enhancing the performance of mortar with two pozzolanic materials: Silica fume and basalt powder.

Cleaner Waste Systems, v. 11, p. 100319, 1 jun. 2025.

DAMARE, Prof Alok. **UTILIZATION OF GRANITE POWDER IN CEMENT MORTAR**NOVATEUR PUBLICATIONS International Journal of Research Publications in Engineering and Technology. [S.l.: S.n.].

EBRAHIMI, Mohsen *et al.* Effect of ceramic waste powder as a binder replacement on the properties of cement- and lime-based mortars. **Construction and Building Materials**, v. 379, 23 maio 2023.

EELAGER, Manjunath P. *et al.* **Pathways to a sustainable future: Exploring the synergy between sustainability and circular economy. Sustainable Futures**Elsevier Ltd, , 1 dez. 2025.

ELAQRA, Hossam; RUSTOM, Rifat. Effect of using glass powder as cement replacement on rheological and mechanical properties of cement paste. **Construction and Building Materials**, v. 179, p. 326–335, 10 ago. 2018.

FUNAHASHI JÚNIOR, Eduardo Issamu *et al.* Influence of metakaolin on temperature rise and delay ettringite formation in cement composites. **Revista Materia**, v. 27, n. 2, 2022.

GALDINO, Gefferson Elton Caldas *et al.* A UTILIZAÇÃO DE AGREGADOS ALTERNATIVOS: RCD E PÓ DE PEDRA NO CONCRETO / ALTERNATIVE AGGREGATES: RCD AND STONE POWDER NO CONCRETE. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 9, p. 69378–69386, 2020.

GHUFRAN, Maria *et al.* Circular Economy in the Construction Industry: A Step towards Sustainable Development. **Buildings**, v. 12,

n. 7, p. 1004, 13 jul. 2022.

GINGA, Clarence P.; ONGPENG, Jason Maximino C.; DALY, Ma Klarissa M. **Circular economy on construction and demolition waste: A literature review on material recovery and production.** **Materials**MDPI AG, , 1 jul. 2020.

JIANG, Xi *et al.* Influence of waste glass powder as a supplementary cementitious material (SCM) on physical and mechanical properties of cement paste under high temperatures. **Journal of Cleaner Production**, v. 340, p. 130778, 15 mar. 2022.

LI, L. G. *et al.* Filler technology of adding granite dust to reduce cement content and increase strength of mortar. **Powder Technology**, v. 342, p. 388–396, 15 jan. 2019.

LI, Qiong *et al.* Performance of waste glass powder as a pozzolanic material in blended cement mortar. **Construction and Building Materials**, v. 324, p. 126531, 21 mar. 2022.

LOPES, Raduan Krause *et al.* Partial replacement of Portland cement with industrial glass waste in mortars. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 14, n. 2, 2021.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concrete: microstructure, properties, and materials.** 3. ed. New York: McGraw-Hill, 2008.

MEYYAPPAN, PL.; CARMICHAEL, M. Jemimah. An Effective Replacement of Granite and Marble Powder on Cement Mortar Subjected to Chloride Ion Penetration Test. *In: [S.l.: S.n.]*. p. 533–541.

MORAIS, Agnelo *et al.* Argamassa cimentícia: Uso sustentável de pó fino de vidro reciclado como precursor parcial. **Cerâmica Industrial**, v. 27, n. 1, p. 1–11, 2022.

MOREIRA, Christian; REGO, João Henrique Da Silva. Effect of gypsum content on the compressive strength of LC3 cement. **Revista Materia**, v. 25, n. 1, 2020.

NAHI, Samir *et al.* Properties of cement pastes and mortars containing recycled green glass powder. **Construction and Building Materials**, v. 262, p. 120875, 30 nov. 2020.

NASR, Mohammed Salah *et al.* Properties of eco-friendly cement mortar contained recycled materials from different sources. **Journal of Building Engineering**, v. 31, 1 set. 2020.

NEGA, Daniel Mulat *et al.* Impact of Partial Replacement of Cement with a Blend of Marble and Granite Waste Powder on Mortar. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 13, n. 15, 1 ago. 2023.

Paiva, Otávio Augusto. **Resíduo Industrial de vidro moído em argamassa de cimento Portland**. 2009. 208 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2009.

PRAKASH, Bhaskar *et al.* **Exploring the potential of waste marble powder as a sustainable substitute to cement in cement-based composites: A review. Construction and Building Materials** Elsevier Ltd, , 19 out. 2023.

SCRIVENER, Karen L.; JOHN, Vanderley M.; GARTNER, Ellis M. Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-

CO₂ cement-based materials industry. **Cement and Concrete Research**, v. 114, p. 2–26, 1 dez. 2018.

SILVA, C. et al. Avaliação de propriedades no estado fresco e endurecido de argamassas de revestimento cimentícias produzidas com aditivos químicos plastificantes. In: **XXII CBECiMat-Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. Natal**. 2016. p. 761-773.

SIQUEIRA, Andréia Arenari de; TOLEDO FILHO, Romildo Dias; CORDEIRO, Guilherme Chagas. Sulfuric acid attack of mortars containing blended cements with sugarcane bagasse ash and limestone filler. **Ambiente Construído**, v. 25, 2025.

SUN, Yuzhou *et al.* Effects of ultrafine glass powder on the reliability analysis and life prediction of cement mortar under multi-concentration sulfate attack. **Case Studies in Construction Materials**, v. 24, p. e05973, 1 jul. 2026.

TAGNIT-HAMOU, Arezki; SOLIMAN, Nancy; OMRAN, Ahmed. Green Ultra-High Performance Glass Concrete. v. 3, n. 1, p. 1–10, 2016.

TAYLOR, H. F. W. **Cement chemistry**. 2nd. ed. London: T. Telford, 1998.

WOŹNIAK, Zuzanna Zofia; CHAJEC, Adrian; SADOWSKI, Łukasz. Effect of the Partial Replacement of Cement with Waste Granite Powder on the Properties of Fresh and Hardened Mortars for Masonry Applications. **Materials**, v. 15, n. 24, 1 dez. 2022.

YESHIWAS, Mezgebu Debas *et al.* Rice Husk Ash and Waste Marble Powder as Alternative Materials for Cement. **Infrastructures**, v. 10, n.

¹ Discente do Curso Superior de engenharia civil do AFYA Centro Universitário São Lucas – Porto Velho/RO. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

² Discente do Curso Superior de engenharia civil do AFYA Centro Universitário São Lucas – Porto Velho/RO. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

³ Professora doutora do Curso Superior de engenharia civil do AFYA Centro Universitário São Lucas – Porto Velho/RO. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

⁴ Professor especialista do Curso Superior de engenharia civil Universidade Federal de Rondônia – Porto Velho/RO. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

⁵ Professora doutora do Curso Superior de engenharia civil Universidade Federal de Rondônia – Porto Velho/RO. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

⁶ Professora mestre do Curso Superior de engenharia civil Universidade Federal de Rondônia – Porto Velho/RO. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

⁷ Professor doutor do Curso Superior de engenharia civil Universidade Federal de Rondônia – Porto Velho/RO. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

⁸ Professor doutor do Curso Superior de engenharia civil
Universidade Federal de Rondônia – Porto Velho/RO. E-mail: [acesse o
artigo original para visualizar o e-mail](#)