AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE ARGAMASSAS COM SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DE AGREGADO MIÚDO POR VIDRO RECICLADO

PERFORMANCE EVALUATION OF MORTARS WITH PARTIAL REPLACEMENT OF FINE AGGREGATE BY RECYCLED GLASS

Daniel Cutlac da Rocha, Paulo Eduardo de Oliveira Andrade, Pedro Henrique Simões Andrade

Universidade Santa Cecília, Faculdade de Engenharia, Curso de Engenharia Civil
E-mail para contato: danielcutlacr@gmail.com

RESUMO – Este trabalho analisa a substituição parcial do agregado miúdo por vidro moído em argamassas, sob aspectos técnicos e ambientais. Sessenta corpos de prova cilíndricos foram moldados em quatro traços: referência (0%), 15%, 20% e 25% de substituição em massa. Realizaram-se ensaios de resistência à compressão, absorção de água e análise dos modos de ruptura. O vidro residual foi coletado, moído, peneirado, caracterizado e incorporado às misturas (traço 1:3). Os resultados, tratados pelo teste de Grubbs, mostraram que até 20% de substituição a resistência manteve-se próxima ao traço de referência, com 10% menor absorção de água. Conclui-se que o vidro moído é alternativa viável e sustentável na construção civil.

Palavras-chave: Vidro reciclado; argamassa; sustentabilidade; resistência a compressão; absorção de água.

ABSTRACT – This study analyzes the partial replacement of fine aggregate by ground glass in mortars, considering technical and environmental aspects. Sixty cylindrical specimens were molded in four mixes: reference (0%), 15%, 20% and 25% replacement by mass. Tests included compressive strength, water absorption and failure modes. The residual glass was collected, ground, sieved, characterized, and incorporated into 1:3 mixes (cement:aggregate). Results, treated with Grubbs' test, showed that up to 20% replacement compressive strength remained close to the reference, with 10% lower absorption. It is concluded that ground glass is a viable and sustainable alternative for civil construction.

Keywords: recycled glass; mortar; sustainability; compressive strength; water absorption.

1 INTRODUÇÃO

A construção civil é essencial para o desenvolvimento urbano, mas também é um dos setores que mais impactam o meio ambiente, principalmente devido à geração de resíduos, ao elevado consumo de energia, ao desperdício de água, à poluição e ao uso intensivo de matérias-primas naturais. No Brasil, estima-se que uma obra possa gerar cerca de 120 quilos de entulho por metro quadrado, correspondendo de 51% a 70% dos resíduos sólidos urbanos provenientes da construção (dados de resíduos de construção e demolição – RCD). Esse cenário evidencia a necessidade de adotar práticas mais sustentáveis para o aproveitamento desses resíduos.

Dentre as possibilidades de reaproveitamento, destaca-se o vidro, material amplamente utilizado em embalagens, vidros planos e diversos outros setores. Seu descarte inadequado gera sérios problemas ambientais, devido à lenta degradação natural. No entanto, o vidro apresenta elevado potencial de reciclagem e pode ser reincorporado em diferentes cadeias produtivas, inclusive na construção civil. Suas características, como disponibilidade abundante, composição rica em sílica, baixa porosidade, elevada dureza e estabilidade química, tornam-no um resíduo promissor para utilização em argamassas e concretos.

O uso de vidro moído como substituto parcial do agregado miúdo tem sido estudado como uma alternativa sustentável e viável (DU; TAN, 2014). Além do vidro, materiais como cinza volante, escória de alto-forno e resíduos de cerâmica vermelha também têm sido amplamente investigados como substitutos parciais do cimento ou do agregado miúdo, apresentando potencial para melhorar o desempenho mecânico e a durabilidade das argamassas, ao mesmo tempo em que promovem práticas mais sustentáveis no setor da construção.

Entre essas práticas, destacam-se o reaproveitamento de água, a utilização de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição, a incorporação de fibras naturais e a substituição parcial do clínquer por adições minerais, iniciativas que contribuem para reduzir o consumo de recursos naturais e as emissões de gases de efeito estufa.

Além da contribuição ambiental, partículas finamente moídas de vidro podem atuar como material pozolânico, reagindo com o hidróxido de cálcio e formando produtos adicionais de hidratação, como o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), responsável pelo ganho de resistência mecânica (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Todavia, existe também a preocupação com a reação álcali-sílica (RAS), fenômeno deletério que pode causar expansão e fissuração em concretos e

argamassas (NEVILLE, 2016). Dessa forma, compreender o comportamento mecânico da argamassa com substituição parcial por vidro é essencial para avaliar sua viabilidade prática e seu potencial como solução sustentável para o setor.

O objetivo deste trabalho é avaliar a viabilidade técnica da utilização de vidro moído, figura 1, como substituto parcial do agregado miúdo em argamassas, a partir da análise dos resultados obtidos em ensaios de resistência à compressão e absorção de água.

Figura 1: Vidro moído peneirado.



2 MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais e equipamentos utilizados foram Cimento Portland CP II-F 32, areia lavada, água potável, balança de precisão, misturador mecânico de argamassas, conjunto de peneiras 4,75mm, 2,36mm, 1,18mm, 0,59mm, 0,30mm e 0,15mm, pilão, almofariz, prensa hidráulica, estufa de secagem, tanque de cura e moldes cilíndricos metálicos (5 x 10cm).

O vidro reciclado utilizado neste estudo foi obtido a partir de resíduos urbanos de descarte comum, coletados em ruas, higienizados e moídos manualmente em pilão e almofariz. Posteriormente, o material foi peneirado em peneiras normalizadas, de 4,75 mm até 0,15 mm, conforme a ABNT NBR NM 248:2003, para obtenção da fração granulométrica adequada.

Foram definidos quatro traços: referência (0% vidro) e substituições de 15%, 20% e 25% em massa do agregado miúdo por vidro. Todos os traços seguiram a proporção 1:3 (cimento: agregado).

O procedimento de moldagem foi dado desta forma:

a) Pesagem precisa dos materiais;

b) Mistura seca (cimento + areia + vidro) no misturador por 1 minuto;

c) Adição integral da água de amassamento;

d) Mistura da argamassa úmida por mais 1 minuto;

e) Moldagem imediata, sem repouso.

Cada traço teve 4 corpos de prova por idade, totalizando 48 para ensaios de compressão. Adicionalmente, foram moldados 12 corpos de prova para o ensaio de absorção de água, perfazendo 60 unidades no total.

O ensaio de compressão foi realizado conforme a ABNT NBR 7215:2019. Em cada idade, os corpos de prova foram retirados da cura, ilustrado na figura 3, secos superficialmente e posicionados na prensa hidráulica. A resistência foi obtida pela razão entre a carga máxima suportada e a área da seção transversal do corpo de prova.

Figura 2: Corpos de prova em tanque para cura submersa.



Além da resistência, foram observados os modos de ruptura, em consonância com estudos como o de Silva et al. (2019), que destacam a influência da forma de fratura na avaliação do desempenho mecânico de materiais cimentícios.

O ensaio de absorção foi conduzido conforme a ABNT NBR 9778:2009. Os corpos de prova foram secos em estufa a 100 °C por 24 h e pesados (massa seca, Mseco). Em seguida, foram imersos em água potável por 24 h, novamente pesados (massa saturada, Msat) e calculada a absorção percentual pela equação 1, conforme mostrado abaixo:

$$Absorção\ (\%) = \frac{Msat - Mseco}{Mseco} \times 100 \quad (1)$$

Os resultados de resistência foram inicialmente tratados por média ($\bar{x}$), desvio padrão (σ) e coeficiente de variação (CV). Para identificação de valores discrepantes, aplicou-se o Teste de Grubbs com nível de significância de 5% (α=0,05), sendo G o estatístico de Grubbs, xi o valor suspeito de ser outlier, que deverá ser desconsiderado, $\bar{x}$ a média da amostra, conforme indica a equação 2:

$$G = \frac{|xi - \bar{x}|}{\sigma} \quad (2)$$

Para amostras de 4 unidades, adotou-se Gcrit=1,42, valor selecionado da tebela de testes de Grubbs. Valores de G > Gcrit foram considerados outliers e removidos da análise.

Valores removidos pelo teste:

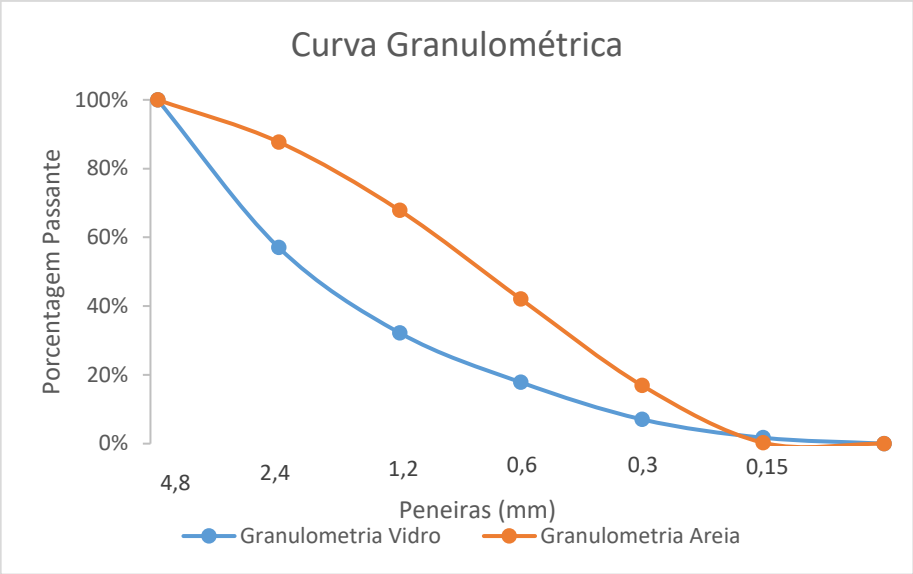
- 7 dias – Referência: 17,42 MPa
- 7 dias – 25%: 24,40 MPa

Essa exclusão permitiu calcular médias mais representativas e consistentes para a comparação entre os traços.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A caracterização granulométrica do vidro indicou maior proporção de finos em comparação à areia natural, confirmando observações de Costa, Nascimento e Oliveira (2019). A curva granulométrica mostrou enquadramento parcial como agregado miúdo, conforme ilustra curva granulométrica, indicada pela figura 4.

Figura 3: Gráfico comparativo da granulometria da areia e vidro.



O traço adotado neste trabalho, 1:3 (cimento: agregado miúdo), é comumente utilizado em argamassas estruturais e de assentamento, pois proporciona uma boa trabalhabilidade, resistência adequada e facilidade de moldagem dos corpos de prova cilíndricos. Essa proporção permite avaliar de forma equilibrada a influência de materiais alternativos, como o vidro moído, sem comprometer a integridade da matriz cimentícia.

Inicialmente, todos os valores de resistência foram tabulados por traço e idade. Em seguida, aplicou-se o Teste de Grubbs separadamente para cada conjunto (referência, 15%, 20% e 25%), em cada tempo de cura (7, 14 e 28 dias), removendo os valores discrepantes. Esse procedimento é comum em estudos experimentais, evitando que erros de moldagem, falhas de ensaio ou características pontuais do material distorçam a análise (MONTGOMERY; RUNGER, 2012).

Após a exclusão dos *outliers*, verificou-se que, em linhas gerais, a substituição de 15% e 20% apresentaram resultados de resistência próximos ao traço de referência, principalmente em idades mais avançadas. Já o teor de 25% apresentou comportamento mais irregular, sugerindo que há um limite de substituição a partir do qual o excesso de vidro compromete a matriz do concreto (SHAO; LEHMANN; MORAS, 2000).

O teste de granulometria indicou diferenças significativas entre os dois materiais. A areia apresentou uma distribuição de partículas mais contínua e uniforme ao longo das peneiras,

com predominância nas frações médias e finas, o que favorece a boa acomodação dos grãos e a redução dos vazios, conforme indica a tabela 1.

Tabela 1. Granulometria da areia para 100g de amostra.

Peneira (mm)	Massa Retida (g)	% Retida	% Acum. Retida	% Passante
4,8	0	0	0	100,00%
2,4	12,27	12,27%	12,27%	87,73%
1,2	19,91	19,91%	32,18%	67,82%
0,6	25,78	25,78%	57,96%	42,04%
0,3	25,11	25,11%	83,07%	16,93%
0,15	16,65	16,65%	99,72%	0,28%
0,075	0,28	0,28%	100,00%	0,00%

Já o vidro moído, por ser obtido por meio de um processo de trituração mecânica, apresentou partículas com geometria mais irregular e uma distribuição granulométrica menos homogênea, evidenciando-se a concentração de partículas em faixas específicas de abertura de peneira, conforme ilustrado na Tabela 2, o que pode influenciar diretamente as propriedades físico-mecânicas das argamassas produzidas.

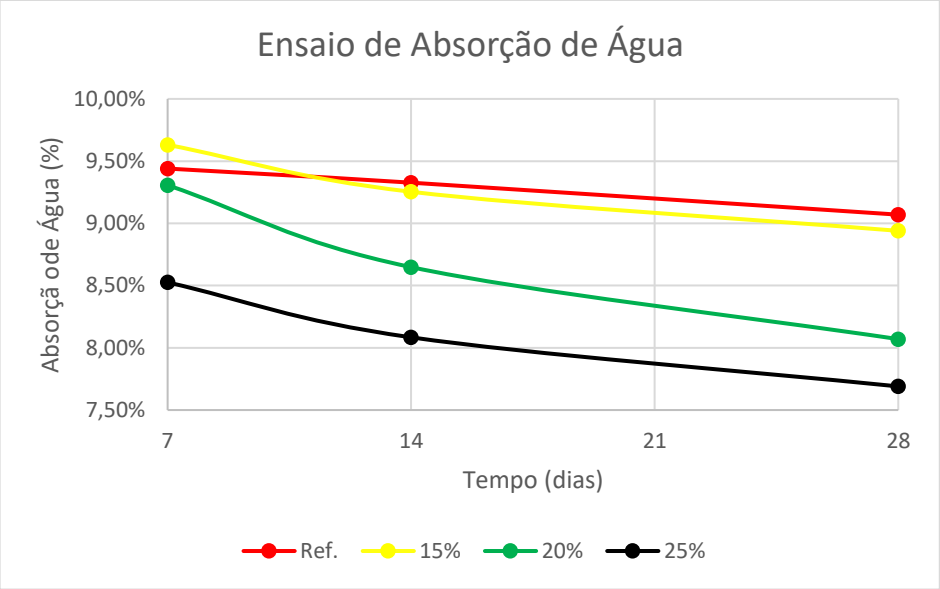
Tabela 2. Granulometria do vidro para 100g de amostra.

Peneira (mm)	Massa Retida (g)	% Retida	% Acum. Retida	% Passante
4,8	0	0	0	100,00%
2,4	42,95	42,95%	42,95%	57,05%
1,2	24,85	24,85%	67,80%	32,20%
0,6	14,37	14,37%	82,17%	17,83%
0,3	10,77	10,77%	92,94%	7,06%
0,15	5,34	5,34%	98,28%	1,72%
0,075	1,72	1,72%	100,00%	0,00%

Os percentuais de substituição de 15%, 20% e 25% do agregado miúdo por vidro foram definidos com base em estudos que indicam redução da resistência mecânica acima de 25% devido ao excesso de finos e à menor adesão da matriz (SHAO; LEHMANN; MORAS, 2000; DU; TAN, 2014). Esses teores permitem avaliar o efeito incremental do vidro, identificar limites seguros e analisar ganhos ambientais com a reutilização de resíduos urbanos. Não houve

dificuldade de homogeneização. A moldagem dos corpos de prova cilíndricos (5 × 10 cm) seguiu a ABNT NBR 7215:2019, em quatro camadas de 20 golpes, sendo desmoldados após 24 h e curados em água potável até 7, 14 e 28 dias. Posteriormente, realizaram-se ensaios de compressão e absorção de água para avaliar o desempenho das argamassas.

Figura 4: Gráfico de porcentagem de absorção.



Os resultados obtidos estão organizados de forma a permitir a comparação direta entre as misturas de referência e aquelas que receberam substituições parciais por vidro. Essa análise possibilita observar as variações de desempenho em relação à resistência à compressão e à absorção de água, bem como relacionar os efeitos da alteração granulométrica ocasionada pelo uso do vidro reciclado, conforme apresentado na tabela 3. Valores destacados em amarelo representam os *outliers*, sendo eliminados pelo teste de Grubbs.

Tabela 3. Valores do ensaio de compressão.

Nº	Idade (dias)	Ref. (MPa)	15% (MPa)	20% (MPa)	25% (MPa)
CP01	28	26,13	28,67	29,13	29,64
CP02	28	26,99	27,30	25,57	25,97
CP03	28	30,91	29,44	27,71	27,20
CP04	28	30,61	28,27	25,26	25,62
CP06	14	23,63	25,97	28,47	24,60
CP07	14	25,36	21,75	25,62	27,45
CP08	14	20,68	21,54	23,58	25,72
CP09	14	27,65	23,17	22,82	21,85
CP11	7	21,34	19,56	21,65	17,52
CP12	7	17,42	19,10	18,95	17,57
CP13	7	22,77	18,18	18,74	24,40
CP14	7	23,58	18,84	19,20	16,45

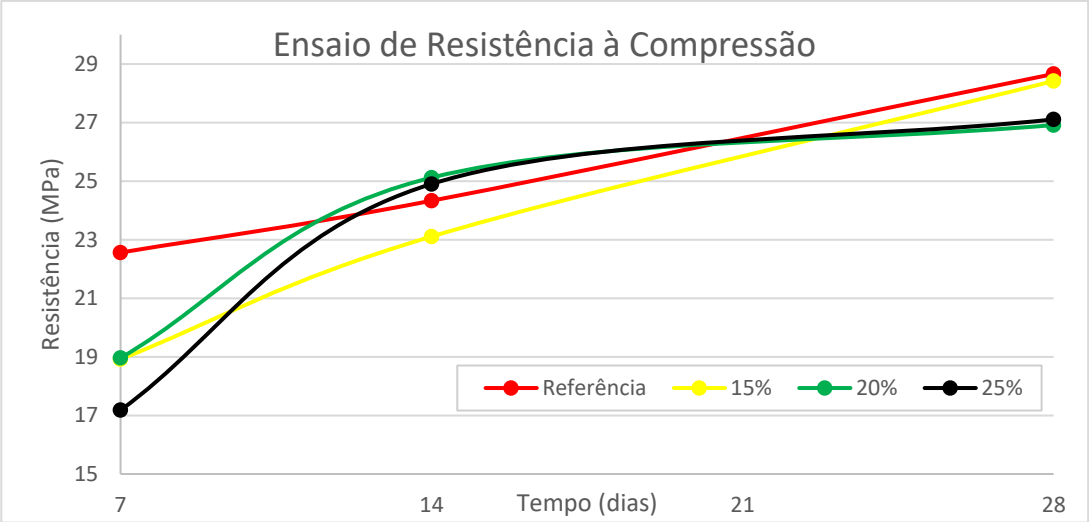
Os resultados indicaram que a substituição parcial por vidro moído pode aumentar a resistência à compressão em determinadas proporções, especialmente aos 28 dias, confirmando tendências relatadas na literatura (DU; TAN, 2014). No entanto, o desempenho depende fortemente do teor utilizado, sendo o limite de 15% o mais favorável neste estudo. A tabela 4 apresenta a média dos valores apresentados, separados por seus traços.

Tabela 4. Média dos valores obtidos em cada traço, para cada idade.

Idade (dias)	Ref. (MPa)	15% (MPa)	20% (MPa)	25% (MPa)
28	28,66	28,42	26,92	27,11
14	24,33	23,11	25,12	24,90
7	22,56	18,92	18,96	17,18

Os dados corrigidos pela análise estatística mostraram maior consistência entre os valores, confirmando a importância do Teste de Grubbs para validação experimental. A partir dos resultados obtidos, foi construído um gráfico, figura 6, destinado a ilustrar comparativamente os valores das amostras, possibilitando a visualização clara das diferenças quantitativas e a avaliação do comportamento dos parâmetros analisados.

Figura 5: Gráfico de médias de resistências à compressão.



Os modos de ruptura registrados foram: cônico, cisalhamento e misto, figuras 6 e 7, coincidiram com a classificação proposta por Silva, Martins e Costa (2019), reforçando a confiabilidade e a reprodutibilidade dos resultados. Essa correspondência evidencia a consistência do comportamento mecânico dos CPs frente às solicitações aplicadas e confirma a adequação da metodologia de ensaio, assegurando a validade dos parâmetros utilizados para a análise comparativa do desempenho das argamassas.

Figura 6: Ruptura cisalhada lateral



Figura 7: Ruptura mista



4 CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos, conclui-se que a substituição parcial do agregado miúdo por vidro moído apresenta potencial técnico e ambiental para aplicação em argamassas. A análise experimental demonstrou que percentuais de até 20% podem melhorar a resistência à compressão em relação ao traço de referência, especialmente em idades mais avançadas. O uso de vidro reciclado contribui não apenas para a sustentabilidade ambiental, ao reduzir o descarte inadequado de resíduos vítreos, mas também para a inovação tecnológica na construção civil. Recomenda-se, entretanto, ampliar os estudos para diferentes granulometrias de vidro, além da análise de durabilidade a longo prazo e comportamento frente à reação álcali-sílica.

5 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT; 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro: ABNT; 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: ABNT; 2009.

COSTA DM, Nascimento LA, Oliveira JF. Avaliação da utilização de vidro reciclado como substituição parcial do agregado miúdo em argamassas. Revista Matéria. 2019;24(3):e12431.

DU H, Tan KH. Waste glass powder as cement replacement in concrete. Journal of Advanced Concrete Technology. 2014;12(11):468-77.

MEHTA PK, Monteiro PJM. Concreto: microestrutura, propriedades e materiais. 2. ed. São Paulo: IBRACON; 2014.

MONTGOMERY DC, Runger GC. Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC; 2012.

NEVILLE AM. Propriedades do concreto. 5. ed. Porto Alegre: Bookman; 2016.

SHAO Y, Lehmann H, Moras S. Use of waste glass as a raw material in cement production. Cement and Concrete Research. 2000;30(1):91-5.

SILVA R, Martins F, Costa C. Análise dos modos de ruptura em ensaios de compressão de argamassas com resíduos. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais. 2019;12(4):785-800.