

ESTUDO COMPARATIVO DO EFEITO DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO CIMENTO PORTLAND POR VIDRO MOÍDO

Martioli, Leonardo Caniato ¹; Casagrande, César Augusto ²; Lima, Geannina Terezinha dos Santos ³; Medeiros, Marcelo Henrique Farias de ⁴; Jochem, Lidiane Fernanda ⁵

¹ Graduado em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, caniatomartioli@gmail.com

² Doutor em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, cezarcasagrande@utfpr.edu.br

³ Doutora em Engenharia Civil, Universidade Federal do Espírito Santo, geanninasantos@hotmail.com

⁴ Doutor em Engenharia Civil, Universidade Federal do Paraná, medeiros.ufpr@gmail.com

⁵ Doutora em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, lidiane@utfpr.edu.br

Resumo: Este trabalho verificou o efeito da substituição parcial do cimento Portland por vidro moído de diferentes cores (verde, azul, incolor, âmbar e colorido) na proporção de 25%, em volume, em argamassas. Os vidros foram caracterizados por granulometria a laser. As propriedades das argamassas foram então avaliadas no estado fresco (índice de consistência e teor de ar aprisionado) e no estado endurecido (resistência à tração na flexão, resistência à compressão, absorção de água por imersão e índice de vazios). O melhor resultado de resistência à compressão foi obtido para a amostra com resíduo de vidro azul, totalizando 80,5% do valor da referência aos 365 dias. Por fim, verificou-se que as diferentes cores do vidro não alteraram as propriedades estudadas em relação à referência. Este estudo sugere que a utilização de resíduo de vidro em matriz cimentícia pode proporcionar uma alternativa ambientalmente adequada para a reciclagem deste material, contribuindo para uma aplicação sustentável e para o aumento das taxas de reciclagem de resíduo de vidro.

Palavras-chave: Resíduos de vidro, Cores de vidro, Material suplementar ao cimento, Materiais de construção sustentáveis.

Abstract: This study investigated the effect of partially replacing Portland cement with crushed glass of different colors (green, blue, colorless, amber and colored) in a proportion of 25%, by volume, in mortars. The glasses were characterized by laser granulometry. The properties of the mortars were then evaluated in the fresh state (consistency index and entrained air content) and in the hardened state (flexural tensile strength and compressive strength, water absorption by immersion and void index). The best compressive strength result was obtained for the sample with blue glass residue, reaching 80.5% of the reference value at 365 days. Finally, it was found that the different colors of the glass did not alter the studied properties in relation to the reference. This study suggests that the use of glass waste in a cementitious matrix can provide an environmentally suitable alternative for the recycling of this material, contributing to a sustainable application and to the increase of glass waste recycling rates.

Keywords: Glass waste, Glass colors, Cement supplementary material, Sustainable building materials.

1. Introdução

O crescimento populacional e o aumento do consumo geram grande quantidade de resíduos, especialmente resíduos sólidos que, se descartados inadequadamente, causam problemas ambientais e de saúde pública. Para enfrentar essa questão, foi implementada, em agosto de 2010 a Lei nº 12.305 [1], que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), com o objetivo principal de estimular a reciclagem e reutilização desses resíduos.

O reaproveitamento dos resíduos sólidos como matéria-prima para novos produtos é uma solução ambientalmente correta, reduzindo o volume de resíduos descartados irregularmente. O setor da construção civil pode contribuir significativamente para a reciclagem e o reuso desses resíduos, inclusive os provenientes de outras fontes [2].

Assim, tem-se o vidro, que apesar de ser um material reciclável em sua totalidade e com ciclos infinitos, sua reutilização é desestimulada por fatores econômicos ligados à logística reversa, já que o custo é elevado comparado ao de outros materiais recicláveis, e porque a matéria-prima do vidro é abundante e de extração barata [3]. No Brasil, são produzidas cerca de 8,6 bilhões de unidades de vidro por ano, totalizando 1,3 milhão de toneladas, mas apenas 25% desse volume é reutilizado. A reciclagem de vidro contribui para a redução da emissão de CO₂, evitando cerca de 1 tonelada de CO₂ para cada 6 toneladas de vidro reciclado [4].

Estima-se que a geração de resíduos no Brasil aumentará quase 50% até 2050, enquanto a média mundial será de cerca de 70%, junto com um crescimento populacional de 12%, o que implica maior produção de lixo por pessoa [4].

Diante desse cenário, é necessário estudar o uso do vidro moído na construção civil, buscando uma destinação alternativa viável para os resíduos sólidos de vidro. Para tanto, o presente trabalho pretende avaliar o efeito da cor (verde, azul, incolor, âmbar e colorido) do vidro moído em argamassas como substituto parcial (25%) do cimento Portland em argamassas, contrapondo os resultados obtidos nas propriedades no estado fresco e endurecido aos 28, 90 e 365 dias.

2. Materiais e Métodos

2.1 Materiais

Para a realização desse estudo utilizou-se o cimento Portland CPV-ARI, que é um material que não possui adições minerais em sua composição, o que permite avaliar o efeito pozolânico do resíduo de vidro moído. A massa específica do cimento é 3,11 g/cm³ e diâmetro médio de 10 µm.

Como agregado miúdo, utilizou-se uma areia de rio com dimensão máxima característica de 4,8 mm e módulo de finura de 2,38.

O resíduo de vidro foi proveniente de obras de construção civil (vidro incolor) e garrafas *long neck* (vidro azul, verde e âmbar). A massa específica do vidro moído ficou em 2,44 g/cm³. O diâmetro médio (D₅₀) dos resíduos de vidro moído são 97, 45, 41 e 40 µm, respectivamente, para as cores verde, âmbar, incolor e azul.

2.2 Métodos

2.2.1 Moagem do vidro

O vidro foi, primeiramente, moído em um moinho de bolas a uma velocidade de moagem de 60 rpm, a fim de reduzir o tamanho inicial. Para isso, utilizaram-se bolas de aço com diâmetro de 30 mm e 20 mm, com tempo de moagem de 5 minutos. Após, o vidro foi colocado no moinho de panelas (AMP1-M, da marca AMEF) a 1120 rotações por minuto por 60 segundos. Depois da moagem inicial de 60 segundos, o vidro moído foi peneirado na peneira 0,3 mm e todo o vidro retido foi novamente moído por mais 60 segundos, repetindo o processo até todo o vidro passar nesta peneira.

2.2.2 Preparo das argamassas

As argamassas foram preparadas, baseadas na composição 1:3:0,7 (cimento: agregado miúdo: água), em massa. Nesse estudo, foram produzidas argamassas com resíduos de vidros de diferentes cores e 25 % de substituição parcial, em volume, do cimento Portland por vidro (Tabela 1). Para o preparo do vidro colorido, todas as cores de vidro foram misturadas em partes iguais (25% azul, 25% verde, 25% incolor e 25% âmbar).

Tabela 1: Argamassas preparadas

Argamassas	Cimento CPV-ARI	Vidro Verde	Vidro Azul	Vidro Incolor	Vidro Âmbar	Vidro Colorido	Relação a/c
REF	100%	-	-	-	-	-	
Verde	75%	25%					
Azul	75%		25%				
Incolor	75%			25%			0,70
Âmbar	75%				25%		
Colorido	75%					25%	

As misturas das argamassas foram preparadas em um misturador mecânico de rotação planetária, com capacidade de 5 L e 280 rpm, conforme a NBR 16541 [5]. Ao final da mistura, foram avaliadas as propriedades das argamassas no estado fresco. Os ensaios incluíram ar aprisionado [6] e índice de consistência [7].

Em seguida, foram moldados os corpos de prova 40x40x160 mm (conforme NBR 13279 [8]) para resistência mecânica e 50x100 mm (de acordo com a NBR 7215 [9]) para absorção de água por imersão e índice de vazios [10].

Após a desmoldagem, os corpos de prova foram mantidos em câmara úmida, com temperatura de 25 ± 3 °C e umidade relativa controlada de 60 ± 5% até o ensaio. Os ensaios mecânicos foram realizados aos 28, 90 e 365 dias e os ensaios de absorção por imersão e índice de vazios foram realizados com 28 dias. Os ensaios foram

realizados em triplicata. A análise estatística dos dados foi realizada por meio da comparação das médias, com intervalo de confiança de 95%, utilizando dois desvios padrão para avaliar a sobreposição entre os valores.

3. Análise dos resultados

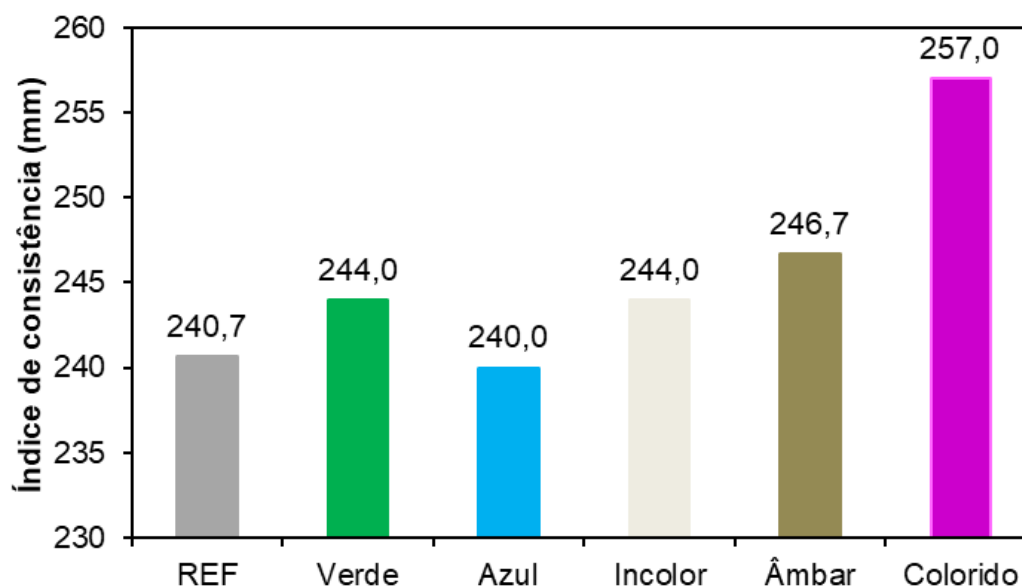
3.1 Estado fresco

Os resultados do ensaio de índice de consistência (*flow table*) apontam para valores muito próximos independentemente da cor de vidro adotada na argamassa, com exceção da amostra com vidro colorido, que apresentou um aumento de 6,8%, ou seja, aumentou a trabalhabilidade dessa amostra em relação a REF (Figura 1).

Assim como foi evidenciado no estudo de Oliveira [11], os resultados de índice de consistência deste trabalho na *flow table* apontam que quando o vidro moído é incorporado a compostos cimentícios de alto desempenho, a trabalhabilidade é mantida, sem perda que distancie significativamente do valor referencial.

Com o teor de substituição de 20%, Lee *et al.* [12] verificou que houve aumento na trabalhabilidade do composto cimentício em relação à referência e atribuiu esse resultado tanto em relação ao tamanho inferior da superfície específica quanto ao formato das partículas de vidro moído. Em concordância com Sharifi, Afshoon e Firoozjaie [13], conclui-se que a trabalhabilidade aumenta porque o vidro apresenta uma capacidade irrelevante de absorção de água não apenas devido ao aumento do teor de vidro moído em pequenas partículas, mas também esses valores se devem à redução do montante de cimento. Desta forma, a trabalhabilidade tende a aumentar porque com maior relação de água/cimento se eleva a fluidez e consequentemente a trabalhabilidade.

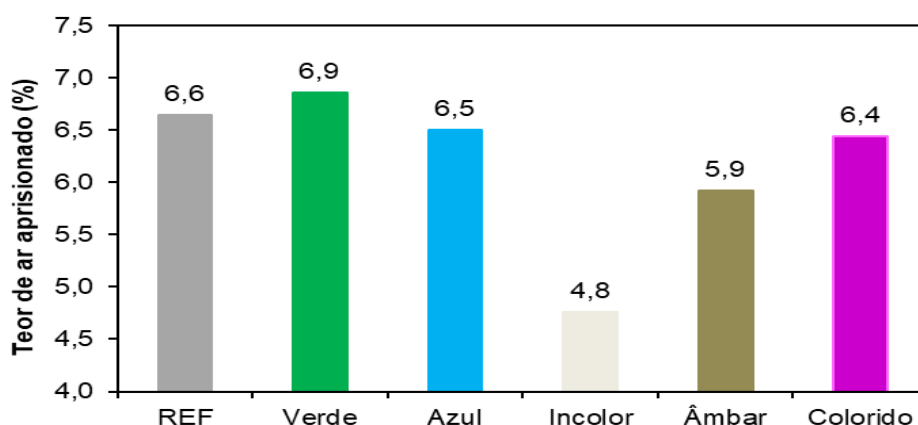
Figura 1: Índice de consistência das argamassas



Na análise dos resultados do teor de ar aprisionado percebe-se que as amostras com resíduo de vidro verde, azul e colorido apresentaram resultados semelhantes a REF, enquanto as amostras com vidro incolor e âmbar reduziram em 27,3 e 10,6%, respectivamente, em relação a REF (Figura 2).

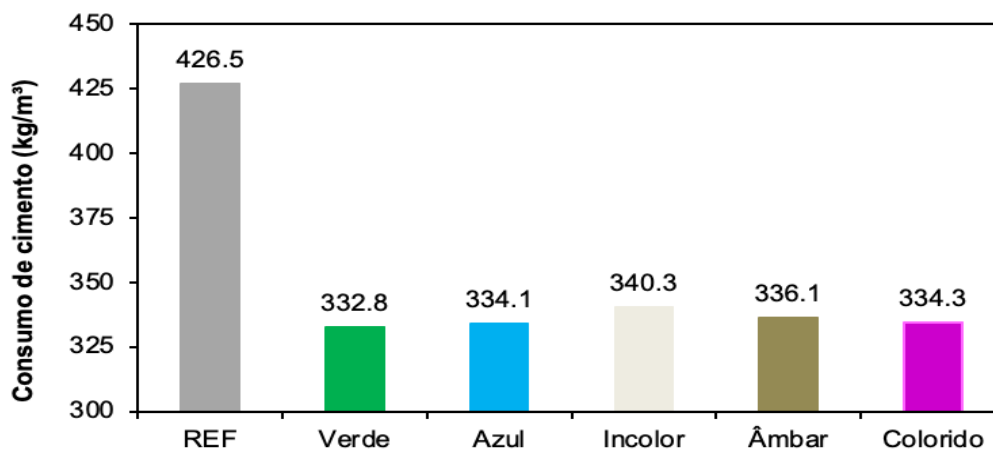
Para Sharifi, Afshoon e Firoozjaie [13], quanto menor for o teor de ar aprisionado, mais água disponível estará presente para reagir quimicamente e aumentar a densidade e resistência mecânica das amostras e isso pôde ser evidenciado neste estudo para a amostra com resíduo de vidro incolor que apresentou o maior resultado de resistência à tração na flexão (5,7 MPa) em relação à referência (4,3 MPa) aos 28 dias (Figura 5).

Figura 2: Teor de ar aprisionado



Em relação ao consumo de cimento Portland, verificou-se que a substituição de 25% da massa de cimento por vidro moído resultou em uma redução de até 22,0% no uso de cimento quando comparado à argamassa de referência. Porém, a cor do vidro não influenciou nessa propriedade, com a redução sendo semelhante para as amostras com resíduo de vidro das composições analisadas (Figura 3).

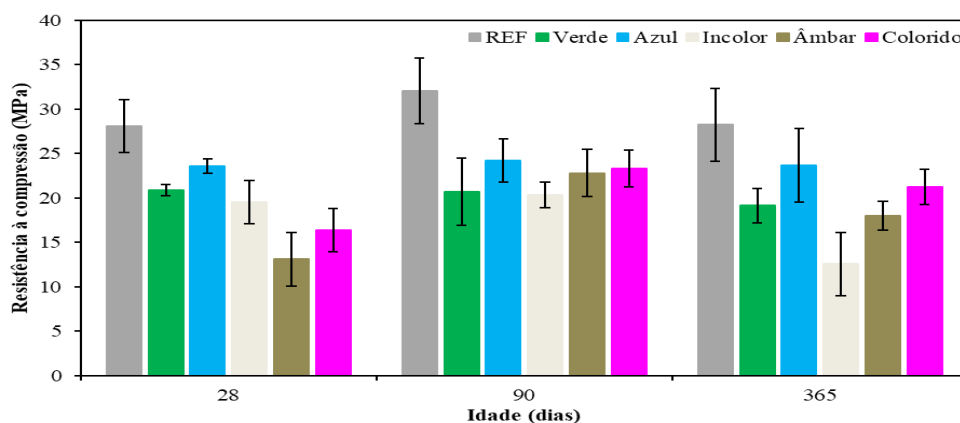
Figura 3: Consumo de cimento



3.1 Estado endurecido

Na Figura 4 tem-se os resultados de resistência à compressão das amostras com 28, 90 e 365 dias.

Figura 4: Resistência à compressão



Aos 28 dias, a argamassa que mais se aproximou da REF foi a amostra com resíduo de vidro azul, que obteve 83,6% da resistência da REF, e a que obteve a maior diferença foi a amostra com resíduo de vidro âmbar, com 46,6% da resistência da REF. A resistência mecânica inferior à argamassa referencial também foi evidenciada por Matos e Sousa-Coutinho [14] aos 28 dias, onde justificaram em seu estudo que a pozolanicidade do vidro moído causa retardo na hidratação. Consoante os resultados de Pan *et al.* [15], aos 28 dias não foi observado valor que superasse a resistência da amostra referência, apenas a média das amostras com 5% de substituição excedeu a REF, considerando que as partículas tinham tamanho mediano de 20 μm . Relacionando os resultados obtidos pelos autores com este trabalho, a conclusão foi a mesma visto que nenhuma amostra, independentemente da cor, teve resultado de resistência mecânica igual ou superior à REF aos 28 dias.

Aos 90 dias, a amostra que mais se aproximou da REF foi com resíduo de vidro azul que obteve 78,1% da resistência da REF, enquanto a amostra mais distante da referência foi com resíduo de vidro incolor (63,4% da REF). Ibrahim e Meawad [16] e Matos e Sousa-Coutinho [14] não obtiveram resultados superiores à referência aos 90 dias ao estudarem a substituição parcial do cimento Portland por resíduo de vidro moído. Neste estudo, também se verificou o mesmo resultado, visto que nenhuma das amostras, apresentou valor maior que a referência aos 90 dias.

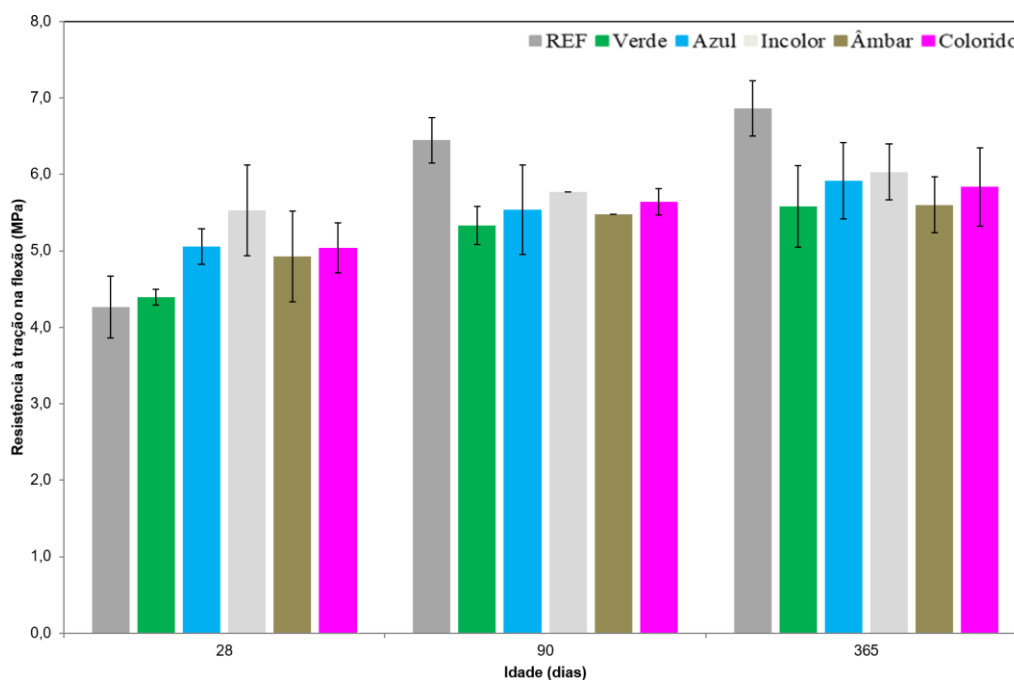
Aos 365 dias, a amostra com resíduo de vidro azul apresentou 80,5% da resistência da REF, por outro lado a amostra com o resíduo de vidro incolor obteve apenas 62,8% da resistência à compressão da REF. Du e Tan [17] atingiram resultados superiores à referência na idade de 365 dias, porém no estudo desses autores o tamanho mediano das partículas foi de 10 μm , praticamente 4,5 vezes menor do que o utilizado neste estudo, excluindo a dimensão do vidro moído verde. Desta forma, aos 365 dias nenhuma amostra apresentou resistência superior a referência.

Os resultados obtidos por Soliman e Tagnit-Hamou [18], aos 28 dias, apontaram que nenhuma argamassa com vidro moído superou o valor da argamassa referencial, evidenciando que o efeito do vidro como pozolana é lento e gradual. Porém, com a idade de 90 dias, os autores verificaram que todos os valores de resistência à compressão dos compostos com vidro moído superaram o valor da referência, diferentemente dos resultados desse estudo que, apesar de terem aumentado a resistência de forma geral na idade de 90 dias, nenhum chegou a superar a argamassa de REF, nem mesmo aos 365 dias. Isso pode ser explicado devido a diferença do tamanho das partículas de vidro moído que eles utilizaram no estudo, com partículas de tamanho mediano de 12 μm frente aos 44,87 μm desse estudo.

Para o ensaio de resistência mecânica à tração na flexão (Figura 5), dentre as argamassas com substituição de 25% do cimento Portland por vidro moído, a que utilizou vidro incolor apresentou desempenho mais consistente ao longo do tempo, com resultados de resistência à tração na flexão bastante próximos ao traço de referência. Aos 28 dias, o valor obtido foi de 5,5 MPa, demonstrando desempenho superior de 27,9% ao da referência. Já aos 90 e 365 dias, os valores se mantiveram elevados, indicando boa estabilidade da propriedade ao longo do tempo, com destaque para os 6,0 MPa aos 365 dias, sendo 86,9% do valor da referência.

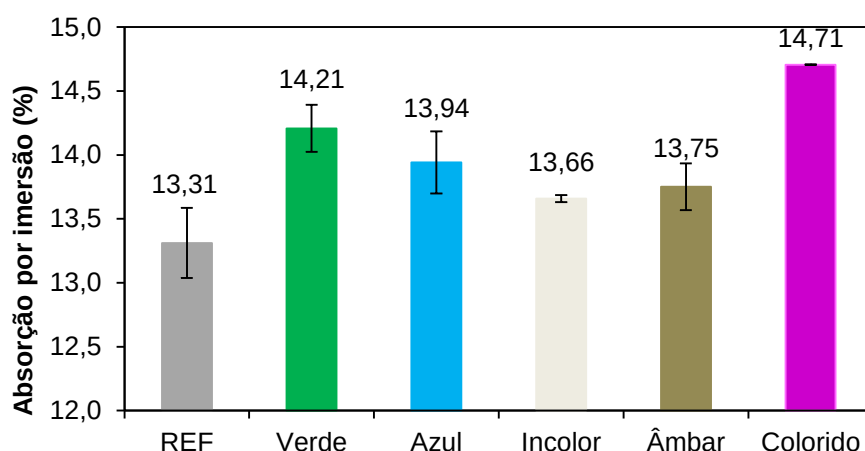
Por outro lado, a argamassa com vidro verde apresentou os menores desempenhos relativos à referência, com 4,4 MPa aos 28 dias (apenas 2,3% acima da REF), 5,3 MPa aos 90 dias (81,5% da REF) e 5,6 MPa aos 365 dias (81,2% da REF). De modo geral, as diferentes cores de vidro não impactaram os resultados de resistência à tração na flexão, mas o desempenho mais estável e próximo ao referencial foi verificado na amostra com vidro incolor.

Figura 5: Resistência à tração na flexão



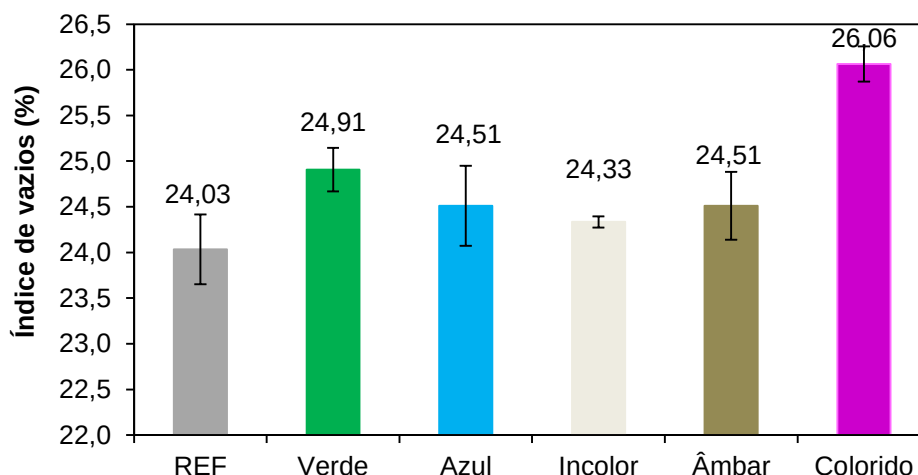
Analisando a absorção de água por imersão e a porosidade aberta, Figura 6, verifica-se que nas amostras com 25% de substituição do cimento Portland por resíduo de vidro, a média de absorção obtida foi de 14,05%, atingindo com 2 desvios ($14,05 \pm 0,84$) a faixa de domínio que abrange a REF. Desta forma, com 95% de certeza é possível afirmar que as argamassas com resíduo de vidro apresentam a taxa de absorção igual à argamassa REF. Na comparação do valor das médias das argamassas com resíduo de vidro com a REF (13,31%), tem-se que a absorção aumentou 5,6% ao utilizar o resíduo de vidro moído.

Figura 6: Absorção de água por imersão.



Na Figura 7, tem-se o índice de vazios, onde denota-se que as amostras com presença de resíduo em sua composição apresentaram aumento no teor de vazios, com a amostra com vidro colorido apresentando 8,5% a mais de vazios que a REF. Devido ao fato que as argamassas com teor de vidro na sua composição têm partículas maiores em sua granulometria, aumentando os espaços vazios e retraindo mais água, como pôde ser visto na Figura 6. Com maior teor de CP V-ARI, os espaços vazios são preenchidos e a absorção por imersão e o índice de vazios se torna menor.

Figura 7: índice de vazios.



4. Conclusão

Com base nos resultados obtidos nesse trabalho, podem-se tirar as seguintes conclusões:

- O índice de consistência das argamassas com resíduos de vidro tende a aumentar devido ao formato das partículas de vidro moído e por um material, praticamente, não absorvente, o que acarreta uma maior disponibilidade de água para elevar a fluidez da argamassa;
- O consumo de cimento foi consideravelmente reduzido (22%) nas argamassas com resíduo de vidro, o que acarretou uma menor resistência mecânica à compressão, com uma redução de até 47% para a amostra com resíduo de vidro âmbar em comparação à referência. Em todas as idades estudadas (28, 90 e 365 dias) as argamassas com resíduo de vidro moído, independentemente da cor, apresentaram resistência à compressão inferior ao valor da referência, devido à redução do consumo de cimento e ao diâmetro das partículas de vidro ser superior em, no mínimo, 4 vezes, a dimensão do cimento Portland;
- No ensaio de resistência à compressão, em nenhuma das idades analisadas, as argamassas com vidro moído superaram ou se equivaleram à argamassa referencial, evidenciando que o efeito do vidro como pozolana é lento e gradual;
- Em relação à análise das diferentes cores de vidro estudadas (verde, azul, incolor, âmbar e colorido), ficou evidente que não apresentaram alterações significativas entre si nas propriedades estudadas;
- Apesar de os resultados indicarem que, com 25% de substituição do cimento Portland por vidro moído, as argamassas não atingiram a resistência da referência, algumas composições, como a com vidro azul (80,5% da REF na resistência à compressão) e incolor (até 86,9% da REF na resistência à tração na flexão), apresentaram desempenho próximo aos valores de referência aos 365 dias. Esses dados indicam viabilidade do uso do resíduo de vidro moído em aplicações com exigência mecânica moderada, trazendo o benefício da redução do consumo de cimento Portland a uma alternativa ambientalmente sustentável e mais adequada. No entanto, estudos adicionais são necessários antes de sua utilização em larga escala, como a avaliação da durabilidade e da lixiviação de elementos contaminantes em concretos, argamassas ou pastas.

Referências

- [1] BRASIL, Lei no 12.305, de 2 de agosto de 2010. *Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos*, Brasília, DF, 2010.
- [2] Cassa, J.C.S. Carneiro, A. P. Brum, I. A. S. (2001) *Reciclagem de entulho para produção de materiais de construção*, Universidade Federal da Bahia (EDUFBA); Caixa Econômica Federal, Salvador.
- [3] Torres, A. F. R., Gonçalves-Dias, S. L. F. (2018). Entendendo a estrutura da cadeia reversa das garrafas de vidro em São Paulo. In *Anais do International Workshop Advances in Cleaner Production, Barranquilla, Colombia*.

- [4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE VIDRO (ABIVIDRO), Porque o vidro é a melhor opção para reciclar!, 2021.
- [5] NBR 16541(2016) Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura para a realização de ensaios, Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [6] NBR 13278 (2005) Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado, Rio de Janeiro.
- [7] NBR 13276 (2005) Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência, Rio de Janeiro.
- [8] NBR 13279 (2005) Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão, Rio de Janeiro.
- [9] NBR 7215 (2019) Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos, Rio de Janeiro.
- [10] NBR 9778 (2005) Argamassas e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica, Rio de Janeiro.
- [11] Oliveira Jr, A. (2020) *Propriedades residuais de compósitos cimentícios de alto desempenho com pó de vidro submetidos a altas temperaturas*, Dissertação , Universidade Federal de São Carlos.
- [12] H. Lee, A. Hanif, M. Usman, J. Sim, H. Oh (2018) Performance evaluation of concrete incorporating glass powder and glass sludge wastes as supplementary cementing material, *J Clean Prod*, 170, 683–693.
- [13] Y. Sharifi, I. Afshoon, Z. Firoozjaie (2015) Fresh Properties of Self-Compacting Concrete Containing Ground Waste Glass Microparticles as Cementing Material, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 13, 50–66.
- [14] A.M. Matos, J. Sousa Coutinho (2012) Durability of waste glass powder as cement replacement, *Constr Build Mater* 36, 205–215.
- [15] Z. Pan, Z. Tao, T. Murphy, R. Wuhler (2017) High temperature performance of mortars containing fine glass powders, *J Clean Prod* 162, 16–26.
- [16] S. Ibrahim, A. Meawad (2018) Assessment of waste packaging glass bottles as supplementary cementitious materials, *Constr Build Mater* 182, 451–458.
- [17] H. Du, K.H. Tan (2017) Properties of high-volume glass powder concrete, *Cem Concr Compos* 75, 22–29.
- [18] N.A. Soliman, A. Tagnit-Hamou (2017) Partial substitution of silica fume with fine glass powder in UHPC: Filling the micro gap, *Constr Build Mater* 139, 374–383.