

Argamassa cimentícia: Uso sustentável de pó fino de vidro reciclado como precursor parcial

Agnelo Moraes¹, João Batista de Oliveira Libório Dourado¹, Érica Karine Alves de Lima²,
Cristiane Xavier Resende³, Gilvan Moreira da Paz⁴, José Milton Elias de Matos¹, Valdeci Bosco dos Santos^{2,4*}

¹ Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia dos Materiais, Universidade Federal do Piauí, Av. Universitária s/n, Ininga, 64049-550, Teresina, PI, Brasil

² Departamento de Engenharia dos Materiais, Universidade Federal do Piauí, Av. Universitária s/n, Ininga, 64049-550, Teresina, PI, Brasil

³ Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Sergipe, Av. Marechal Rondon s/n, Jardim Rosa Elze, 49100-000, São Cristóvão, SE, Brasil

⁴ Programa de Pós-graduação em Engenharia de Materiais, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus Teresina Central, Praça da Liberdade 1597, 64000-040, Teresina, PI, Brasil

*e-mail: valdecisantos@ufpi.edu.br

Resumo:

Diversos resíduos vem sendo amplamente convertidos em recursos secundários e aplicados na indústria de construção civil para um melhor gerenciamento sustentável. Neste estudo foi avaliado o comportamento de argamassas cimentícias com substituição parcial do cimento (0 a 25%) por rejeitos de vidro sodo-cálcico. Foram realizados ensaios de consistência, resistência à compressão, Índice de Atividade de Resistência (IAR) e absorção de água para as argamassas. Os resultados indicaram que o pó de vidro com 98% das partículas menores que 45 µm apresentaram atividade pozolânica e promoveram redução na consistência das argamassas. O aumento da resistência à compressão (28 e 91 dias) foi observado nas argamassas com pó de vidro, principalmente para substituições de 20%. Os IAR's (109 – 130%) confirmam a pozolanidade presente nas argamassas com rejeitos de vidro. A absorção de água cresceu com o aumento do teor de vidro nas argamassas endurecidas. Assim, o pó de vidro pode ser usado em argamassas com até 25% de substituição, proporcionando redução dos impactos ambientais devido ao aproveitamento destes resíduos e redução do cimento.

Palavras-chave: Pó fino de vidro; Atividade pozolânica; Cimento; Argamassa; Meio ambiente.

1. INTRODUÇÃO:

As indústrias da construção civil são consideradas de fundamental importância para o desenvolvimento econômico e social de um país. Por outro lado, também são áreas que mais consomem materiais não renováveis encontrados na natureza [1], principalmente aqueles utilizados na confecção de concretos e argamassas cimentícias. Por exemplo: para o processamento do cimento, principal componente utilizado na composição destes produtos, é necessário o uso de energia proveniente da queima de combustíveis fósseis. Além disso, para a produção de cada tonelada de cimento estima-se que 750 kg de CO₂ são emitidas, causando grande impacto ambiental ao contribuir aproximadamente

com 8% de emissão global de CO₂ [2]. Devido a esses fatores, várias estratégias que se utilizam de diversos resíduos, a exemplo dos sólidos urbanos [3, 4], agroindustriais [5, 6] e industriais [7, 8], como substitutos parciais do cimento em materiais compósitos, têm sido propostas.

No Brasil, no ano de 2019, foram gerados 79 milhões de toneladas de Resíduos Sólidos Urbanos, RSU, dos quais 72 milhões foram coletados. Embora 92% dos materiais gerados tenham sido coletados, cerca de 40,5% foram mal geridos, sendo destinados a lixões ou aterros sanitários que não observam as medidas necessárias para preservação da saúde e do meio ambiente. Ainda é de conhecimento que grande parte dos municípios brasileiros não conseguem fazer a destinação correta dos seus resíduos, como prevê a Lei 12.305/2010 [9, 10].

Dentre a diversidade de materiais que compõem o RSU, o vidro se destaca por não ser biodegradável e ocupar grandes áreas de aterros sanitários [11]. Neste contexto, as indústrias que utilizam o vidro como matéria-prima têm na geração do rejeito um grande problema de poluição ambiental e de riscos para a saúde da sociedade [11], uma vez que não existem políticas voltadas à reciclagem desses materiais em todo o território nacional. Uma solução para a destinação segura desses rejeitos e que também pode ser economicamente viável na área de construção é utilizá-los em matrizes cimentícias. Recentemente, tem crescido o interesse na reciclagem de resíduos vítreos como uma substituição parcial do cimento para a produção de materiais de construção como concretos [12], tijolos [13] e argamassas [14].

O vidro é um material inorgânico, amorfo, apresentando óxido de silício (SiO₂) como seu principal componente, assim como características físicas e químicas adequadas para substituição parcial em matrizes cimentícias [15 -17]. A presença do alto teor de sílica amorfa no pó de vidro por reagir com o hidróxido de cálcio proveniente da hidratação do cimento proporciona uma reatividade pozolânica nesse material [18]. Também tem sido relatado [19, 20] que a reatividade pozolânica dos resíduos vítreos é fortemente influenciada pela granulometria de suas partículas. Por exemplo: pós de vidro apresentando uma finura de Blaine que variaram entre 260 e 585 m²/kg exibiram altos índices de atividade de força pozolânica. Além disso, quanto menor sua finura maior a característica pozolânica destes resíduos [20]. Pereira et al. [21] descobriram que a reação pozolânica é maior quando se faz uso de partículas de vidros entre 45 e 75 µm, sendo que o aumento desta reatividade foi maior para a substituição de 30% de pó de vidro. Por outro lado, Khmiriet et al. [22], ao utilizarem partículas de vidro maiores que 100 µm, observaram que elas não são efetivas para ativar a pozolanidade, devido à expansão da reação álcali-sílica (RAS). Em termos de trabalhabilidade das misturas frescas de argamassas/concretos, aumento ou redução também pode ocorrer de acordo com o uso de partículas de vidro com menor ou maior área superficial comparada ao cimento [23 - 25].

Pesquisas que associam a influência dos tamanhos de partículas dos resíduos vítreos sobre as propriedades mecânicas e durabilidade de compósitos cimentícios também têm sido propostas. Quando as partículas de vidro nas argamassas foram inferiores a 45 µm e o teor de substituição em até 30%, Khan, Saha e Sarker [26] concluíram que há uma melhora significativa na resistência à compressão dessas argamassas. Para concretos contendo pó de vidro com 80% do tamanho de partículas abaixo de 45 µm e para o teor entre 0-20% de substituição de cimento, foram obtidas melhores respostas em termos de pozolanidade, resistência mecânica e durabilidade [27]. Em outro trabalho, Lu, Duan e Poon [28] estudaram as resistências mecânicas de argamassas contendo pó de vidro com tamanhos de partícula de 28,3, 47,9, 88,5 e 204 µm. Esses pesquisadores descobriram que a incorporação de 20% de pó (tamanho igual a 28,3 µm) de vidro na argamassa contribuiu para o crescimento da resistência à compressão e flexão, respectivamente, de 30 e 40%, aos 90 dias de cura. Um aumento na resistência à compressão em torno de 38% foi observado para as argamassas com 30% de substituição de cimento por pó de vidro, apresentando tamanho de 75 µm [29]. Já alguns estudos [30, 31] concordam que a resistência mecânica dos materiais cimentícios diminuiu de acordo com o aumento do teor (10 e 20%) de pó de vidro e tamanho médio das partículas próximas a do cimento.

Quando o parâmetro avaliado é a absorção de água, Shoaie et al. [32] concluíram que à medida em que o teor de vidro aumenta na mistura, considerando o tamanho de 25 µm, sua absorção também aumenta. De forma contrária, Patel et al. [33] perceberam a redução da absorção de água quando a proporção do teor de pó de vidro aumentou, utilizando tamanho de partículas passante nas peneiras

63 e 75 μm . Da mesma forma, Nassar e Soroushian [34] investigaram concreto com 20% de pó de vidro. A influência de partículas finas (13 μm) de vidro nesse concreto resultou em menor absorção de água (13,1%) em relação ao controle.

Com base nessas discussões, o presente trabalho considerou a reutilização de resíduos finos (<45 μm) de vidro sodo-cálcico em substituição parcial ao cimento em teores de 0, 5, 10, 15, 20 e 25% para a produção de argamassas cimentícias. Foi avaliado o comportamento químico, físico e morfológico do pó de vidro. O efeito dos resíduos vítreos sobre a consistência das massas, resistência à compressão, absorção de água e massa específica das argamassas, também foram investigados. Os resultados deste estudo podem ser benéficos para a sociedade/indústrias quanto à gestão do descarte de vidro e diminuição do impacto ecológico.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a confecção das argamassas foi utilizado o pó de vidro e o cimento Apodi CP II-F-32, que apresenta características físicas de módulo de finura de 5,55% [35] e massa específica de 2,96 g/cm³ [36]. A areia natural (agregado miúdo) é proveniente de Teresina - PI, e apresenta tamanho e frações de partículas retidas em peneiras entre: 2,4 - 1,2 mm (0,01%, areia grossa); 1,2 - 0,6 mm (3,24%, areia média grossa); 0,6 - 0,3 mm (78,17%, areia média fina) e 0,3 - 0,15 mm (16,39%, areia fina) [37]. O diâmetro máximo [37], módulo de finura [37] e massa específica [38] da areia foram determinados em 0,6 mm, 1,82% e 2,51 g/cm³, respectivamente. Neste estudo, estas características obtidas para o cimento e a areia foram determinadas conforme as normas brasileiras [35 – 38], para auxiliar a uma melhor compreensão nas propriedades finais das argamassas.

O pó de vidro foi obtido a partir de rejeitos de vidro plano sodo-cálcico doados pela empresa Fort Glass LTDA, situada na cidade de Teresina - PI. Inicialmente, os rejeitos de vidros foram lavados para a remoção de possíveis impurezas, secos à temperatura ambiente, e triturados em um almofariz. Em seguida, estas partículas foram submetidas ao processo de moagem a seco em um moinho de bolas convencional (SOLAB) a 200 rpm, durante 8 horas ininterruptas. A capacidade do jarro de porcelana utilizado foi de 2 litros, sendo 1/3 de seu volume ocupado pela amostra de vidro triturado e mais 1/3 ocupado pelas bolas (31 mm de diâmetro) de porcelana, na razão de 1:1 (bolas/vidro). A Fig.1 mostra o pó de vidro reciclado e moído a partir das frações de resíduos de vidro.



Figura 1. a) Resíduos de vidro como recebidos; b) Resíduos de vidro triturados; c) Resíduos de vidro em pó (após a moagem).

Após a moagem, o material foi passado na peneira nº 200 (74 μm) e sua caracterização química e mineralógica foi realizada por espectroscopia de fluorescência de raios X (FRX, Epsilon 3XL da Panalytical) e difração de raios X (DRX, Shimadzu XRD-6000), usando radiação de Cu K α , 5° – 80° (2 θ), velocidade de 2°/min, e operando a 40 KV e 30 mA. Já o tamanho e distribuição de tamanho das partículas foi avaliado por um analisador a laser (Mastersizer 2000 E, tamanho de partículas de 0,1 a 1000 μm) e usando água como agente dispersante, enquanto que a caracterização morfológica foi realizada usando um microscópio eletrônico de varredura (MEV, JEOL JCM 5700) a 10KV, em amostra recoberta por ouro. A massa específica foi obtida de acordo com NBR 16.605 [38]. A avaliação da pozolanicidade foi determinada de forma indireta pelo ensaio de condutividade elétrica (Método de Luxán) [39].

Foram confeccionadas 5 (cinco) formulações de argamassas com substituições (em massa) do cimento em 5, 10, 15, 20 e 25% por pó de vidro, e denominadas de M5, M10, M15, M20 e M25, respectivamente. Uma formulação de referência (M0), sem substituições no cimento também foi preparada. Uma relação constante de cimento/areia igual a 1:3 e água/cimento de 0,48 foi empregada para todas as argamassas. As proporções das misturas podem ser observadas na Tab.1. Corpos de prova cilíndricos de 50 mm × 100 mm foram moldados e curados por 24 h, à temperatura ambiente. Após esse período, foi realizada a cura por imersão em água saturada com cal até as idades (28 e 91 dias) de ruptura [40].

Tabela 1. Proporções de misturas de argamassas cimentícias.

Mistura	Pó de vidro (%)	Pó de vidro (g)	Cimento (g)	Água (g)	Areia (g)
M0	0	0	624,0	300,0	1872,0
M5	5	31,2	592,8	300,0	1872,0
M10	10	62,4	561,6	300,0	1872,0
M15	15	93,6	530,4	300,0	1872,0
M20	20	124,8	499,2	300,0	1872,0
M25	25	156,0	468,0	300,0	1872,0

Quanto às caracterizações, as argamassas frescas foram avaliadas pelo ensaio de consistência [40]. Para o estado endurecido das argamassas, os ensaios de compressão foram realizados em uma máquina universal de ensaios mecânicos (Contenco100 Tf, Classe 1), com velocidade de carregamento de $0,45 \pm 0,15$ MPa/s [41]. As resistências foram determinadas usando uma média de 3 corpos de prova (28 e 91 dias) para cada formulação de argamassa. O Índice de Atividade de Resistência (IAR) com cimento Portland para materiais pozolânicos também foi investigado e determinado de acordo com a NBR 5752 [42], sendo calculado como:

$$IAR (\%) = \frac{R_B}{R_A} \cdot 100 \quad (1)$$

onde, R_B e R_A são a resistência média à compressão das argamassas contendo vidro e da argamassa controle, respectivamente. Os testes de absorção de água e massa específica seca foram realizados nos corpos de prova com 28 dias de cura, de acordo com a NBR 9778 [43].

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O potencial de uso do pó de vidro sodo-cálcico reciclado para a produção de argamassas cimentícias foi inicialmente avaliado por análise química, como mostrado na Tab.2. Percentualmente, há predominância dos componentes típicos que caracterizam o vidro estudado, SiO_2 , CaO e Na_2O [44]. De acordo com a NBR 12653 [45], os materiais pozolânicos devem apresentar um somatório de $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ maior ou igual a 50% (em massa). Neste estudo, o pó de vidro apresentou ausência de Fe_2O_3 em sua composição. Contudo, atendeu ao especificado para pozolana, visto que o percentual total ($SiO_2 + Al_2O_3$) obtido para estes resíduos foi em torno de 71%, ou seja, bem superior ao exigido pela norma. Também é possível notar um teor de álcalis (Na_2O) acima do limite (1,5%) estabelecido pela NBR 12653 para materiais pozolânicos, o que pode contribuir/ocasionar a reação deletéria álcali-sílica (RAS) na matriz cimentícia. Por exemplo, resíduos de vidro (tamanhos < 75 μm) contendo alta concentração de Na_2O (~15%) produziram alguma etringita atrasada, e isto contribuiu para baixa resistência à compressão em argamassas contendo até 20% de teores de reposição de cimento [46]. Além disto, porcentagem de aluminatos (Al_2O_3) superior a 5% na composição dos resíduos de vidro favoreceu a formação de componentes expansivos em tais argamassas. O alto teor de Na_2O também foi observado no comportamento químico dos resíduos de vidro do tipo sodo-cálcico analisados por outros pesquisadores [22].

Tabela 2. Composição química do pó de vidro reciclado.

Óxidos	Percentual (% massa)
SiO ₂	69,3
CaO	14,8
Na ₂ O	13,0
Al ₂ O ₃	1,3
MgO	0,8
K ₂ O	0,4
P ₂ O ₅	0,2
TiO ₂	0,1
SrO	0,1

O padrão de difração de raios X do pó de vidro sodo-cálcico reciclado (Fig.2) mostra uma banda ampla entre $2\theta = 15-35^\circ$, indicando a estrutura amorfa típica de um sistema vítreo e característico de materiais pozolânicos. O amorfismo do vidro é semelhante a trabalhos prévios [17, 47]. A reação pozolânica entre esta sílica vítrea amorfa e o hidróxido de cálcio (HC) resultará em silicato de cálcio hidratado (C-S-H), podendo fornecer a uma maior resistência à compressão às argamassas em estudo.

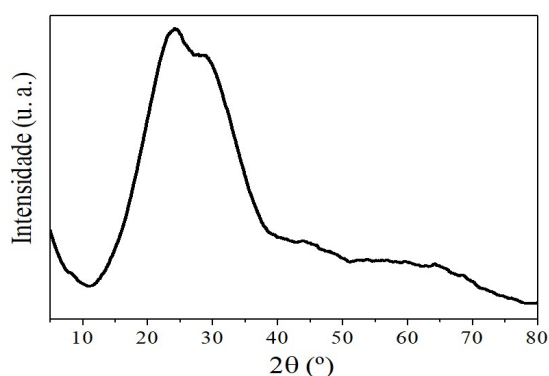


Figura 2. Difratograma de raios X do pó de vidro reciclado.

A distribuição de tamanho de partícula (DTP) do pó de vidro reciclado, após moagem por 8 horas e como material passante na peneira 200 mesh (74 μm), é apresentada na Fig.3. Os diâmetros (D) médios de partículas menores que 0,143, 0,209 e 17,956 μm foram encontrados respectivamente para D10%, D50% e D90%. O requisito físico para atendimento da pozolanicidade de um material é que ele tenha uma porção menor que 20% retido na peneira 45 μm [45]. Os resultados demonstraram que o pó de vidro possui 98% de partículas que são mais finas que 45 μm , ou seja, apenas 2% das partículas ficam retidas na peneira de 45 μm . Portanto, do ponto de vista granulométrico, o pó de vidro também atende ao requisito físico para pozolanicidade. A adição de partículas finas (< 75 μm) de vidro tem fornecido efeitos benéficos em inibir a RAS e aumentar a resistência mecânica de compósitos cimentícios [20, 23, 34].

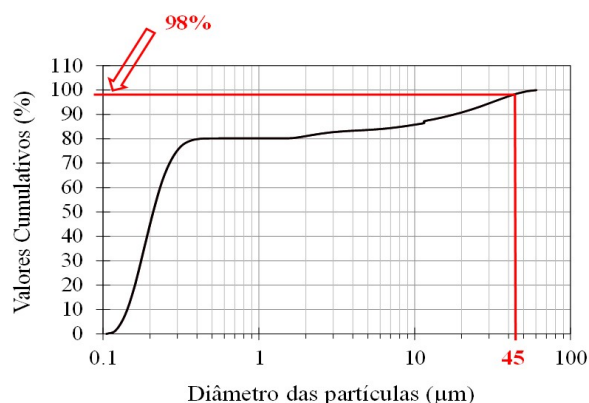


Figura 3. Distribuição granulométrica do pó de vidro reciclado

A morfologia do pó de vidro reciclado foi observada usando o MEV (Fig.4), sendo possível verificar uma variação de tamanhos das partículas do pó de vidro, corroborando com os pequenos tamanhos obtidos na análise de tamanhos de partículas. Além disto, observou-se um aspecto irregular e de formato mais prismático, devido aos processos de trituração e moagem deste material. Com relação à massa específica, o pó de vidro obteve um valor médio de $2,44 \text{ g/cm}^3$.

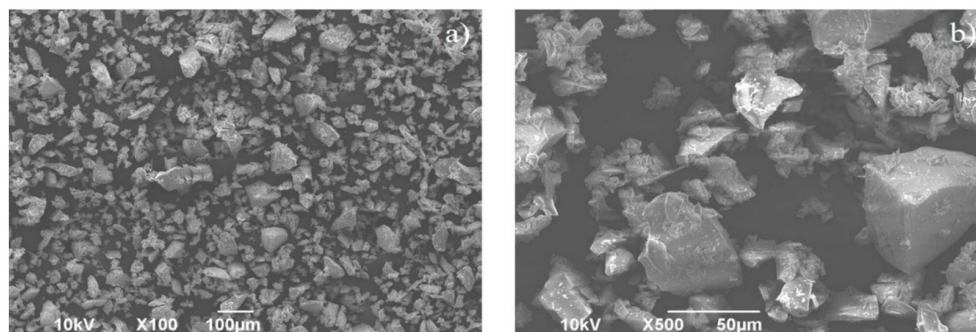


Figura 4. Imagens de MEV do pó de vidro reciclado: a) aumento de 100 \times ; b) aumento de 500 \times .

De acordo com os critérios do método de condutividade de Luxán et al. [39] foi possível prever o efeito pozolânico do pó de vidro reciclado, avaliado em solução saturada de Ca(OH)_2 . A Fig.5 mostra a curva típica de condutividade ao longo do tempo do pó de vidro. Antes do primeiro minuto de ensaio, o resíduo vítreo exibiu um declínio acentuado na condutividade elétrica. A redução observada pode ser devida ao consumo de Ca(OH)_2 e à formação de produtos insolúveis decorrentes das reações pozolânicas [1]. Com uma variação da condutividade elétrica de $0,54 \text{ mS/cm}$ em 2 min, o pó de vidro foi classificado como um material com pozolanicidade moderada [39].

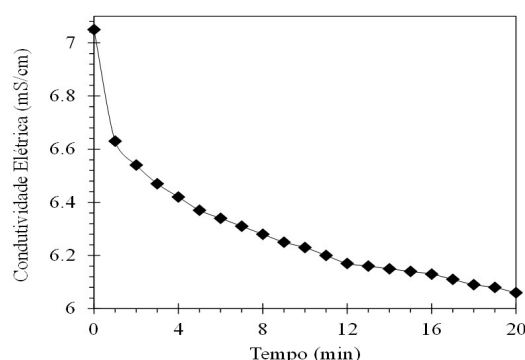


Figura 5. Condutividade elétrica em função do tempo para o pó de vidro reciclado

A influência do pó de vidro reciclado sobre a consistência das argamassas frescas é mostrada na Fig.6. Pode-se observar que os valores médios da consistência da argamassa decaem à medida que o teor de pó de vidro aumenta. A excelente relação linear mostrada é indicada pelo $R^2 \cong 0,92$. Como observado, para a argamassa de referência (M0), a consistência foi $153,5 \text{ mm}$. Este resultado encontra-se um pouco abaixo do limite mínimo ($165 \pm 5 \text{ mm}$) estabelecido pela NBR 7215 [40]. Contudo, parece razoável, uma vez que a areia utilizada nesta pesquisa possui 94,6% de suas partículas retidas nas frações classificadas como fina e média (ver seção Materiais e Métodos). Tendo em vista que há uma maior predominância na quantidade de finos em relação às frações mais grossa de areia, isso pode proporcionar uma redução na consistência da argamassa de referência, em consequência da maior área superficial das partículas.

Em relação às argamassas contendo os resíduos de pó de vidro, foi observado que a adição de 5% destes resíduos reduz a consistência da massa em 1,30%, em comparação a M0. Nas amostras de 10 e 15%, os índices de consistência permaneceram os mesmos. Com o aumento do pó de vidro para substituição de 20 e 25% houve uma redução de consistência de massa respectivamente de 4,56 e 5,86%, quando comparados à referência.

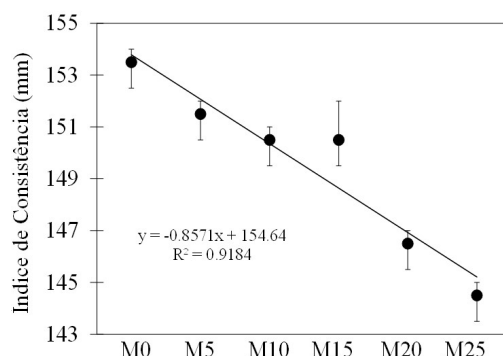


Figura 6. Efeito do pó de vidro reciclado sobre a consistência das argamassas cimentícias

O decréscimo na fluidez das argamassas com pó de vidro reciclado em relação à argamassa de referência pode estar relacionado ao cimento, que possui em média 5,55% das partículas retidas na peneira de 74 μm . Em contrapartida, o pó de vidro (material de substituição) possui 98% de suas partículas abaixo do diâmetro de 45 μm , conforme previamente discutido. Consequentemente, o aumento da área superficial ou maiores quantidades de partículas pequenas do vidro em relação às partículas do cimento, provavelmente solicitará a adição de mais água para molhar sua superfície e assim garantir a melhor coesão das argamassas cimentícias. Além disso, as irregularidades das partículas de vidro podem influenciar em uma maior dificuldade de manipulação deste material com a pasta fresca de cimento, reduzindo assim a consistência das argamassas [48]. Estes resultados corroboram com observações prévias descritas por Liu et al. [49], que utilizaram em seus estudos um fator água/cimento de 0,5 e perceberam uma ligeira queda na consistência da argamassa com o aumento do teor de vidro. Da mesma forma, pelos estudos de Lu, Duan e Poon [23] que observaram que, quanto maior e irregular o tamanho das partículas, menor foi a consistência das argamassas contendo 20% de pó de vidro e com tamanhos médios de partículas de 28,3, 47,9, 88,5 e 204 μm .

A Fig.7 mostra a influência do pó de vidro reciclado sobre a resistência à compressão das argamassas cimentícias após o período de cura de 28 e 91 dias. Claramente, a utilização de pó de vidro com características químicas pozolânicas e com 98% de tamanho de partículas <45 μm contribuiu para o aumento da resistência de todas as argamassas em comparação à argamassa referência. Observa-se que os valores de resistência aos 91 dias alcançaram aproximadamente o dobro da resistência à compressão comparativamente aos 28 dias. Este ganho expressivo de resistência com o tempo pode ser atribuído ao efeito pozolânico capaz de formar um gel de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), que melhora a densificação da argamassa [50]. As finas partículas de sílica amorfa presente na composição do pó de vidro se dissolvem lentamente no meio alcalino com o decorrer do tempo de cura e reagem para formar $\text{Ca}(\text{OH})_2$ na solução de poro de gel C-S-H [51, 52]. Além do efeito pozolânico, o pó de vidro usado tende a atuar em uma força hidráulica em decorrência do teor de CaO (~15%) presente em sua composição química [24]. Além disso, o CaO (~15%) presente na composição química do pó de vidro usado pode contribuir para uma maior força hidráulica do cimento e assim melhorar as propriedades mecânicas. O uso de pó de vidro fino com alto teor de Na_2O (~13%) não afetou o desempenho mecânico das argamassas cimentícias, corroborando com os resultados mecânicos das argamassas contendo pó de vidro (igual 75 μm) com alto teor de Na_2O (~14%), como relatado por Vandhiyan et al. [53].

No presente trabalho, o aumento das substituições em até 20% de pó de vidro por cimento aumentou a resistência à compressão para os dois períodos de cura. Aos 28 dias, um aumento de 17,68% na resistência à compressão começa a ser notado a partir da mistura M5 (10,85 MPa) em relação à argamassa referência (M0, 9,22 MPa). Esse crescimento alcança seu máximo em 30,26% para M20 (12,01 MPa). Para a amostra M25 (10,97 MPa) foi verificada uma leve queda em relação à M20, próxima a 8,67%. Aos 91 dias, o comportamento da resistência dos corpos de prova para as diferentes concentrações de mistura é semelhante ao encontrado para os 28 dias. Pondera-se, entretanto, que o aumento dentro do parâmetro de cura aos 91 dias foi menor entre as diferentes argamassas com pó de vidro e sua referência. O melhor resultado para a amostra M20 (22,34 MPa) foi de 17,83%, resistência maior que a obtida para M0 (18,96 MPa). Li et al. [54], em investigação quanto à variação

do teor (10, 15, 20 e 25%) de pó de vidro (tamanho de partícula entre 20-44 μm) pela substituição da massa do cimento, também obtiveram uma conclusão semelhante. A resistência à compressão entre todos os grupos de argamassas contendo até 20% foi superior à amostra controle aos 28 e 90 dias.

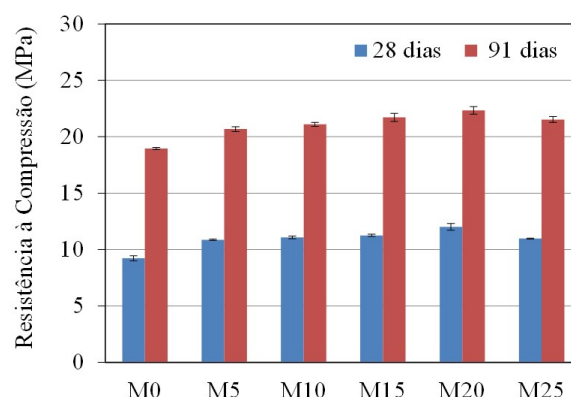


Figura 7. Efeito do pó de vidro reciclado sobre a resistência à compressão das argamassas cimentícias

Independente dos períodos de cura, e considerando os teores de substituições acima de 20% de pó de vidro, observa-se uma redução na resistência à compressão, que pode ser atribuída a menor quantidade de participação de cimento na preparação das argamassas. Consequentemente, houve uma redução dos produtos de hidratação bem como um maior número de partículas finas de vidro não reagidas na argamassa cimentícia [30].

A Fig.8 mostra os Índices de Atividade de Resistência (IARs) calculados das argamassas contendo pó de vidro curadas em 28 e 91 dias. É notável o aumento do IAR das argamassas com o aumento da substituição (5 a 20%) de pó de vidro e do tempo de cura. Para as amostras curadas em 28 dias, o valor do índice de atividade foi encontrado entre 118 e 130%. Pode-se observar também que as argamassas contendo 5 e 25% de substituição, apresentaram índices de atividade pozolânica semelhantes. Destaca-se que a mistura M20 é aquela que apresentou maior resultado de IAR, alcançando 130%. De acordo com a NBR 12653 [45], um material pozolânico ativo deve apresentar um IAR no mínimo igual a 90% (aos 28 dias) para uma substituição do cimento de 25% pelo candidato ao material pozolânico. Neste trabalho, esse índice foi de 119% para a mistura M25 em relação à M0, aproximadamente 30% acima da exigência da norma. Assim, em termos de IARs, os resultados sugerem que as partículas finas de vidro atuam como um bom condutor de reação pozolânica, resultando na aplicação bem-sucedida das argamassas em estudo. Parghi e Alam [29] utilizaram argamassas contendo 25% de pó de vidro e obtiveram o IAR = 110% aos 28 dias, classificando a argamassa com alta reatividade pozolânica.

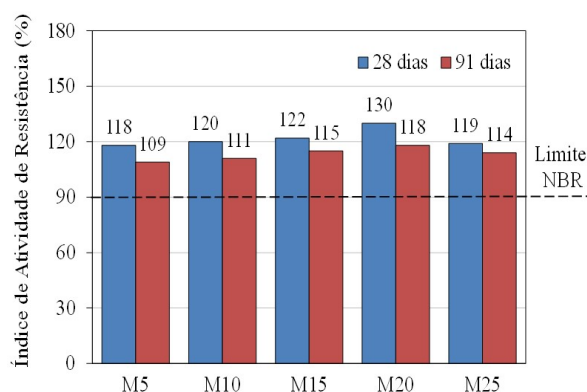


Figura 8. Índice de atividade de resistência das argamassas cimentícias contendo pó de vidro reciclado

Aos 91 dias, as argamassas contendo pó de vidro mostraram IARs entre 109 e 118%. Contudo, foi observada uma redução destes índices quando comparados aos das amostras com 28 dias de cura. Para Patel et al. [55], que utilizaram partículas de vidro com média de 45 μm de tamanho, os

IARs variaram de 90 a 126% para as idades de 7, 28 e 90 dias, com a observação de que o índice aumentava à medida que o tempo de cura também crescia. Vale destacar que os índices de atividade de resistência para as argamassas com 91 dias foram calculados a título de comparação, visto que a NBR 12653 [45] estabelece este requisito somente para os materiais pozolânicos ao período de 28 dias. No presente trabalho, os resultados sugerem que até 20% de teor de pó de vidro, como substituinte ao cimento, é a porcentagem limite na argamassa cimentícia (28 e 91 dias), em bom acordo com os resultados mecânicos.

A absorção de água (AA) e massa específica foram avaliadas para as argamassas aos 28 dias de cura. Os resultados demonstram um aumento sutil de AA com o crescimento da proporção de substituição do cimento por pó de vidro. Os índices de AA determinados para as argamassas M0, M5, M10, M15, M20 e M25 foram $8,35 \pm 0,06\%$, $8,43 \pm 0,12\%$, $8,46 \pm 0,05\%$, $8,98 \pm 0,11\%$, $9,41 \pm 0,01\%$ e $9,46 \pm 0,13\%$, respectivamente. Alguns estudos anteriores relataram resultados semelhantes. Letelier et al. [47] e Li et al. [56] com estudos sobre argamassas com tamanho de partículas de 38 μm e entre tamanhos pequenos ($<75 \mu\text{m}$), médios (75 - 600 μm) e grandes (0,6 - 2,36 mm), respectivamente, também observaram alta de AA com o aumento do teor de vidro em argamassas e independente do tamanho de partícula. Esses resultados são contrários aos de Parghi e Alam [29] e Patel et al. [33], que relataram que a absorção de água reduziu à medida que o percentual de pó de vidro na mistura aumentava, atribuindo essa condição ao fato de o pó de vidro (partículas $<75 \mu\text{m}$) apresentar um efeito do micro preenchimento e uma maior atividade pozolânica com a matriz cimentícia. Ainda de acordo com os autores, as amostras com maiores densidades implicaram em uma AA reduzida. A divergência desses resultados poderia ser explicada pelas propriedades dos vidros tais como distribuição de tamanho de partícula e sua composição química (teores de sílica amorfa, Na_2O e Al_2O_3), que afetam consideravelmente o desempenho final do produto desenvolvido [32].

Quanto à massa específica das argamassas, trabalhos prévios [32,57] relataram que existe uma tendência de diminuição da densidade das amostras com o aumento do teor de vidro, que foi atribuído a menor massa específica do pó de vidro em comparação com a do cimento. Entretanto, neste estudo, a introdução do pó de vidro com massa específica mais baixa (2,44 g/cm^3) em comparação ao cimento (2,96 g/cm^3) não promoveu variação significativa nas massas específicas das argamassas, sendo o maior decréscimo observado entre as misturas M0 e M5. Dentre todas as composições, M20 e M25 foram aquelas cujos valores das massas específicas permaneceram constantes. As massas específicas para as argamassas M0, M5, M10, M15, M20 e M25 foram determinadas respectivamente como $2,11 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$, $2,06 \pm 0,02 \text{ g/cm}^3$, $2,08 \pm 0,02 \text{ g/cm}^3$, $2,05 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$, $2,04 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$ e $2,04 \pm 0,01 \text{ g/cm}^3$.

4. CONCLUSÃO:

Do ponto de vista de características químicas e físicas, o pó de vidro sodo-cálcico reciclado pode ser considerado um material pozolânico-cimentício, superando consideravelmente os limites mínimos dos requisitos especificados pela NBR 12653. A pozolanicidade moderada foi confirmada a partir do resultado de condutividade elétrica. O pó de vidro é composto de grandes quantidades de partículas muito finas e formato irregular, que podem ter contribuído na redução da consistência das argamassas frescas com o aumento do teor de vidro em relação à argamassa de referência (M0). O efeito pozolânico do pó de vidro reciclado em todas as composições das argamassas aumentou a resistência à compressão (28 e 91 dias) em relação à M0. Contudo, a argamassa contendo 20% de pó de vidro (M20) alcançou a máxima resistência à compressão (28 dias), com aumento em torno de 30% em comparação à M0. Dessa forma, é a composição de argamassa mais promissora em termos de propriedades mecânicas. Os Índices de Atividade de Resistência (IARs) foram obtidos aos 28 e 91 dias de cura das argamassas e superaram o limite mínimo (IAR 90%) especificado na NBR 12653 para todas as substituições de pó de vidro. Destaca-se a amostra M20, com IAR = 130% (28 dias), corroborando com os resultados de compressão. As argamassas contendo pó de vidro e, considerando o tempo de 28 dias, apresentaram aumento da taxa de absorção em comparação à M0, e mais estudos relacionados são necessários. É possível a substituição viável de até 25% do cimento na argamassa. Portanto, esse estudo mostra-se uma estratégia ecologicamente amigável por reciclar os resíduos vítreos, bem como promover a redução dos impactos ambientais provocados pelo processo de produção do cimento.

AGRADECIMENTOS:

Os autores agradecem à Fort Glass LTDA (sediada em Teresina, PI) pelo fornecimento dos resíduos de vidros utilizados na preparação das argamassas. Agradecemos também aos Programas de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais do IFPI e da UFS, e ao Laboratório de Materiais de Construção da UFPI, pela colaboração em alguns ensaios, bem como por toda infraestrutura técnica disponibilizada. Por fim, os autores agradecem à empresa Kalfix (sediada em Teresina, PI), pelo apoio na realização dos ensaios de resistência à compressão dos corpos de prova. Da mesma forma, à jornalista Eloiza Strachicini Terrabuio, pela revisão ortográfica e gramatical.

REFERÊNCIAS:

- [1] Basto PA, Savastano Junior H, De Melo Neto AA, 2019. Characterization and pozzolanic properties of sewage sludge ashes (SSA) by electrical conductivity, Cement and Concrete Composites 104, 103410. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103410>
- [2] Andrew R M et al, 2018. Global CO₂ emissions from cement production. Earth System Science Data 10, 195–217. <https://doi.org/10.5194/essd-10-195-2018>
- [3] Zeng Q et al, 2022. Total recycling of low-quality urban-fringe construction and demolition waste towards the development of sustainable cement-free pervious concrete: The proof of concept. Journal of Cleaner Production 352, 131464. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131464>
- [4] Asensio E et al, 2020. Fired clay-based construction and demolition waste as pozzolanic addition in cements. Design of new eco-efficient cements. Journal of Cleaner Production 265, 121610. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121610>
- [5] Matos W E C et al, 2021. Utilização de cinzas do bagaço de cana-de-açúcar como material de preenchimento estrutural ou pozolânico para a produção de argamassas cimentícias: uma revisão. Revista Matéria 26, 4. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620210004.1322>
- [6] Pontes I C, Campos L F A, Dutra R P S, 2022. Efeitos da adição de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar nas propriedades de argamassas cimentícias. Cerâmica Industrial 27, 1, 1-8. <http://dx.doi.org/10.4322/cerind.2022.006>
- [7] Guan Q et al, 2021. Utilizing blast furnace ferronickel slag as paste replacement to reduce white Portland cement content and improve performance of mortar. Advances in Bridge Engineering 2, 18. <https://doi.org/10.1186/s43251-021-00039-6>
- [8] De Oliveira E M et al, 2018. Efeito da adição do resíduo do polimento de porcelanato RPP na durabilidade de argamassa de revestimento. Cerâmica Industrial 23, 42-49. <http://dx.doi.org/10.4322/cerind.2018.013>
- [9] Abrelpe, 2020. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil. <https://abrelpe.org.br/panorama-2020/>
- [10] Lei nº 12.305, 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Brasília: Planalto.
- [11] Younes M M, Abdel-Rahman H A, Khattab M M, 2018. Utilization of rice husk ash and waste glass in the production of ternary blended cement mortar composites. Journal of Building Engineering 20, 42–50. <https://doi.org/10.1016/j.job.2018.07.001>
- [12] De Moura J M B M et al, 2021. Sustainable pervious concrete containing glass powder waste: Performance and modeling. Journal of Cleaner Production 316, 128213. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128213>
- [13] Raut A N, Gomez C P, 2020. utilization of glass powder and oil palm fibers to develop thermally efficient blocks. Arabian Journal for Science and Engineering 45, 3959–3972. <https://doi.org/10.1007/s13369-019-04316-5>
- [14] Jochem L F et al, 2021. Effect of partial replacement of the cement by glass waste on cementitious pastes. Construction and Building Materials 273, 121704. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121704>
- [15] Bignozzi M C et al, 2015. Glass waste as supplementary cementing materials: The effects of glass chemical composition. Cement and Concrete Composites 55, 45–52. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.07.020>
- [16] Islam G M S, Rahman M H, Kazi N, 2017. Waste glass powder as partial replacement of cement for sustainable concrete practice. International Journal of Sustainable Built Environment 6, 1, 37–44. <https://doi.org/10.1016/j.ijsbe.2016.10.005>
- [17] Kim J, Yi C, Zi G, 2015. Waste glass sludge as a partial cement replacement in mortar. Construction and Building Materials 75, 242–246. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.007>
- [18] Radwan M K H et al, 2021. Waste press mud in enhancing the performance of glass powder blended cement. Construction and Building Materials 313, 125469. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125469>
- [19] Shi C, Zheng K, 2007. A review on the use of waste glasses in the production of cement and concrete. Resources, Conservation and Recycling 52, 234–247. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2007.01.013>
- [20] Shi C et al, 2005. Characteristics and pozzolanic reactivity of glass powders. Cement and Concrete Research 35, 5, 987–993. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.05.015>
- [21] De Oliveira L A P, Gomes P J C, Santos P M S, 2012. The potential pozzolanic activity of glass and red-clay ceramic waste as cement mortars components. Construction and Building Materials 31, 197-203. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.110>
- [22] Khmiri A, Chaabouni M, Samet B, 2013. Chemical behaviour of ground waste glass when used as partial cement replacement in mortars. Construction and Building Materials 44, 74–80. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.040>
- [23] Lu J, Duan Z, Poon C S, 2017. Fresh properties of cement pastes or mortars incorporating waste glass powder and cullet. Construction and Building Materials 131, 793–799. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.011>
- [24] Aliabdo AA, Elmoaty A E M A, Aboshama A Y, 2016. Utilization of waste glass powder in the production of cement and concrete. Construction and Building Materials 124, 866–877. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.016>

- [25] Zanwar A B, Patil Y D, 2020. Enhancement of sustainable mortar by using fine glass powder. In: Shukla S, Barai S, Mehta A (eds.). *Advances in Sustainable Construction Materials and Geotechnical Engineering. Lecture Notes in Civil Engineering* 35. Singapore: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-7480-7>
- [26] Khan M N N, Saha A K, Sarker P K, 2020. Reuse of waste glass as a supplementary binder and aggregate for sustainable cement-based construction materials: A review. *Journal of Building Engineering* 28, 101052. <https://doi.org/10.1016/j.job.2019.101052>
- [27] Du H, Tan K H, 2017. Properties of high volume glass powder concrete. *Cement and Concrete Composites* 75, 22-29. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.10.010>
- [28] Lu J, Duan Z, Poon C S, 2017. Combined use of waste glass powder and cullet in architectural mortar. *Cement and Concrete Composites* 82, 34-44. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.05.011>
- [29] Parghi A, Alam M S, 2016. Physical and mechanical properties of cementitious composites containing recycled glass powder (RGP) and styrene butadiene rubber (SBR). *Construction and Building Materials* 104, 34-43. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.006>
- [30] Matos A M, Coutinho J S, 2012. Durability of mortar using waste glass powder as cement replacement. *Construction and Building Materials* 36, 205-215. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.027>
- [31] Idir R, Cyr M, Tagnit-Hamou A, 2011. Pozzolanic properties of fine and coarse color-mixed glass cullet. *Cement and Concrete Composites* 33, 1, 19-29. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.09.013>
- [32] Shoaie P et al., 2020. Glass powder as a partial precursor in Portland cement and alkali-activated slag mortar: A comprehensive comparative study. *Construction and Building Materials* 251, 118991. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118991>
- [33] Patel D et al., 2019. Effective utilization of waste glass powder as the substitution of cement in making paste and mortar. *Construction and Building Materials* 199, 406-415. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.017>
- [34] 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* 29, 368-377. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.061>
- [35] NBR-11579, 2012. Cimento Portland. Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200). Rio de Janeiro: ABNT.
- [36] NBR 16605, 2017. Cimento Portland e outros materiais em pó. Determinação da massa específica. Rio de Janeiro: ABNT.
- [37] NBR NM 248, 2001. Agregado miúdo. Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT.
- [38] NBR 16916, 2021. Agregado miúdo. Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT.
- [39] Luxán M P, Madruga F, Saavedra J, 1989. Rapid evaluation of pozzolanic activity of natural products by conductivity measurement. *Cement and Concrete Research* 19, 1, 63-68. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(89\)90066-5](https://doi.org/10.1016/0008-8846(89)90066-5)
- [40] NBR 7215, 1996. Cimento Portland. Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro: ABNT.
- [41] NBR 5739, 2018. Concreto. Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT.
- [42] NBR 5752, 2014. Materiais pozolânicos. Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro: ABNT.
- [43] NBR 9778, 2009. Argamassa e concreto endurecidos. Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: ABNT.
- [44] Akerman M, 2000. Natureza, estrutura e propriedades do vidro. Centro Técnico de Elaboração do Vidro. Saint-Gobain Vidros Brasil.
- [45] NBR 12653, 2014. Materiais Pozolânicos. Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT.
- [46] Calmon J L et al., 2014. Effects of windshield waste glass on the properties of structural repair mortars. *Cement and Concrete Composites* 53, 88-96. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.04.008>
- [47] Letelier B I et al., 2019. Combined use of waste concrete and glass as a replacement for mortar raw materials. *Waste Management* 94, 107-219. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.05.041>
- [48] Nahi S et al., 2020. Properties of cement pastes and mortars containing recycled green glass powder. *Construction and Building Materials* 262, 120875. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120875>
- [49] Liu G, Florea M V A, Brouwers H J H, 2019. Performance evaluation of sustainable high strength mortars incorporating high volume waste glass as binder. *Construction and Building Materials* 202, 574-588. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.110>
- [50] Shayan A, Xu A, 2004. Value-added utilisation of waste glass in concrete. *Cement and Concrete Research* 34, 1, 81-99. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00251-5](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00251-5)
- [51] Khan M N N, Sarker P K, 2020. Effect of waste glass fine aggregate on the strength, durability and high temperature resistance of alkali-activated fly ash and GGBFS blended mortar. *Construction and Building Materials* 263, 120177. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120177>
- [52] Sacconi A et al, 2020. Manufacturing and durability of alkali activated mortars containing different types of glass waste as aggregates valorisation. *Construction and Building Materials* 237, 117733. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117733>
- [53] Vandhiyan R, Ramkumar K, Ramya R, 2013. Experimental study on replacement of cement by glass powder. *International Journal of Engineering Research and Technology* 2, 5, 234-238. <https://doi.org/10.17577/IJERTV2IS50334>
- [54] Li Q et al, 2022. Performance of waste glass powder as a pozzolanic material in blended cement mortar. *Construction and Building Materials* 324, 126531. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126531>
- [55] Patel D et al, 2020. Properties of cement mortar in substitution with waste fine glass powder and environmental impact study. *Journal of Building Engineering* 27, 100940. <https://doi.org/10.1016/j.job.2019.100940>
- [56] Li B et al, 2019. Cement pastes modified with recycled glass and supplementary cementitious materials: Properties at the ambient and high temperatures. *Journal of Cleaner Production* 241, 118155. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118155>
- [57] Afshinnia K, Rangaraju P R, 2016. Impact of combined use of ground glass powder and crushed glass aggregate on selected properties of Portland cement concrete. *Construction and Building Materials* 117, 263-272. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.072>