

Compósitos cimentícios de ultra alto desempenho com a incorporação de diversos teores de pó de vidro

Soares, Silvete Mari¹; Oliveira Júnior, Adalberto²; Freitas, Taís Oliveira Gonçalves³; Ferreira, Fernanda Giannotti Silva⁴; Salvador Filho, José Américo Alves⁵

¹ Doutoranda, Universidade Federal de São Carlos, silvetemari@ifsp.edu.br

² Mestrando, Universidade Federal de São Carlos, adalbertoengc@gmail.com

³ Mestranda, Universidade Federal de São Carlos, taisfreitas@ufscar.br

⁴ Doutora, Universidade Federal de São Carlos, fgiannotti@ufscar.br

⁵ Doutor, Instituto Federal de São Paulo, jasalvador@ifsp.edu.br

Resumo: Os compósitos cimentícios, especialmente os de ultra alto desempenho, são materiais de grande resistência mecânica que têm em sua composição materiais cimentícios suplementares com a finalidade de diminuir o impacto ambiental provocado pela produção do cimento Portland. O pó de vidro pode ser considerado um material cimentício suplementar devido à sua composição rica em sílica amorfa e, pode ser amplamente utilizado como substituição parcial do cimento Portland no concreto. Assim, o objetivo deste trabalho é avaliar a influência da substituição do cimento Portland por diferentes teores de pó de vidro no comportamento físico e mecânico de um compósito cimentício elaborado para ser utilizado no reparo de estruturas de concreto armado, proporcionando uma opção de destinação adequada para o resíduo de vidro. Para tanto, foram produzidos compósitos cimentícios com consumo de cimento de 1000 kg/m³ com a substituição de 10%, 20%, 30% e 50% em volume do cimento por pó de vidro finamente moído (<75µm). Foram avaliados a massa específica e teor de ar incorporado no estado fresco, resistência à compressão simples, resistência à tração por compressão diametral, módulo de elasticidade dinâmico e absorção de água. As propriedades mecânicas foram determinadas e comparadas com a composição de referência, sem utilização de vidro moído. Os resultados demonstram que o uso do pó de vidro em substituição ao cimento Portland não altera significativamente as propriedades analisadas na idade de 28 dias.

Palavras-chave: Compósito cimentício, ultra alto desempenho, pó de vidro

Abstract: Cementitious composites, especially those of ultra-high performance, are high mechanical strength materials composed of supplementary cementitious materials in order to reduce the environmental impact caused by the production of Portland cement. Glass powder may be considered a supplementary cementitious material due to its composition rich in amorphous silica, and this material can be used as a partial substitution of Portland cement in concrete. Therefore, this work aims to assess the influence of partial substitution of Portland cement by different contents of glass powder on a cementitious composite designed to be used in reinforced concrete structures repair, providing a suitable destination for glass waste. In this work cementitious composites produced with cement content of 1000 kg/m³, with substitutions of 10%, 20%, 30% and 50 % by volume of finely ground glass (<75µm). Was evaluated the specific gravity and air content in fresh state, axial compression strength tensile splitting strength dynamic elasticity modulus, and water absorption of the mechanical properties were evaluated and compared with reference mix without using ground glass. The results indicate the use of glass powder as substitution of Portland cement does not significantly affect the properties analyzed at 28 days.

Keywords: Cementitious composite, ultra high performance, glass powder

1. Introdução

A utilização do cimento como principal material na construção civil está associada à alta poluição ambiental e ao alto consumo de energia. Considerando as limitações dos recursos de combustíveis fósseis e as rigorosas regulamentações ambientais, alcançar uma produção sustentável de cimento é uma iniciativa fundamental a ser seguida [1]. Algumas das alternativas para diminuição do uso de recursos finitos na produção do clínquer são: melhorias na eficiência energética, recuperação de calor residual, redução da relação clínquer/cimento, uso de matérias primas alternativas, substituição de combustíveis fósseis por fontes alternativas de energia [2]. Segundo Jokar e Mokhtar [1], a redução da produção de clínquer através da adição de materiais substitutos ao cimento nos compósitos cimentícios é a medida que tem maior impacto nas emissões de CO_2 , podendo reduzir até 15 milhões de toneladas até 2034.

O vidro moído em pó possui grande potencial de utilização como material pozolânico [3]-[7]. Esse é um material de fácil acesso e disponibilidade e, por exemplo, no Brasil cerca de 980 mil toneladas de vidro são produzidas por ano, e 53% dessa produção não é reciclada [8]. Esses resíduos de vidro representam também cerca de 3% de todos os resíduos urbanos no Brasil [9]. De acordo com Al-karawi [10], o vidro é um material formado principalmente por sílica amorfa e quando finamente moído apresenta propriedades de materiais pozolânicos, que em presença de água, reagem quimicamente com o hidróxido de cálcio, formando compostos com propriedades ligantes. Segundo Patel *et al.* [11], as partículas de vidro com dimensão abaixo de 75 μm , podem substituir o cimento (10 a 25%), apresentando resultados satisfatórios na produção de compósitos cimentícios, tendo suas propriedades mecânicas melhoradas em função das reações pozolânicas [12].

O objetivo deste estudo é avaliar as propriedades físicas e mecânicas dos compósitos cimentícios com incorporação de pó de vidro, comparando os resultados obtidos com o material de referência. Pretende-se desenvolver um material que possa ser utilizado em reparo de estruturas.

2. Programa Experimental

O programa experimental apresentado foi elaborado a partir da necessidade de definir as dosagens de compósitos cimentícios de ultra alto desempenho (CCUAD) com a incorporação de pó de vidro em substituição parcial ao cimento Portland. A posterior incorporação de fibras metálicas ao CCUAD dará origem ao concreto de ultra alto desempenho reforçado com fibras (CUADRF) com grande ductilidade, baixíssima permeabilidade, altíssima capacidade resistente à compressão e elevada tenacidade. Este programa experimental teve origem com o trabalho desenvolvido por Salvador Filho *et al.* [13] no IFSP.

2.1 Materiais Utilizados

Para a produção dos compósitos cimentícios foi utilizado cimento CP V ARI com massa específica de 3,16 g/cm³, sílica ativa com massa específica de 2,25 g/cm³ e pó de vidro com massa específica de 2,55 g/cm³. Foram empregados vidros de garrafas da cor âmbar, para minimizar variações não controladas devido aos

corantes, na confecção dos compósitos cimentícios. O pó de vidro utilizado é o passante na peneira de malha 200, com dimensão máxima de 75 μm , obtido a partir da moagem em moinho de bolas por 14 horas e peneirado mecanicamente. O agregado miúdo utilizado é quartzoso, proveniente de leito de rio e peneirado manualmente em malha de abertura de 1,2 mm. Wille e Boisvert-Cotulio [14] também utilizaram agregado miúdo com tamanho inferior a 1,2 mm para obter compósitos de alta resistência. Segundo Azme e Sha [15], a utilização de agregados de menor dimensão reduz a heterogeneidade dos agregados e promove a densificação da mistura. Foram utilizados aditivo superplastificante e aditivo redutor de retração. A relação água/ligante adotada foi de 0,18 com a adição de 8% de sílica ativa em relação à massa de aglomerante. A incorporação de pó de vidro foi realizada nos teores de 0%, 10%, 20%, 30% e 50% em substituição volumétrica ao cimento. A seguir são apresentados os valores de consumo de materiais (Tab. 2.1).

Tabela 2.1: Consumo de materiais

Traço	Consumo de materiais (kg/m^3)						
	Cimento	Sílica ativa	Pó de vidro	Agregado miúdo	Água*	SP*	RR*
REF	1000	80	-	1074	181,07	24,3	10,8
VD10	919	80	81	1074	181,07	24,3	10,8
VD20	839	80	161	1074	181,07	24,3	10,8
VD30	757	80	243	1074	181,07	24,3	10,8
VD50	597	80	403	1074	181,07	24,3	10,8

Valor de água corrigida em relação aos 46% de sólidos do superplastificante.
SP = superplastificante e RR = redutor de retração

São apresentados os valores da granulometria do cimento, da sílica ativa e do pó de vidro determinadas por granulometria à laser (Fig. 2.1 (a)) e a caracterização do agregado miúdo pela NBR 248 [16] (Fig. 2.1 (b)).

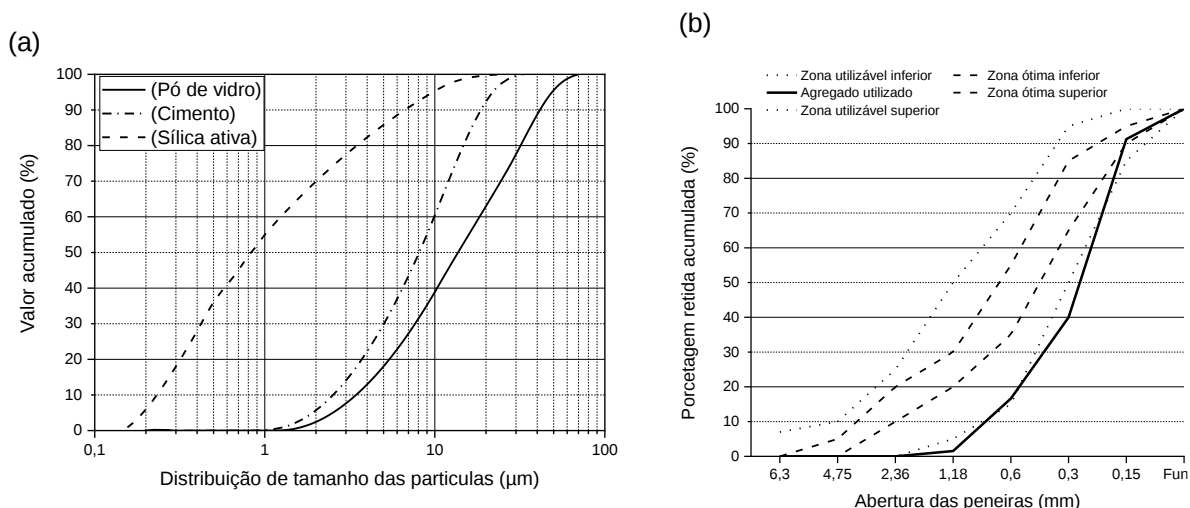


Figura 2.1: (a) Resultado da granulometria do cimento, sílica e pó de vidro; (b) Curva de distribuição granulométrica do agregado miúdo.

O cimento possui valores em d_{50} (mediana) em torno de 8 μm , a sílica ativa em torno de 0,82 μm e o pó de vidro em torno de 14 μm . A granulometria do pó de vidro é pequena o suficiente para que o material apresente atividade pozzolânica. Matos e

Sousa-Coutinho [4], Soliman e Tagnit-Hamou [5], Pan *et al.* [6] utilizaram pó de vidro com tamanho de partículas em d_{50} de 9 μm , 12 μm e 20 μm , respectivamente.

Para a caracterização química dos materiais finos foi realizado o ensaio de espectrometria de fluorescência de raios X. Para o cimento, verifica-se a presença de elevados teores de óxidos CaO (61%), SiO_2 (23%), Al_2O_3 (4%), Fe_2O_3 (2%) e SO_3 (3%). A sílica ativa é constituída basicamente de SiO_2 (94%), principal componente químico participante da reação pozolânica, e de uma pequena parte de K_2O (1%). O pó de vidro possui teores significativos de SiO_2 (74%), Na_2O (11%), CaO (9%) e Al_2O_3 (4%). A presença de elevados teores de SiO_2 no pó de vidro é altamente desejável para o desenvolvimento da reação pozolânica. A composição química dos ligantes é equivalente à encontrada por pesquisadores como Matos e Sousa-Coutinho [4], Soliman e Tagnit-Hamou [5], Harbec *et al.* [17], Pan *et al.* [6] e Ibrahim e Meadwad [18].

Foi avaliada a atividade pozolânica do pó de vidro pela determinação do desempenho com cal aos 7 dias conforme a NBR 5751 [19]. O ensaio apresentou resistência à compressão de 6,4 MPa, valor superior ao limite de 6,0 MPa definido pela norma.

2.2 Métodos

2.2.1 Ensaio em Pasta

Realizou-se o ensaio para verificar o índice de consistência de acordo com a NBR 13276 [20] da pasta de cimento, sílica ativa e superplastificante, que também permite avaliar a compatibilidade entre esses materiais. São apresentadas as curvas com o espalhamento da pasta de cimento e sílica ativa (Fig. 2.2 (a)), em 10, 30, 40 e 60 minutos de ensaio para vários teores de superplastificante. Como pode ser observado, o teor de 2,25% é o que apresenta menor perda de espalhamento ao longo do tempo. O ensaio de miniabatimento desenvolvido por Kantro [21] foi realizado para a determinação da consistência da pasta de cimento com incorporação de pó de vidro utilizando o teor de 2,25% de superplastificante adotado. Mediu-se as áreas de espalhamento aos 10, 30, 40 e 60 minutos. É apresentado o gráfico com resultados para cada pasta analisada (Fig. 2.2 (b)). A incorporação do pó de vidro não interferiu na trabalhabilidade do compósito cimentício estudado.

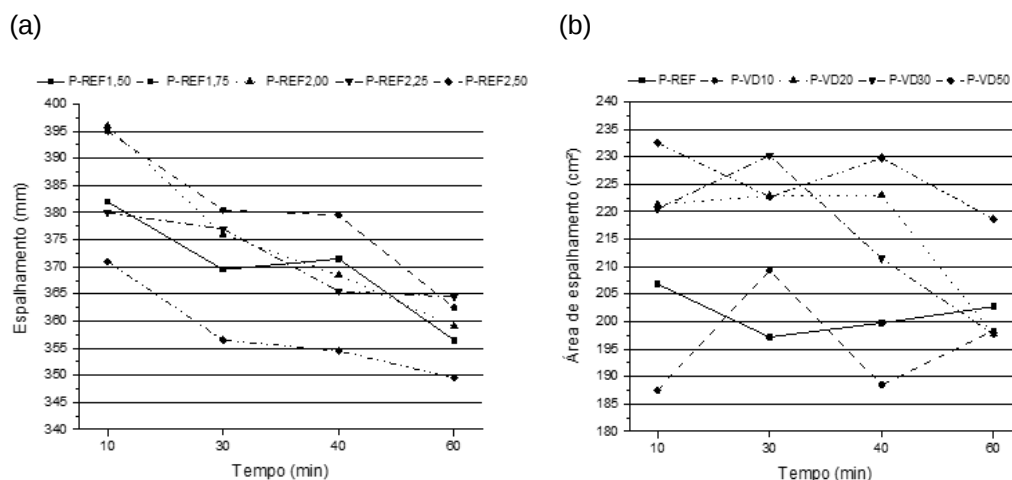


Figura 2.2: (a) Espalhamento da pasta em função do tempo; (b) Curvas das áreas de espalhamento por tempo para cada pasta analisada.

2.2.2 Ensaios no Estado Fresco

Foi realizada a verificação da consistência dos compósitos cimentícios de acordo com a NBR 13276 [20] e a determinação da densidade e teor de ar incorporado de acordo com a NBR 13278 [22] para a mistura de referência e para os traços com substituição parcial do cimento por pó de vidro.

2.2.3 Ensaios no Estado Endurecido

Foram moldados corpos de prova cilíndricos 5 x 10 cm, adensados manualmente, curados submersos em água saturada com cal. Os ensaios para verificação da resistência à compressão axial, foram realizados de acordo com a NBR 5739 [23], nas idades de 2, 7 e 28 dias, e os ensaios de resistência à tração por compressão diametral realizados de acordo com a NBR 7222 [24], na idade de 28 dias. O ensaio para obtenção do módulo de elasticidade estático foi realizado de acordo com a NBR 8522 [25], na idade de 28 dias. O ensaio para obtenção do módulo de elasticidade dinâmico é um ensaio não-destrutivo, realizado através da propagação de ondas longitudinais, obtidas por pulsos ultrassônicos, de acordo com os textos normativos ASTM E1876-01 [26] e ASTM C215-02 [27]. Foram moldados corpos de prova para a mistura de referência e para cada teor de substituição de pó de vidro, seguindo as recomendações da NBR 15630 [28]. A absorção de água por capilaridade foi analisada de acordo com a NBR 9779 [29].

3 Resultados e Discussão

Foram realizadas análise de variância (ANOVA) com nível de significância de 5% e teste de Tukey nos resultados. As letras (A, B, C...) que aparecem nos gráficos representam os resultados estatisticamente equivalentes.

3.1 Índice de Consistência

Os valores de espalhamento variaram de 372,5 mm para a pasta com incorporação de 20% de pó de vidro até 382,5 mm para a pasta com 50%, com a mistura referência apresentando valor de espalhamento de 380 mm. Os espalhamentos dos compósitos cimentícios sem e com substituição parcial do cimento pelo pó de vidro não apresentaram diferença significativa entre eles, ficando a diferença em no máximo 10mm. A manutenção da trabalhabilidade, de acordo com resultados obtidos na análise estatística, foi fator decisivo para que os traços fossem mantidos com o teor de 2,25% de superplastificante.

Soliman e Tagnit-Hamou [5] e Elaqra e Rustom [29] constataram o aumento da consistência com o aumento dos teores de pó de vidro das misturas. Os pesquisadores atribuem esse efeito ao menor atrito entre as partículas do compósito e à superfície lisa do vidro, à maior disponibilidade de água para fluidificação da mistura devido à baixa absorção do vidro e à diluição do cimento, retardando a formação de produtos hidratados que eventualmente aglomerariam outras partículas, o que contraria as afirmações de Pan *et al.* [6], que afirmaram que a água ficaria retida na superfície das partículas de vidro.

3.2 Densidade de Massa e Teor de Ar Incorporado

A densidade de massa das misturas que possuem pó de vidro diminuiu com o aumento do teor de incorporação de pó de vidro, de 2307 kg/m³ para a mistura sem pó de vidro para 2273 kg/m³ para a mistura com incorporação de 50% de pó de vidro. A densidade diminuiu a partir da substituição do cimento, componente mais denso, por um componente ligeiramente menos denso, também observando a diminuição do teor de ar incorporado com o aumento do teor de pó de vidro (4% para referência, para 1% com 50% de pó de vidro).

A diminuição do teor de ar incorporado nas misturas com pó de vidro aumenta a disponibilidade de água livre, a qual não é adsorvida pelas partículas de vidro, ao mesmo tempo que promove a densificação do compósito por efeito fíler como também foi constatado por Sharif *et al.* [32]. Soliman e Tagnit-Hamou [5] também observaram diminuição da densidade de massa dos compósitos, atribuindo à substituição de um produto mais denso, por um produto menos denso, entretanto, os autores identificaram o aumento do teor de ar incorporado na mistura à medida que o teor de incorporação de pó de vidro aumentava.

3.2 Resistência à Compressão Axial dos CCAUD

São apresentadas as médias dos resultados do ensaio de resistência à compressão axial dos CCUAD (Fig. 3.1).

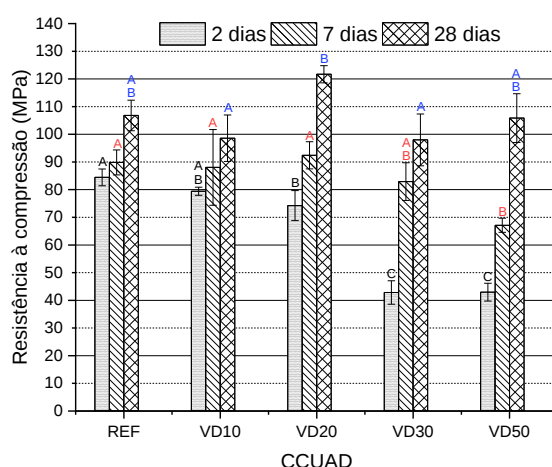


Figura 3.1: Resistência à compressão axial dos compósitos cimentícios de ultra alto desempenho com incorporação de 0%, 10%, 20%, 30% e 50% de pó de vidro

A incorporação do vidro promoveu mudanças sensíveis no desenvolvimento das resistências à compressão dos CCUAD em diferentes idades. Na idade de 2 dias, a resistência à compressão dos CCUAD diminuiu à medida que se aumentou o teor de pó de vidro, comportamento característico de misturas com material pozolânico, que diminui a intensidade das reações nas primeiras idades. A análise estatística mostrou que a mistura referência é estatisticamente equivalente somente a VD10, enquanto VD10 é estatisticamente equivalente a VD20 e VD30 é estatisticamente equivalente somente a VD50.

Na idade de 7 dias, os traços REF, VD10, VD20 e VD30 não apresentaram valores estatisticamente diferentes entre si, enquanto o traço VD50, que apresentou o menor

valor de resistência à compressão, só possui valor estatisticamente equivalente a VD30, com a maior quantidade de pó de vidro atrasando o desenvolvimento das resistências. Na idade de 28 dias, as misturas REF, VD10, VD30 e VD50 são estatisticamente equivalentes entre si, com o VD20 apresentando o maior valor de resistência à compressão, ainda que seja estatisticamente equivalente a VD50.

Matos e Sousa-Coutinho [4], Soliman e Tagnit-Hamou [5] e Pan *et al.* [6] não identificaram qualquer valor superior de resistência à compressão dos compósitos cimentícios para misturas com pó de vidro em relação as misturas de referência aos 28 dias. O aumento da resistência em idades mais avançadas foi atribuído à formação de C-S-H por efeito pozolânico, promovendo a densificação do compósito endurecido, que com o aumento do teor de pó de vidro, altera a relação a/c, disponibilizando maior quantidade de água para uma mesma quantidade de cimento, intensificando a produção de $Ca(OH)_2$ e as reações pozolânicas, com as próprias partículas de pó de vidro, isoladamente, apresentando elevadas propriedades mecânicas [5]. O pó de vidro fornece locais de nucleação para o $Ca(OH)_2$, com os íons de Ca^{2+} nucleando em partículas de sílica amorfa antes que sejam dispersos em solução na mistura, favorecendo a hidratação de partículas anidras do cimento. A presença de elevados teores de álcalis no pó de vidro facilita a hidratação do cimento nas primeiras horas de hidratação, produzindo mais rapidamente etringitas primárias [16].

3.3 Resistência à Tração por Compressão Diametral

A análise estatística mostrou que a incorporação do pó de vidro não forneceu valores diferentes de resistência à tração por compressão diametral para todos os traços analisados, com os valores variando de 9,80 MPa a 10,86 MPa, para o traço VD30 e REF, respectivamente.

3.4 Módulo de Elasticidade Dinâmico e Estático

São apresentados os valores de módulo de elasticidade dinâmico e estático (Fig. 3.2).

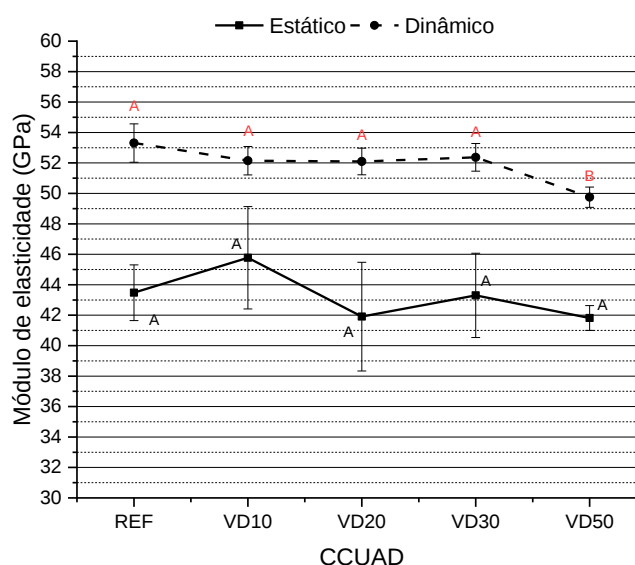


Figura 3.2: Módulos de elasticidade estático e dinâmico

Os valores médios do módulo de elasticidade estático dos diferentes traços sem e com pó de vidro não apresentaram valores estatisticamente diferentes entre si. Quanto ao módulo de elasticidade dinâmico, o traço VD50 apresentou os menores valores de módulo, sendo a única mistura estatisticamente diferente dos outros traços.

O pó de vidro pode contribuir na melhoria do módulo de elasticidade, uma vez que o vidro apresenta elevada rigidez (na ordem de 70 GPa), contribuindo solidariamente no desempenho mecânico do compósito. Soliman e Tagnit-Hamou [5] não identificaram significativas mudanças para o módulo de elasticidade para misturas com pó de vidro em relação à referência, com os valores variando de 50 a 55 GPa.

3.5 Absorção de Água por Capilaridade

A seguir são apresentados os valores de absorção de água por capilaridade aos 7 e 28 dias (Fig 3.3(a) e (b)).

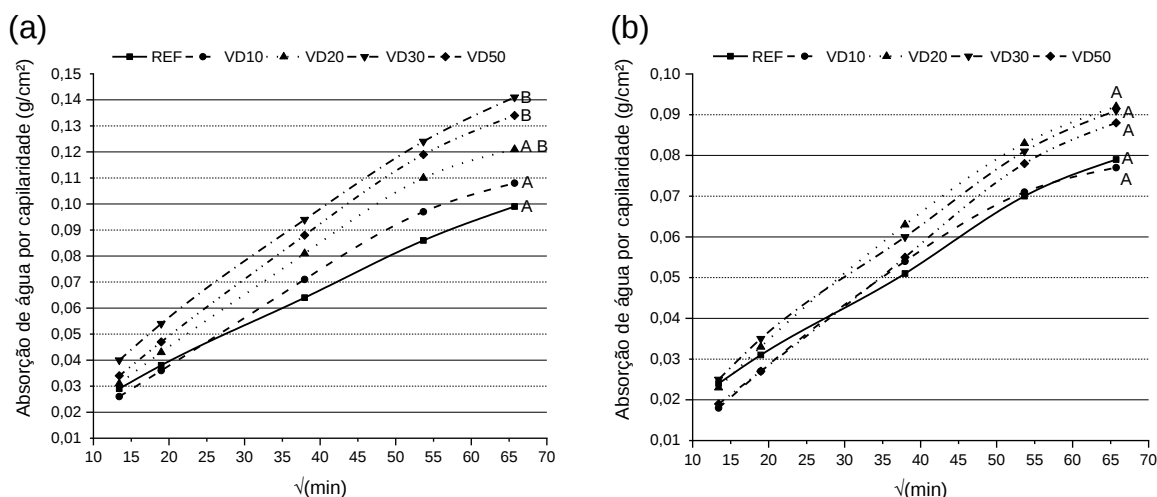


Figura 3.3 (a): Absorção de água por capilaridade aos 7; (b) Absorção de água por capilaridade aos 28 dias.

Na idade de 7 dias, em 72h de exposição dos corpos de prova à água, o traço VD30 apresentou a maior absorção de água, mas sendo estatisticamente igual a VD20 e VD50. O traço referência apresentou o menor valor de absorção de água por capilaridade, sendo estatisticamente equivalente a VD10 e VD20. Aos 28 dias todos os valores obtidos são estatisticamente iguais.

Matos e Sousa-Coutinho [4] e Du e Tan [32], não observaram diferenças significativas na absorção de água por capilaridade em misturas de controle e com pó de vidro. A pouca mudança foi atribuída ao tamanho das partículas do cimento e do pó de vidro, as quais foram equivalentes, que quando comparado com a sílica ativa, que possui partículas muito menores, não apresenta a mesma eficiência de colmatção nos poros capilares [4]. Du e Tan [32] atribuíram esse comportamento à diminuição do tamanho dos poros capilares por efeito pozolânico e fíler do pó de vidro, especialmente os da zona de transição.

4. Conclusões

A partir dos resultados obtidos pode-se realizar as seguintes considerações:

- Considerando os ensaios de caracterização realizados, os materiais utilizados nesta pesquisa atendem aos requisitos especificados das normas técnicas;
- O compósito cimentício usado como referência bem como os compósitos cimentícios com incorporação de pó de vidro apresentaram uma trabalhabilidade e resistência mecânica adequadas ao uso do material como reparo de estruturas de concreto;
- A incorporação do pó de vidro não comprometeu as características dos compósitos cimentícios no estado fresco;
- A incorporação de pó de vidro em idades precoces diminuiu a resistência à compressão à medida que o teor de pó de vidro aumenta, contudo, aos 28 dias, as misturas com pó de vidro apresentam desenvolvimento de suas resistências, com o traço VD20 apresentando o maior valor de 121 Mpa;
- Estatisticamente VD20 e VD50 apresentam valores equivalentes. Sob o viés da sustentabilidade considerando que não foram observadas diferenças significativas nos valores das propriedades físicas e mecânicas do traço VD50 em relação às outras misturas, o uso do teor de 50% de substituição do cimento por pó de vidro, torna-se interessante.

5. Referências

- [1] Jokar, Z.; Mokhtar, A. (2018) Policy making in the cement industry for CO₂ mitigation on the pathway of sustainable development- A system dynamics approach. *Journal of Cleaner Production*, 201:142–155.
- [2] Mikulčić, H. et al. (2016), Reducing greenhouse gasses emissions by fostering the deployment of alternative raw materials and energy sources in the cleaner cement manufacturing process. *Journal of Cleaner Production*, 136:119–132.
- [3] Meena, A.; Singh, R. (2012) *Comparative Study of Waste Glass Powder as Pozzolan Material in Concrete*. Tese (Bacharelado). National Institute of Technology Roukela.
- [4] Matos, A. M.; Sousa-Coutinho, J. (2012) Durability of mortar using waste glass powder as cement replacement. *Construction and Building Materials*, 36:205–215.
- [5] Soliman, N. A.; Tagnit-Hamou, A. (2016) Development of ultra-high-performance concrete using glass powder – Towards ecofriendly concrete, *Construction and Building Materials*, 125:600-612.
- [6] Pan, Z. et al. (2017) High temperature performance of mortars containing fine glass powders, *Journal of Cleaner Production*, 162:16–26.
- [7] Lee, H. et al. (2018) Performance evaluation of concrete incorporating glass powder and glass sludge wastes as supplementary cementing material, *Journal of Cleaner Production*, 170:683–693.

- [8] Glass is Good. Todo mundo reciclando vidro. [201?]. Disponível em: <https://www.glassisgood.com.br/>.
- [9] CEMPRES - Compromisso Empresarial para Reciclagem (São Paulo). Vidro. [201?] Disponível em: <<http://cempre.org.br/artigo-publicacao/ficha-tecnica/id/6/vidro>>.
- [10] Al-Karawi, S. N. (2018). Use alternative raw materials for concrete. 0–12,
- [11] 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.
- [12] Dyer, T. D.; Dhir, R. K. (2001) Chemical Reactions of glass cullet used as cement component. 13: 412–417.
- [13] SALVADOR FILHO, J. A. A. et al. (2017) Influência da utilização do pó de vidro em substituição ao cimento Portland na resistência à compressão de matrizes cimentícias de ultra alta resistência. In: *59º Congresso Brasileiro do Concreto, Bento Gonçalves*. ANAIS DO 59º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO.
- [14] Wille, K.; Boisvert-Cotulio, C. (2015) Material efficiency in the design of ultra-high performance concrete, *Construction and Building Materials*, 86:33–43.
- [15] Azmee, N. M.; Sha, N. (2018) Ultra-high performance concrete: From fundamental to applications, *Case Studies in Construction Materials*, 2018.
- [16] NBR 248 (2003) Agregados - Determinação da composição granulométrica. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, Rio de Janeiro, Brasil.
- [17] Harbec et al. (2017) Mechanical and durability properties of high performance glass fume concrete and mortars, *Construction and Building Materials*, 134:142–156.
- [18] Ibrahim, S.; Meawad, A. (2018) Assessment of waste packaging glass bottles as supplementary cementitious materials, *Construction and Building Materials*, 182:451–458.
- [19] NBR 5751 (2015) Materiais pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica com cal aos sete dias. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, Rio de Janeiro, Brasil.
- [20] NBR 13276 (2016) Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, Rio de Janeiro, Brasil.
- [21] Kantro, D. (1980) Influence of Water-Reducing Admixtures on Properties of Cement Paste - A Miniature Slump Test, *Cement, Concrete and Aggregates*, 2:95-102.
- [22] NBR 13278 (2005) Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, Rio de Janeiro, Brasil.
- [23] NBR 5739 (2007) Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, Rio de Janeiro, Brasil.

- [24] NBR 7222 (2011) Concreto e argamassa- Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, Rio de Janeiro, Brasil.
- [25] NBR 8522 (2017) Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, Rio de Janeiro, Brasil.
- [26] ASTM E1876-01 (2001) Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration. A. S. FOR T.M.
- [27] ASTM C215-02 (2003) Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal and Torsional Resonant Frequencies of Concrete Specimens.
- [28] NBR 15630 (2008) Concreto e argamassa — Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultrassônica. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, Rio de Janeiro, Brasil.
- [29] NBR 9779 (2012) Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, Rio de Janeiro, Brasil.
- [30] Elaqra, H.; Rustom, R. (2018) Effect of using glass powder as cement replacement on rheological and mechanical properties of cement paste, *Construction and Building Materials*, 179:326–335.
- [31] Sharifi, Y.; Afshoon, I.; Firoozjaie, Z. (2015) Fresh Properties of Self-Compacting Concrete Containing Ground Waste Glass Microparticles as Cementing Material. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 13:50–66.
- [32] Du, H.; Tan, K. H. (2017) Properties of high volume glass powder concrete, *Cement and Concrete Composites*, 75:22–29.