



CIÊNCIA EXATAS E DA TERRA

Scientia Amazonia, v. 11, n.2, C21-C35, 2022

Revista on-line <http://www.scientia-amazonia.org>

<https://doi.org/10.5281/zenodo.7102378> - ISSN:2238.1910

Substituição parcial da areia por pó de vidro em concreto

Pedro Felix Liotto¹, Laerte Melo Barros², Franklin Monteiro Brasil³,

Genilson Pereira Santana⁴

RESUMO

Neste experimento foi testado o resíduo de vidro em pó objetivando substituir agregados miúdos em concreto. Para esse propósito, resíduos de vidro de sobras de corte de fachadas de prédios foram obtidos. O vidro foi moído até a textura de 4,75 e 0,15 mm e foi usado na proporção de 10, 20, 30, 40 e 50% com substituinte da areia. O efeito substituinte da areia pelo resíduo de vidro foi avaliado com cimento Portland e brita do tipo 1 com aditivo superplastificante no concreto. O tamanho das distribuições das partículas, massa específica e unitária foram determinadas na areia e vidro. A consistência do concreto foi medida pelo teste cone Slump. A compressão diamétrica e axial foram realizadas em amostras de concreto em 7, 14, 21, 28 e 90 dias. A microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi efetuada em amostras de concreto fraturadas e foram extraídas dos testes de compressão. Os resultados mostram um aumento da compressão diamétrica e axial do resíduo de vidro no concreto nas proporções de 30, 40 e 50%. A substituição da areia pelo resíduo de vidro aumenta sua trabalhabilidade. O aumento da resistência está relacionado à força de ligação do silicato de cálcio hidratado e o pó de vidro durante a reação pozolânica.

Palavras-chave: Vidro soda-cal. Propriedades mecânicas. Tempo de cura. Cimento Portland. Reação pozolânica.

Partial replacement of sand by glass powder in concrete. In this experiment, the powdered glass residue was tested aiming to replace tiny aggregates with concrete. For this purpose, glass residues of leftovers cut facades of buildings were obtained. The glass was ground to the texture of 4.75 and 0.15 mm and was used in a ratio of 10, 20, 30, 40 and 50% with a sand substituent. The replacing effect of sand by glass residue was evaluated with Portland cement and type 1 gravel with superplasticizer additive in concrete. The size of particle distributions, specific and unitary mass was determined in sand and glass. The consistency of the concrete was measured by the Cone Slump test. Diametric and axial compression was performed in concrete samples in 7, 14, 21, 28 and

¹Mestre Engenharia Civil UFAM, Manaus-AM, Brasil, correspondência: pedro_639@hotmail.com

² Prof. Depto Infraestrutura do IFAM – CMC, Manaus, Amazonas, Brasil, laerte.barros@ifam.edu.br

³Prof. Depto Química, UFAM e doutorando Ciência e Tecnologia de Materiais, UNESP, São Paulo - São Paulo, fmobrasil@gmail.com

⁴ Prof ICE/Depto Química/UFAM, Manaus, Brasil, gsantana2005@gmail.com



90 days. The Scanning electron microscopy (SEM) was performed on fractured concrete samples and were extracted from compression tests. The results show an increase in diametric and axial compression of glass residue in concrete in the proportions of 30, 40 and 50%. The sand replacing with glass residue increases its workability. The resistance increase is related to the bonding force of hydrated calcium silicate and glass powder during the pozzolanic reaction.

Keywords: Soda-lime glass, Mechanical properties, Cure time, Portland cement, Pozzolanic reaction.

1 INTRODUÇÃO

O concreto devido a sua facilidade de ser trabalhado e moldado tem seu uso amplamente difundido na construção civil em praticamente todo o planeta. Porém o seu uso em larga escala vem causado um alto consumo dos recursos naturais. Outro desafio da construção civil é a alta quantidade de resíduos gerados (restos de concreto, madeira, vidro de esquadrias, argamassa de revestimentos, cerâmica de pisos e azulejos, materiais de porcelana, metais e materiais poliméricos) durante as obras. Essas duas características vêm motivando pesquisas para buscar materiais que tenham melhor desempenho e menor agressão ambiental.

Estrategicamente, a pressão sobre os recursos naturais causadas pela construção civil vem sendo reduzida com o uso de materiais alternativos. Segundo MMA (2012) a reutilização dos resíduos, além de reduzir o uso dos recursos naturais, vem diminuindo o custo da obra, a quantidade de poluentes das fábricas de materiais de construção e o volume de entulhos em aterros e lixões situados próximos as cidades.

Apesar de ser um material único, inerte e ideal para reciclagem, pois pode ser reciclado várias vezes

sem que suas propriedades físicas e químicas sejam alteradas, o vidro é um problema sob o ponto de vista de reutilização. Ele é amplamente utilizado em todo o planeta a tal ponto que a cada ano mais de 10 milhões de toneladas de resíduos de vidro são produzidas nas metrópoles mundiais. Somente nos Estados Unidos esse número chegou em 2015 na ordem de 11,43 milhões de toneladas com apenas 3,88 milhões de toneladas sendo recicladas (EPA, 2018). No caso específico da construção civil a reutilização do vidro está geralmente baseada no seu emprego após ser moído (ou em pó) como substituto do agregado miúdo (MIRANDA et al., 2014; MIRANDA; PAIVA; RODRIGUES, 2014). Segundo Afshinnia, & Rangaraju (2016); Topçu & Canbaz (2004) quando empregados na fabricação de concretos os resíduos de vidro moído são considerados uma variável importante na redução dos custos da construção civil.

Ao ser utilizado como agregado miúdo, o vidro pode aumentar a reatividade e a durabilidade do concreto (SCHWARZ; CAM; NEITHALATH, 2008; DYER & DHIR, 2010). Porém, não existe um consenso na literatura a respeito de qual proporção e textura são ideais para que a incorporação do vidro



seja ótima. Por exemplo, Bazant et al. (2000), após várias tentativas, chegaram à conclusão de que a fraca ligação na interface entre o vidro e o concreto compromete a reutilização do vidro. Shayan & Xu, (2006) relatou que partículas de pó de vidro menores inibem o aumento das reações álcalis-sílica no concreto. Taha & Nounu (2009) constataram que o pó do vidro com tamanho médio de partícula entre 160 e 2500 μm altera negativamente as reações álcalis-sílica. Um dos efeitos dessa ordem de tamanho de partículas é a lixiviação do concreto (IDIR; CYR; TAGNIT-HAMOU, 2010). No caso específico do cimento Portland, Zheng (2016) observou que o pó de vidro retarda a dissolução da sílica e das reações álcalis-sílica.

Já Shafaatian (2018) afirma que existe outra razão complicadora da reutilização do vidro no concreto que é o tamanho das partículas que influenciam diretamente nas propriedades mecânicas, como resistência a compressão entre outras. Quando o pó de vidro é adicionado ao concreto na proporção de 20%, Omran & Tagnit-Hamou (2016) constaram que a resistência à compressão em variados dias de cura como 20% de substituição aumenta em 7% a partir de 92 dias. Além da resistência mecânica, esses autores observaram também que aos 28 dias de secagem, a resistência à tração aumenta 35% e a resistência à flexão 4%. Esse comportamento também foi comprovado por Afshinnia & Rangaraju, (2016) para o vidro usado como material agregado miúdo.

Diante disso, este trabalho tem como objetivo avaliar qual o efeito da substituição da areia por miúdo de resíduos de vidro sobre as propriedades mecânicas do concreto em função do tempo de secagem a fim de propor uma reutilização deste resíduo sólido na construção civil.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Obtenção e preparo das amostras

Os resíduos de vidro deste trabalho foram cedidos pela empresa Portal Vidros, na forma de sobras do corte de vidros planos empregados principalmente na construção civil em Manaus, na composição de fachadas de prédios comerciais e residenciais, esquadrias e sacadas, além de movelarias em geral. Em todos os experimentos com agregados de vidro deste trabalho foram empregados vidros de uma mesma espécie, para minimizar as variações não controladas das formulações de concretos. Após coleta os fragmentos de vidro foram lavados em água corrente para retirada de impurezas e secos ao ar. Um moinho de bolas com 12 esferas foi utilizado para triturar o vidro em séries consecutivas de 4 minutos. Em cada série o vidro moído foi passado em peneiras 4,75 mm e 0,15 mm de abertura. O vidro moído retido na peneira 4,75 mm retornou para mais séries de 4 minutos até a obtenção de uma quantidade de vidro moído entre 4,75 e 0,15 mm para a realização deste trabalho.

O cimento utilizado nas formulações das amostras de concreto foi o Portland, denominado CP IV-32, de fabricação da empresa Mizu,



bastante comercializado em Manaus. O cimento foi fracionado e armazenado em pequenas quantidades em ambiente seco, além de ser utilizado dentro do prazo de validade. Os agregados empregados são de natureza mineral e comercializados em Manaus. O agregado miúdo (Jazida Arco Iris) foi obtido da areia de terra firme e o agregado graúdo (Jazida Figueiredo a 150 km de Manaus) de brita 1. Os materiais como cimento, areia natural, resíduo de vidro moído e brita 1 foram caracterizados em triplicata e o valor médio de granulometria, massa unitária e massa específica, foram feitos de acordo com os procedimentos recomendados pelas normas NBR NM 248/2003 (ABNT, 2003); NBR NM 45/2006 (ABNT, 2006); e NBR 9776/1987 (ABNT, 1987), respectivamente.

Para o preparo dos corpos de provas de concreto foi utilizado Glenium 51, um aditivo superplastificante, recomendado para a fabricação de todos os tipos de concreto quando se necessita de baixo fator água/cimento (a/c) e alta fluidez, sendo compatível com todos os tipos de cimento Portland, conforme descrito por Arulrajah et al., (2015)

2.2 Produção dos corpos de prova de Concretos

Os corpos de prova de concreto foram produzidos com traços em massa 1:1,60:2,40 com a/c de 0,40 e 0,8% de aditivo com substituição de agregados fino de areia por vidro moído nos teores de 0, 20, 30, 40, e 50% (Tabela 1). Sendo que a adição dos seguintes componentes se manteve constante em: cimen-

to-12 kg; brita 01-28.80 kg; água-4.80 kg; e, Glenium-0.096 kg.

Tabela 1- Misturas dos concretos.

Amostra	Substituição (%)	Areia	Vidro
		-----kg-----	
REF	0	19,20	0,00
CV20	20	15,36	3,40
CV30	30	13,44	5,76
CV40	40	11,52	7,68
CV50	50	9,60	9,60

Os materiais foram misturados em betoneira de eixo inclinado, com capacidade de 150 litros de concreto por 5 min e com velocidade igual 70 rpm. A produção seguiu as seguintes etapas de execução:

1) Para que não houvesse necessidade de controle da umidade dos materiais, principalmente da areia, os agregados graúdos e miúdos foram anteriormente secos em estufa para posteriormente serem pesados;

2) Finalizada a homogeneização, os concretos eram avaliados quanto à trabalhabilidade, que é a energia necessária para manipular o concreto fresco sem perda considerável da homogeneidade do material, pelo teste de abatimento do tronco de cone, Slump test.

Os ensaios foram moldados em cinco lotes de concreto, com verificações das resistências nas idades 7, 14, 21, 28 e 90 dias. O rompimento dos corpos de provas foi realizado em duplicata. Os ensaios de compressão dos corpos de prova cilíndricos foram realizados

de acordo com a NBR 5739/2015 (ABNT, 2015). Quinze corpos de provas cilíndricos de 10 x 20 cm por mistura foram moldados e capeados com enxofre antes de serem ensaiados.

2.3 Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV

O MEV foi feito em um analisador modelo tipo Leo 435VP, Marca CARL ZEISS com pequenas amostras dos corpos de prova presos em suporte *stub* com dimensões de 616 e 484 mm de espessura depositado em uma fita condutora revestido com uma camada de ouro e imagens gravadas sob a tensão de aceleração de 20 KV, com corrente de $6,0 \times 10^{-11}$ V e pressão 5×10^{-7} torr.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Características dos materiais

A Figura 2 exibe as curvas de distribuição de partículas das frações de areia e vidro apresentando dois comportamentos distintos. Nota-se que a curva de distribuição de partículas do vidro moído é maior. É possível observar ainda na parte mais abaixo da curva que os finos se apresentam em quantidade significativa. Isso é possível devido ao processo de moagem. Um resultado esperado, devido a uma pequena diferença granulométrica dos dois materiais. Essa afirmação fica mais evidente nos valores de massa específica da Tabela 2. A Tabela 2 apresenta os valores das massas unitárias e específica dos materiais envolvidos na mistura. Tais características dependem dos tipos de materiais e seus processos produtivos, podemos destacar o caso

do vidro que o tipo de vidro e de moagem é determinante para diferentes valores. O processo de moagem utilizado, como dito acima, foi por moinho de bolas, o que gerou um resultado 5% menor em comparação com o agregado natural. Quanto aos demais valores de cimento e agregados graúdos, pode-se afirmar que se encontram dentro dos limites preconizados por norma.

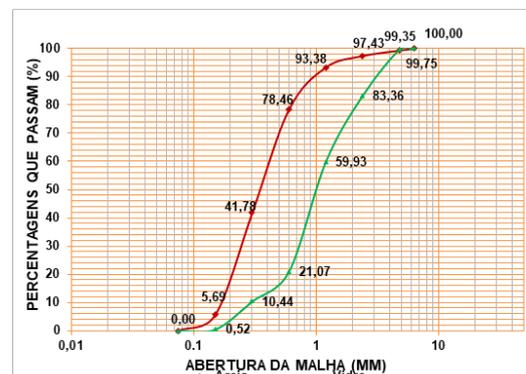


Figura 2 - Comparação da distribuição granulométrica da areia natural e a de vidro.

Os resultados de ensaio de consistência são apresentados na Figura 3, em que se observa um aumento nos valores de *Slump* à medida que mais agregado de vidro é adicionado ao agregado natural. O aumento do *Slump* observado está relacionado à superfície lisa do agregado miúdo, o que resulta em maior fluidez de tais misturas, tendo em vista que foram utilizadas as mesmas relações água e aglomerante para todas as misturas assim como foi observado por Gautam; Srivastana; Agarwal, (2012).

Tabela 2- Massa específica e unitária de agregado graúdo, areia natural e vidro moído usados neste trabalho.

Caráter	Cimento	Areia Natural	Vidro moído	Agregado Graúdo
Massa Específica*	3,15 ⁽¹⁾	2,6 ⁽²⁾	2,49 ⁽²⁾	2,63 ⁽⁴⁾
Massa Unitária**	1,65 ⁽¹⁾	2,49 ⁽³⁾	1,42 ⁽³⁾	1,54 ⁽³⁾

Ensaios usados ¹NBR 16605, ²NBR 9776, ³NBR 7251 e ⁴NBR 9937. Massas * e ** (kg/dm³)

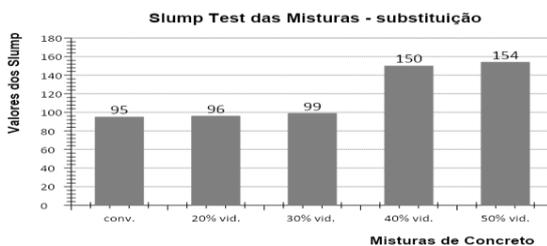


Figura 3 - Relação de Slump das misturas.

3.2 Compressão axial

Os resultados médios de compressão axial são expressos na Figura 4. Esta mostra a variação na resistência à compressão axial com substituição de agregado natural por agregado de vidro, em comparação com os resultados da mistura de controle. Verifica-se que as resistências apresentaram evolução a compressão axial com o aumento da idade, além de desenvolvimento normal até a resistência da mistura de controle. Nota-se que nos concretos produzidos com 20 e 30% de substituição não são observadas diferenças nos valores de resistência.

Nesse gráfico (Figura 4), as resistências do concreto com 20% de substituição de areia por vidro alcançam valores abaixo dos valores da mistura de referência. Destaca-se que nos dias 14 e 28 observam-se

valores de compressão axial típicos do concreto convencional. Outro destaque importante está na taxa de ganho da resistência nos dias iniciais, observa-se que a inclinação obtida na mistura com vidro exprime um ganho de resistência maior que o concreto convencional. Nota-se ainda, um "berço" se formando entre os dias 14 e 28. No concreto convencional esse período é conhecido como uma desaceleração no ganho de resistência. Mas quando olhamos as linhas referentes ao mesmo período no gráfico da mistura com vidro, observa-se que essa desaceleração é considerável.

Ainda na Figura 4, as resistências da mistura com vidro a 30% de substituição não ultrapassaram a da referência. É importante descrever alguns aspectos, por exemplo, nos 14 dias iniciais a taxa de ganho de resistência é a mesma do concreto convencional. Outro detalhe observado é que após esses 14 dias iniciais os dois concretos reduzem a taxa de ganho de resistência, mas no concreto da mistura de vidro a redução é menor que o concreto convencional. Ao final de 90 dias a resistência está muito próxima do concreto convencional.

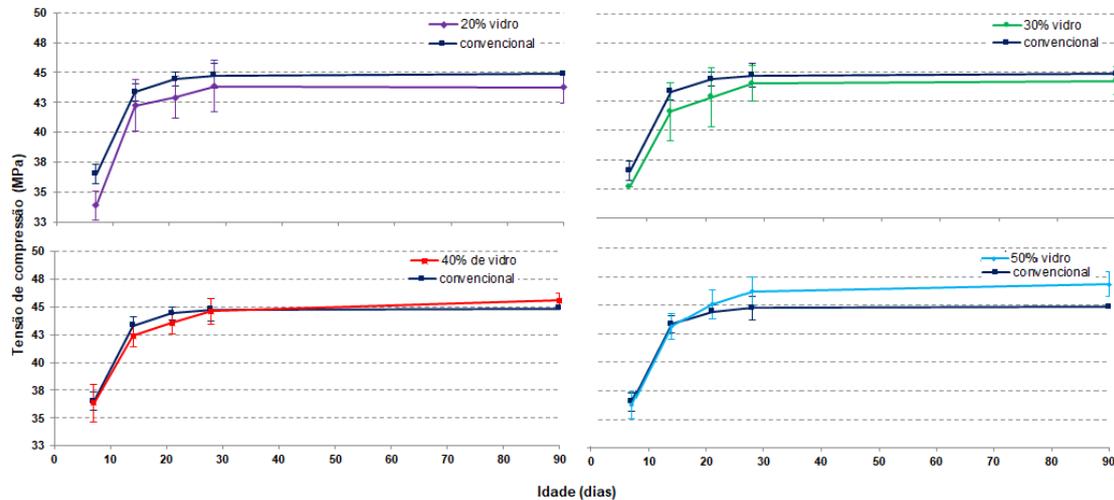


Figura 4 – Gráficos comparativos de resistência de compressão axial,

Observando o comportamento com 40% de substituição, percebe-se um padrão no ganho de resistência em relação ao concreto convencional. Nos 14 dias iniciais essa taxa é muito próxima ao concreto convencional, porém a resistência ainda permanece abaixo da resistência do concreto convencional. Aos 14 dias, nota-se uma taxa de ganho de resistência que se mantém constante diferentemente do concreto convencional. A resistência final da mistura com vidro alcança nível mais alto do que o concreto convencional, ultrapassando a mistura de referência no dia 35. Após o 28º dia a mistura de concreto com substituição de 40% de areia por vidro moído continua ganhando resistência em uma taxa de ganho maior que a mistura sem vidro.

Com a mistura de 50%, as resistências em quase todas as medidas são melhores que as da mistura convencional. Nos 14 dias iniciais o concreto com vidro ganha resistência na mesma proporção que o

concreto convencional. Ao final dessa primeira etapa vemos no gráfico que o concreto com vidro ultrapassa o concreto convencional. No período de 14 até 28 dias ocorre um ganho na taxa de resistência em relação ao concreto convencional.

A literatura tem mostrado o mesmo comportamento observado neste trabalho, porém com aumento da capacidade de resistência à compressão do concreto misturado com cimento após 28 dias. No entanto, não existe um consenso em termos da quantidade de vidro a ser acrescentada. Afshinnia & Rangaraju (2016) observaram o aumento na capacidade de resistência à compressão com uma mistura de 20% de vidro. Já Tan & Du, (2013) constataram o mesmo efeito só que para uma mistura de 25% de vidro. Porém os mesmos autores mais tarde (Du & Tan, 2014), observaram que aumentando para 60% a capacidade de resistência à compressão também aumenta.

3.3 Compressão diametral

A Figura 5 mostra os resultados dos ensaios de compressão diametral do concreto de referência e com a adição de vidro. Nota-se que há existência de pequenas diferenças em relação ao concreto de referência, ou seja, as misturas com vidro praticamente não afetaram a capacidade de compressão diametral do concreto. Outro aspecto observado nas compressões diametraes é quanto à resistência na idade de 90 dias cujo comportamento mostra um aumento em relação ao concreto de referência. Assim os resultados mostram que o vidro tende a melhorar a compres-

são diametral do concreto. Segundo Lu & Poon (2018), o aumento da compressão diametral pode estar relacionada à granulometria do vidro. No entanto, Bursi et al. (2018) mostraram que esse fenômeno está relacionado aos efeitos da reação pozolânica. Essa afirmação é consubstanciada por Du & Tan (2014) que atribuíram à quantidade de álcalis presente mesmo com a existência de microfissuras nos agregados. Para Tan & Du (2013) o aumento da capacidade de compressão se deve a proporção de vidro adicionado ao concreto e a pequena absorção de água.

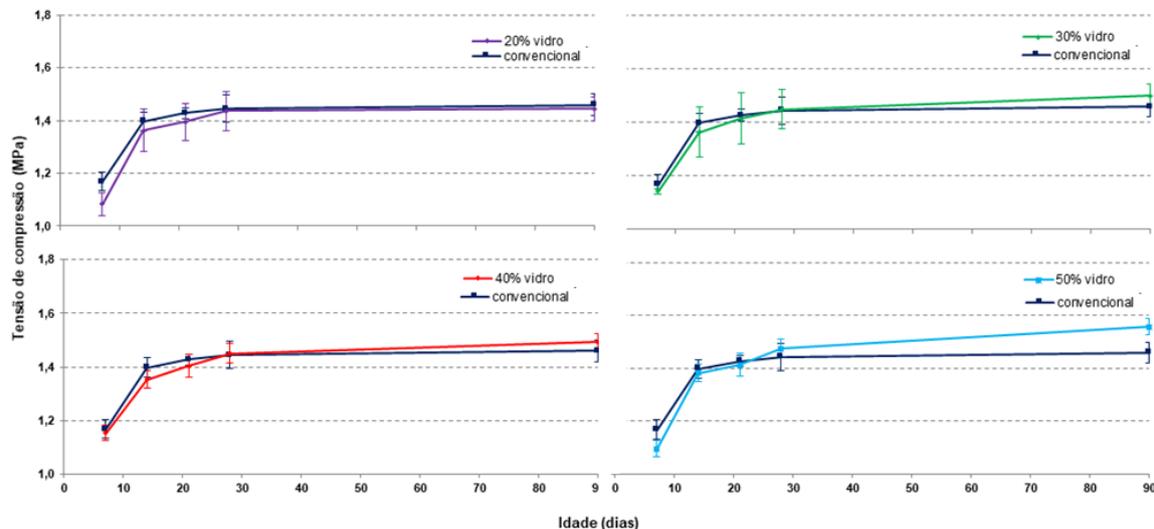


Figura 5 – Resistência à compressão diametral em função da idade dos corpos produzidos com adição de 20-50%.

3.4 Microscopia eletrônica de varredura - MEV

As imagens obtidas por MEV das superfícies fraturadas conforme os respectivos dias mostram a presença de trincas entre a pasta de cimento e agregados, a porosidade,

as fases anidras e hidratadas e a zona de transição interfacial típica de concretos (Figura 6). Nos dias iniciais (0 a 7 dias), é possível observar alta porosidade do concreto com a superfície de transição fissurada ainda enfraquecida. Além

disso, aos 7 dias, ao longo da superfície do agregado é possível observar a ocorrência de uma interação da pasta com o agregado, típica de uma solidificação. Com 14 dias de idade, o concreto é caracterizado por ter uma matriz menos porosa com uma zona de transição e com aumento de aderência. De 21 a 28 dias de idade, a matriz mais sólida passou a apresentar uma redução significativa dos poros e na superfície do agregado fraturado, além de ser caracterizada também pela existência de interações dos componentes do cimento com o vidro.

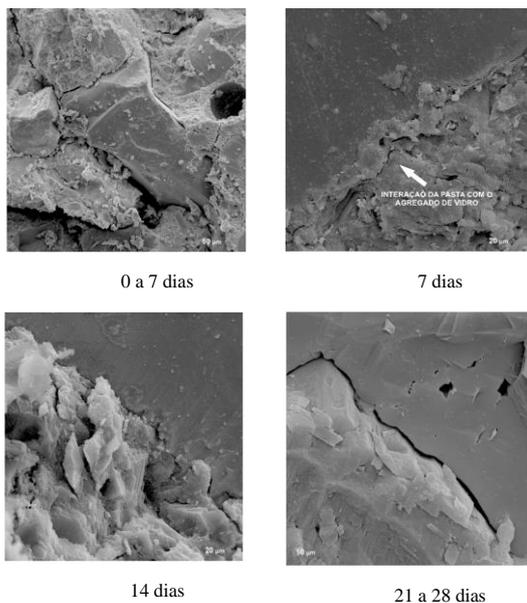


Figura 6 - MEV da superfície fraturada das amostras de concreto misturado com vidro de 0 a 28 dias.

Em princípio ao aumento da aderência e das interações acompanhado pela redução de poros podem ser atribuídos à ocorrência da produção de hidrato de silicato de cálcio (CSH) que é gerado durante a hidratação do cimento. Segundo Maraghechi et al., (2016)

e Mirzahosseini & Riding, (2015), no processo de hidratação do cimento as substâncias oriundas da reação do íon Ca^{2+} e os íons hidroxila (OH^-) para formar o CSH são precipitadas e funcionam como material de agregação. A variação do valor de pH, principalmente sua elevação no processo do CSH influenciam diretamente o vidro presente na estrutura do concreto.

Com o processo de endurecimento natural do cimento, ocorre a formação de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ que atua no sentido de dissolver o silicato do vidro. Durante o endurecimento do cimento é possível observar um processo de repolimerização do silicato do vidro cujo efeito principal é o preenchimento dos poros existentes no concreto. Esse efeito é mais significativo a partir do 15º dia, etapa em que ocorre um aumento na resistência. Segundo Birchall; Howard; Bailey, (1978), esse processo ocorre quando o cimento entra em contato com a água. O íon de Ca^{2+} , presente no cimento, é lixiviado formando uma solução de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, com vestígios de sílica em fase aquosa, essa superfície esgotada de grãos de cálcio são os ácidos salicílicos de baixa massa molecular interagindo com modelos de cálcio hidroxilados dissolvidos - tendo como principal o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ - sendo produzida uma membrana semipermeável de hidrato de silicato de cálcio na superfície do grão. Os autores ainda explicam que a pressão osmótica dentro da tal membrana provoca a ruptura e o surgimento de saliências ao passo que o conteúdo é extrudado na solução de hidróxido de cálcio circundante.



A presença de vidro no concreto, conforme mostrado no MEV, influenciam diretamente na produção de hidrato de CSH. Para Lu et al., (2017) existem várias razões que influenciam a interação do vidro no concreto:

1- Ocorre redução dos poros com a alcalinidade devido ao efeito da diluição e redução do coeficiente de difusão dos íons presentes no concreto;

2- Formação de CSH com baixa relação Ca/Si que, consequentemente, reduz significativamente a absorção de alta quantidade de álcalis;

3- Redução da permeabilidade da pasta de cimento o que reduz a migração dos álcalis devido à reatividade dos agregados; e

4- Aumento da capacidade de stress do concreto com a adição de agregados de vidros.

Em contrapartida, Rajabipour et al., (2015) afirma que os íons hidroxila (OH⁻) provenientes do Ca(OH)₂, formados com a adição de água no concreto, proporcionam uma reação nucleofílica e como consequência atacam a sílica para formar um gel de reação álcalis-sílica. Eventualmente os íons Ca²⁺ precipitam agregando os fragmentos de vidros, o que causa inchaços e fissuras com o tempo. Durante a precipitação é possível observar a dissolução e precipitação de substâncias provenientes do vidro, como a sílica entre outras substâncias, que irão compor o gel formado na reação álcalis-sílica.

A eficiência da agregação ao concreto para Bignozzi et al. (2015) e Shafaatian (2018), deriva do ta-

manho das partículas dos agregados de vidros. Evidentemente, a inclusão de partículas do vidro sobre a microestrutura melhora a resistência à compressão do concreto. Todavia, como relatado por Du e Tan (2014), essa melhora dependerá da composição do vidro que irá interagir com a massa de concreto. De acordo com Omram & Tagnit-Hamou (2016) e Cai; Xuan; Poon (2019) tamanhos médios de agregados de vidros acima de 10 µm com 10, 20 e 30% de incorporação melhoram a resistência à compressão, cujo efeito é observado em 28 dias de cura do concreto.

3.5 Análise estatística

A análise estatística buscou compreender a normalidade dos dados e suas interferências além de classificar estatisticamente qual a melhor proporção de substituição de areia por vidro. Para isso foi realizado primeiramente a análise do intervalo de confiança das médias. Na sequência foi realizada a análise de variância – ANOVA - com o intuito de validação dos dados.

Tabela 3 – Intervalo de Confiança das médias obtidas com a resistência axial

	Média	Desvio Padrão	Limite Inferior	Limite Superior
20% (0,2)	41,331	3,760	39,394	43,267
30% (0,3)	41,603	3,760	39,666	43,539
40% (0,4)	42,491	3,760	40,554	44,427
50% (0,5)	43,504	3,760	41,567	45,440
Conv	42,780	3,760	40,844	44,717

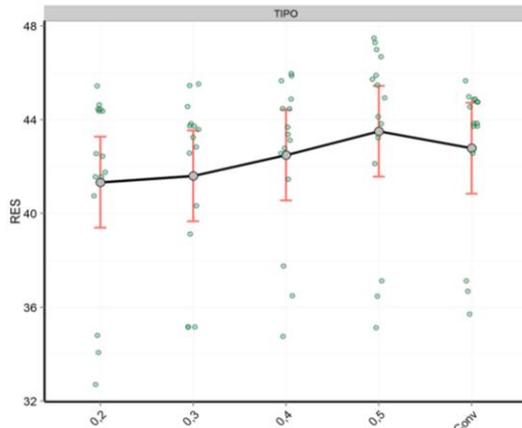


Figura 7 – Distribuição dos intervalos de confiança das médias de resistência à compressão axial

Na Figura 7 e na Tabela 3, têm-se as médias de todas as resistências medidas por quantidade de substituição de vidro e os respectivos intervalos de confiança. Nota-se que os cinco valores se diferenciam com relação à resistência que apresentam. Observando toda a distribuição vemos que a porcentagem de substituição de 50% possui resultado relativamente superior que os demais e que o valor de 40% é o mais próximo do valor do concreto convencional.

Tabela 4 – Resultado da ANOVA feito com os dados de resistência a compressão axial

	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
TIPO	4	47,00892395	11,75223099	0,831088535	0,509927732
Resíduos	70	989,8538292	14,14076899		

Tabela 5 – Efeito das resistências à compressão axial.

TIPO	Limite Inferior	Efeito	Limite Superior
20%	39,394	41,331	43,267
30%	39,666	41,603	43,539
40%	40,554	42,491	44,427
50%	41,567	43,504	45,440
Conv	40,844	42,780	44,717

O teste realizado arbitrou a hipótese nula (H0) de que as médias entre os experimentos dos diferentes traços e como hipótese alternativa (H1) de que as médias são diferentes. O teste foi realizado considerando o nível de significância de 5%. A Tabela da ANOVA (Tabela 4) apresentou o resultado da estatística F sendo 0,8310 e para o p-Valor 0,5099, o que faz rejeitar a hipótese nula de que as médias são iguais e fazendo com que seja aceita a hipótese de que as médias são diferentes. Dessa maneira a quantidade

de de vidro usada em suas porcentagens de substituição (Tabela 5) está influenciando nas medidas das suas respectivas influências.

A Figura 8 apresenta o gráfico de efeito. Trata-se de uma forma de visualizar as mudanças na resposta do processo a partir das alterações nos níveis dos fatores. Desta maneira pode ser avaliada a influência de cada fator separadamente. No caso aplicado pode ser inferido que a substituição parcial do vidro influencia a resposta, que é a resistência do concreto. Observa-se

que conforme ocorre à substituição aumenta a resistência, cuja substituição de 50% foi a recomendada para ser usada no aproveitamento do vidro como agregado no concreto.

Para que o modelo ajustado seja confiável, as suposições descritas no Diagnóstico do Modelo não podem ser violadas. Para verificar se existem outliers, analisamos se cada observação é outlier em Y. Pelo gráfico dos resíduos padronizados x valores ajustados, verifica-se que nenhum resíduo é maior, em módulo, que 3 o que leva a inferir que nenhuma observação é outlier em Y.

A normalidade dos resíduos é uma suposição essencial para que os resultados do ajuste do modelo de regressão sejam confiáveis. Para isso, deve ser verificado o gráfico de Probabilidade (QQ-Plot). No gráfico de Resíduos x Valores, apresentado na Figura 9, ajustado tem-se que os pontos não seguem uma tendência definida e além de pontos estarem próximo ao zero. Tal característica é indicio de que a variância dos resíduos é homocedástica, portanto tem-se uma variância constante dos erros experimentais, para observações distintas. No gráfico dos Resíduos x Ordem de Coleta da Figura 9, observa-se que os pontos não parecem ter uma tendência e por isso temos indícios de independência dos erros.

4 CONCLUSÃO

Comprovadamente as compressões axiais e trações por compressões diametrais nas proporções de 30, 40 e 50% aumentaram a par-

tir dos 28 dias. O concreto misturado com o pó de vidro apresentou melhor trabalhabilidade nas misturas com maior proporção.

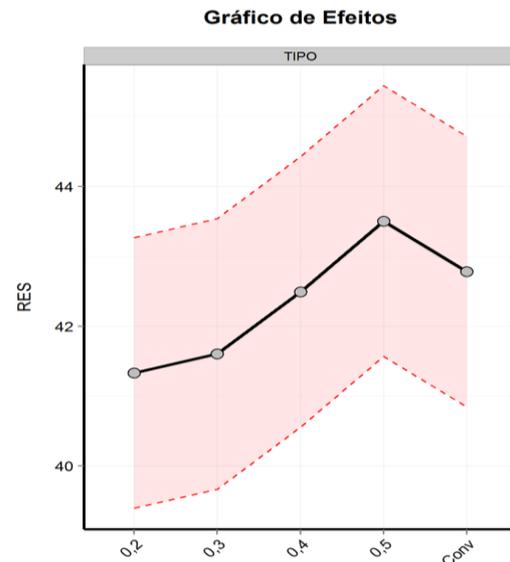


Figura 8 – Efeito das misturas na resistência

As resistências a compressões axiais e trações por compressões diametrais apresentaram resistência baixas em idades iniciais. Todavia, os ensaios de compressão e tração por compressão diametral para os corpos de prova a partir de 28 dias indicaram ligeiro aumento da resistência com a substituição da areia pelo pó de vidro. A ANOVA indica que a melhor proporção para adição de pó de vidro como substituinte da areia no concreto é da ordem de 50%. O MEV indica que o aumento dos valores de resistência está relacionado à força de ligação do silicato de cálcio hidratado e o pó de vidro que ocorrem durante a reação pozolânica.

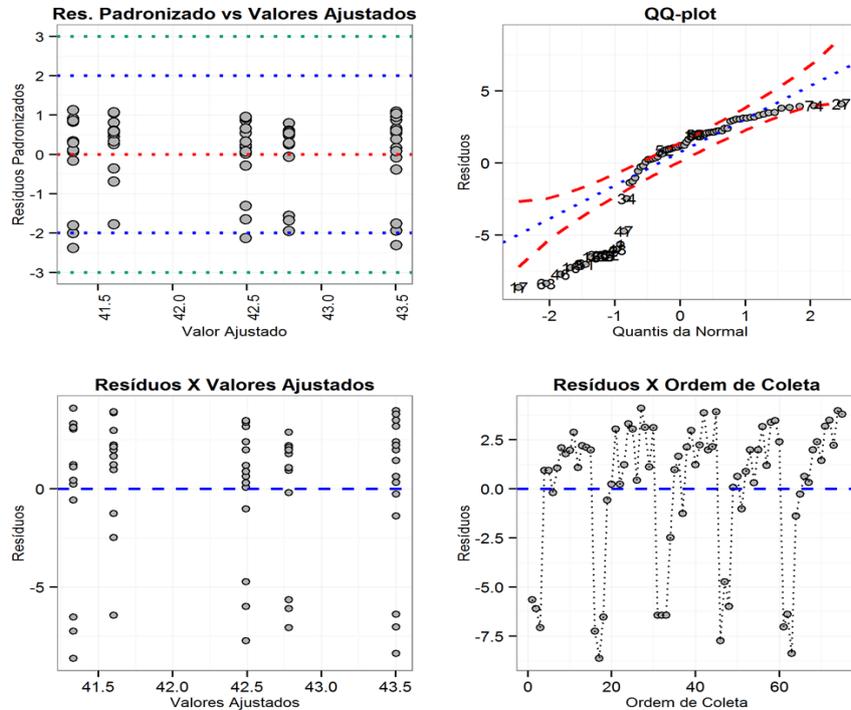


Figura 9 – Verificação de resíduos

Divulgação

Este artigo é inédito e não está sendo considerado para qualquer outra publicação. O(s) autor(es) e revisores não relataram qualquer conflito de interesse durante a sua avaliação. Logo, a revista *Scientia Amazonia* detém os direitos autorais, tem a aprovação e a permissão dos autores para divulgação, deste artigo, por meio eletrônico.

REFERENCIAS

ABNT. **Associação Brasileira de Normas Técnicas 9776: 1987. Agregados - Determinação da umidade superficial em agregados miúdos por meio do frasco de Chapman.**Rio de Janeiro, 1987. Disponível em: <www.abnt.org.br>

ABNT. **Associação Brasileira de Normas Técnicas 248: 2003 - Agregados -**

Determinação da composição granulométrica.Rio de Janeiro, 2003. Disponível em: <www.abnt.org.br>

ABNT. **Associação Brasileira de Normas Técnicas 45: 2006 - Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios.**Rio de Janeiro, 2006. Disponível em: <www.abnt.org.br>

ABNT. **Associação Brasileira de Normas Técnicas 5738: 2015 - Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova.**Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: <www.abnt.org.br>

AFSHINNIA, K.; RANGARAJU, P. R. Impact of combined use of ground glass powder and crushed glass aggregate on selected properties of Portland cement concrete. **Construction and Building Materials**, v. 117, p. 263–272, 2016.

ARULRAJAH, A. et al. Modulus of rupture evaluation of cement stabilized recycled glass/recycled concrete aggregate blends.



CIÊNCIA EXATAS E DA TERRA

Scientia Amazonia, v. 11, n.2, C21-C35, 2022

Revista on-line <http://www.scientia-amazonia.org>

<https://doi.org/10.5281/zenodo.7102378> - ISSN:2238.1910

Construction and Building Materials, v. 84, n. 03, p. 146–155, 2015.

BAZANT, Z. P. et al. Fracture mechanics of ASR in concretes with waste glass particles of different sizes. **Journal of Engineering Mechanics**, v. 126, n. 03, p. 226–232, 2000.

BIGNOZZI, M. C. et al. Glass waste as supplementary cementing materials: The effects of glass chemical composition. **Cement and Concrete Composites**, v. 55, p. 45–52, 2015.

BIRCHALL, J. D.; HOWARD, A. J.; BAILEY, J. E. On the Hydration of Portland Cement. **Proceeding of the Royal Society A**, v. 360, n. 1, p. 445–453, 1978.

BURSI, E. et al. Chelating Agent Treatment on Leaded Residuals from Glass Separated Urban Collection to Be Used in Cement Mortars. **Waste and Biomass Valorization**, v. 9, n. 12, p. 2493–2501, 2018.

CAI, Y.; XUAN, D.; POON, C. S. Effects of nano-SiO₂ and glass powder on mitigating alkali-silica reaction of cement glass mortars. **Construction and Building Materials**, v. 201, p. 295–302, 2019.

DU, H.; TAN, K. H. Effect of particle size on alkali-silica reaction in recycled glass mortars. **Construction and Building Materials**, v. 66, p. 275–285, 2014.

DYER, T. D.; DHIR, R. K. Evaluation of powdered glass cullet as a means of controlling harmful alkali-silica reaction. **Magazine of Concrete Research**, v. 62, n. 10, p. 749–759, 2010.

EPA. **Environmental Protection Agency - Facts and Figures about Materials, Waste and Recycling**. Washintong DC, 2018. Disponível em: <<https://www.epa.gov/facts-and-figures-about-materials-waste-and-recycling/national-overview-facts-and-figures-materials>>

GAUTAM, S. P.; SRIVASTAVA, V.; AGARWAL, V. C. Use of glass wastes as fine aggregate in Concrete. **Journal of**

Academic & Industry Research, v. 1, n. 6, p. 320–322, 2012.

IDIR, R.; CYR, M.; TAGNIT-HAMOU, A. Use of fine glass as ASR inhibitor in glass aggregate mortars. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 7, p. 1309–1312, 2010.

JÚNIOR, E. M. et al. Increasing the compressive strength of Portland cement concrete using flat glass powder. **Materials Research**, v. 17, p. 45–50, 2014.

LU, J. X. et al. Improving the performance of architectural mortar containing 100% recycled glass aggregates by using SCMs. **Construction and Building Materials**, v. 153, p. 975–985, 2017.

LU, J. X.; POON, C. S. Improvement of early-age properties for glass-cement mortar by adding nanosilica. **Cement and Concrete Composites**, v. 89, p. 18–30, 2018.

MARAGHECHI, H. et al. Effect of calcium on dissolution and precipitation reactions of amorphous silica at high alkalinity. **Cement and Concrete Research**, v. 87, n. September, p. 1–13, 2016.

MIRANDA, E. J. P.; PAIVA, A. E. M.; RODRIGUES, E. N. L. Influence of Waste Glass on the Physical Properties of Portland Cement Concrete. **Materials Science Forum**, v. 798–799, p. 576–581, 2014.

MIRZAHOSSEINI, M.; RIDING, K. A. Influence of different particle sizes on reactivity of finely ground glass as supplementary cementitious material (SCM). **Cement and Concrete Composites**, v. 56, p. 95–105, 2015.

MMA. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos**. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE Brasília- DF, 2012. Disponível em: <http://sinir.gov.br/images/sinir/Arquivos_diversos_do_portal/PNRS_Revisao_Decreto_280812.pdf>

OMRAN, A. F.; TAGNIT-HAMOU, A. Performance of glass-powder concrete in



CIÊNCIA EXATAS E DA TERRA

Scientia Amazonia, v. 11, n.2, C21-C35, 2022

Revista on-line <http://www.scientia-amazonia.org>

<https://doi.org/10.5281/zenodo.7102378> - ISSN:2238.1910

field applications. **Construction and Building Materials**, v. 109, n. 02, p. 84–95, 2016.

RAJABIPOUR, F. et al. Alkali-silica reaction: Current understanding of the reaction mechanisms and the knowledge gaps. **Cement and Concrete Research**, v. 76, p. 130–146, 2015.

SCHWARZ, N.; CAM, H.; NEITHALATH, N. Influence of a fine glass powder on the durability characteristics of concrete and its comparison to fly ash. **Cement and Concrete Composites**, v. 30, n. 6, p. 486–496, 2008.

SHAFATIAN, S. M. H. Performance of recycled soda – lime glass powder in mitigating alkali – silica reaction. **Green Materials**, v. 2, p. 1–12, 2018.

SHAYAN, A.; XU, A. Performance of glass powder as a pozzolanic material in concrete: A field trial on concrete slabs. **Cement and Concrete Research**, v. 36,

n. 3, p. 457–468, 2006.

TAHA, B.; NOUNU, G. Utilizing Waste Recycled Glass as Sand/Cement Replacement in Concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 1561, n. 11, p. 709–721, 2009.

TAN, K. H.; DU, H. Use of waste glass as sand in mortar: Part i - Fresh, mechanical and durability properties. **Cement and Concrete Composites**, v. 35, n. 1, p. 109–117, 2013.

TOPÇU, I. B.; CANBAZ, M. Properties of concrete containing waste glass. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 2, p. 267–274, 2004.

ZHENG, K. Pozzolanic reaction of glass powder and its role in controlling alkali-silica reaction. **Cement and Concrete Composites**, v. 67, p. 30–38, 2016.