

Análise da substituição da areia por resíduo de vidro no concreto autoadensável nas Propriedades Mecânicas e na Reatividade da Reação Álcali-agregado

Analysis of the replacement of sand by glass residue in self-adhesive concrete in the Mechanical Properties and the Reactivity of Alkali-aggregate Reaction

Análisis de la sustitución de arena por residuo de vidrio en hormigón autoadhesivo en las Propiedades Mecánicas y en la Reactividad de Reacción Álcali-agregado

Recebido: 03/11/2022 | Revisado: 12/11/2022 | Aceitado: 13/11/2022 | Publicado: 27/11/2022

Ana Paula Mota Alves

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7418-6800>
Alves Serviço de Engenharia Ltda, Brasil
E-mail: anapaulamotaalves@unifei.edu.br

Mirian de Lourdes Noronha Motta Melo

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9668-7799>
Universidade Federal de Itajubá, Brasil
E-mail: mirianmottamelo@unifei.edu.br

Paulo Cesar Gonçalves

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7391-9972>
Universidade Federal de Itajubá, Brazil
E-mail: pauloxg9@unifei.edu.br

Valquíria Claret dos Santos

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7744-3262>
Universidade Federal de Itajubá, Brasil
E-mail: valquiria@unifei.edu.br

Vander Alkmin dos Santos Ribeiro

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0260-2454>
Universidade Federal de Itajubá, Brasil
E-mail: vanderalkmin@gmail.com

Rafael Gonçalves Torres

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9926-154X>
Engenheiro Civil, Brasil
E-mail: rafael.gtorres@yahoo.com.br

Resumo

O objetivo desse trabalho foi investigar a viabilidade de produção de Argamassas Autoadensáveis (AAA) como uma fase inicial para produção de CAA, realizando a substituição da areia resíduo de vidro moído proporções de 5%, 10%, 15%, 20% e 30% em massa, utilizando como adição mineral a Sílica Ativa (AS) e como aditivo químico superplastificante (SPA). A busca por soluções para equacionar a crescente demanda da construção civil e a sustentabilidade na exploração de recursos naturais passa pela busca de novas fontes renováveis e utilização de resíduos, principalmente os que não são ainda satisfatoriamente absorvidos pela indústria da reciclagem, como o vidro. Amplamente utilizados em todo o mundo, o concreto e demais compósitos cimentícios são uma excelente alternativa para a absorção de resíduos de diversas origens, e vêm sendo aprimorados nas últimas décadas, como é o caso do Concreto Autoadensável (CAA). Para alcançar os objetivos propostos neste estudo, foram realizados ensaios das argamassas nos estados fresco e endurecido, análise de imagens geradas por microscopia eletrônica de varredura e investigação da ocorrência da Reação Álcali-Agregado. Os resultados mostraram que é viável a utilização de resíduo de vidro como substituto parcial da areia para a produção de CAA, uma vez que as argamassa auto adensáveis produzidas atenderam aos requisitos em estado fresco e tiveram, em maioria, suas propriedades mecânicas melhoradas, podendo inclusive atender às aplicações estruturais, como em reforços e reparos.

Palavras-chave: Resíduo de vidro; Concreto autoadensável; Reação álcali-agregado; Resistência a compressão.

Abstract

The objective of this work was to investigate the viability of the production of Self-Adhesive Mortars (AAA) as an initial phase for CAA production, performing the replacement of sand ground glass residue proportions of 5%, 10%, 15%, 20% and 30% by mass, using as mineral addition to Active Silica (AS) and as a superplasticizer chemical additive (SPA). The search for solutions to address the growing demand for civil construction and sustainability in the exploitation of natural resources involves the search for new renewable sources and the use of waste, especially those that are not yet satisfactorily absorbed by the recycling industry as glass. Widely used worldwide, concrete and other

cementitious composites are excellent for the absorption of residues from various origins and have been improved in recent decades, as for Self-Adensable Concrete (CAA). To achieve the objectives proposed in this study, mortar tests were performed in the fresh and hardened states, analysis of images generated by scanning electron microscopy, and investigation of the occurrence of Alkali-Aggregate Reaction. The results showed it is feasible to use glass residue as a partial substitute for the production of CAA, since the self-adhesive mortar produced met the requirements in a fresh state and had, in most, their mechanical properties improved, and can even meet structural applications, such as reinforcements and repairs.

Keywords: Glass residue; Self-adensable concrete; Alkali-aggregate reaction; Compressive strength.

Resumen

Este estudio investigó la viabilidad de la producción de mortero autoadensable (AAA) como fase inicial para la producción de CAA, realizando la sustitución de arena por Residuo de Vidrio Molido (%) en las proporciones de 5%, 10%, 15%, 20% y 30% en masa, utilizando como adición mineral a la Sílice Activa (AS) y como aditivo químico superplastificante (SPA). La búsqueda de soluciones para abordar la creciente demanda de construcción civil y sostenibilidad en la explotación de los recursos naturales implica la búsqueda de nuevas fuentes renovables y el uso de residuos, especialmente aquellos que aún no son absorbidos satisfactoriamente por la industria del reciclaje, como el vidrio. Ampliamente utilizados en todo el mundo, el hormigón y otros compuestos cementosos son una buena alternativa para la absorción de residuos de diversos orígenes, y han sido mejorados en las últimas décadas, como es el caso del hormigón autoadensable (CAA). Para lograr los objetivos propuestos en este estudio, se realizaron ensayos de mortero en estado fresco y endurecido, análisis de imágenes generadas por microscopía electrónica de barrido e investigación de la ocurrencia de Reacción Alcali-Agregado. Los resultados mostraron que es factible utilizar residuos de vidrio como sustituto parcial de la producción de CAA, ya que el mortero autoadhesivo producido cumplió con los requisitos en un estado fresco y, en la mayoría, sus propiedades mecánicas mejoraron, e incluso puede cumplir con aplicaciones estructurales, como refuerzos y reparaciones.

Palabras clave: Residuo de vidrio; Hormigón autoadensable; Reação alcali-agregado, Resistence to compressure.

1. Introdução

O setor da construção civil é o que mais consome recursos naturais e energia em toda sua cadeia produtiva. Com o constante crescimento da demanda e o avanço da tecnologia da construção, ultimamente tem-se observado um aumento considerável de edificações e de obras de infraestrutura. Por outro lado, o déficit de moradia e obras de arte que necessitam ser substituídas e, até mesmo, novas construções, pode nortear o consumo destes recursos naturais a um nível insustentável (Petek Gursel et al., 2014)

A busca de novas fontes renováveis ou de menor impacto é um problema a ser resolvido tanto do ponto de vista ambiental, como também da disponibilidade de recursos para se conseguir continuar construindo num futuro bem próximo. Vale ressaltar que as novas tendências na construção civil apontam, cada vez mais, para restrição da utilização de materiais de fonte naturais e, conseqüentemente, o aumento da demanda de materiais alternativos, como resíduos.

No Brasil, a resolução Conama n.º 307 estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil (CONAMA, 2002), e os municípios tendem a desenvolver planos e normatizar seus códigos de obras para o uso de resíduos na construção civil.

O concreto autoadensável (CAA) é um produto de origem recente que vem melhorar não só as propriedades, mas também o processo produtivo e a aplicação em relação ao tradicional concreto convencional vibrado (CCV) (Ali & Al-Tersawy, 2012). Adicionalmente, abre muitas possibilidades para o estudo do uso de outras fontes de insumos para produção, em especial o uso de resíduos de diversas origens, como é o caso do vidro (Faraj et al., 2020).

O resíduo de vidro é um dos resíduos mais gerados pelo ser humano devido à versatilidade de vidro utilizado na indústria de embalagens, eletrodomésticos e construção civil (Yoo et al., 2022; Ya. Pak et al., 2022). Anualmente, cerca de 14 milhões de toneladas de resíduos de vidro são produzidos na União Europeia e cerca de 11,38 milhões nos EUA destacam a urgência da reciclagem (Marvila et al., 2021) e no Brasil destacam 52 mil toneladas (Donadel & Ramos et al., 2022).

Uma vantagem importante do uso do vidro como resíduo é o fato de ser facilmente moído. Em comparação com outros resíduos, a energia necessária para reduzir as partículas de resíduos de vidro tamanho é muito menor (Sharma et al., 2022). No

entanto, isso também pode ser uma desvantagem em usar este material como resíduo, pois é mais provável que se desgaste por abrasão (Azevedo et al., 2020). Outra vantagem interessante dos resíduos de vidro é que é mais uniforme do que outros resíduos dentro do mesmo padrão de produção. Em outras palavras, o vidro da indústria de embalagens é homogêneo entre si (Sharma et al., 2022), que é uma vantagem importante para usar este material como resíduo.

Outro ponto importante do uso de resíduos de vidro é que o material pode aumentar a durabilidade dos materiais cimentícios (Torres et al., 2022). Alducin-Ochoa et al. (2021) avaliou a durabilidade de argamassas produzidas com resíduos de vidro substituindo parcialmente teores de até 25%. Os autores observaram que as argamassas de resíduos de vidro apresentaram desempenho superior em cristalização, congelamento e testes de choque térmico, sendo outros fatores de grande destaque devido a sua substituição.

Outra questão importante possibilitada pelo uso de resíduos de vidro é destacada por Xiao et al. (2022). Os autores verificaram a possibilidade de utilização de resíduos de vidro como material luminescente em argamassas decorativas. Este efeito só é possível com o uso de resíduos de vidro que, se usado corretamente permite a emissão de luz visível (brilho) devido à sua superfície luminescente. Além disso, no mesmo estudo, os autores comprovaram que os resíduos de vidro têm um alto desempenho mecânico.

Uma desvantagem preocupante do uso de resíduos de vidro é a possibilidade de ocorrer a Reatividade álcali agregado ou também chamado de “câncer do concreto”, sendo que isso ocorre devido ao alto teor de sílica amorfa e reativa na composição deste material, consequentemente isso pode causar fissuras e falhas nas estruturas de concreto. No entanto, como destacado por Duan et al. (2022), o uso de resíduos orgânicos, como tratamento de água potável, o lodo como substituto pode reduzir esse efeito. Outra possibilidade de reduzir este problema é promover a cura do material cimentício com resíduos de vidro na cura de CO₂, como destacado por Wang et al. (2022). Este tipo de cura provoca um aumento da resistência mecânica, redução do pH e permeabilidade do material.

Por outro lado, a adição com resíduo de vidro promove a ocorrência de uma reação álcali-agregado na superfície do vidro, gerando uma pressão no agregado de vidro. Essa pressão atua na direção oposta da típica expansão da reação álcali-agregado, mitigando o problema. Os álcalis do cimento reagem com agregados silicosos que resultam em formação de gel. O gel formado absorve a umidade e se expande seguido pela formação de rachaduras (Rasheed et al., 2022). Portanto, este problema não deve ser suficiente para descartar o uso de resíduos de vidro como substituto do agregado. O objetivo desse artigo visa investigar a influência da substituição de areia por resíduo de vidro nas propriedades mecânicas e na reação álcali agregado.

2. Metodologia

O método utilizado é a Experimental, pois envolve qualquer tipo de experimento que auxilie no desenvolvimento da pesquisa. E o estudo se configura numa abordagem quantitativa, pois após a aplicação da pesquisa e de posse dos dados coletados, chega-se à última etapa do trabalho, que é a apresentação dos resultados obtidos. Eles são compostos por números, dados, quadros e gráficos, que vão mostrar os resultados de forma quantitativa (Novaes et al., 2019).

Os materiais utilizados na dosagem do compósito cimentício com resíduo de vidro foram o cimento Portland, areia natural quartzosa, resíduo de vidro moído, sílica ativa, aditivo superplastificante e água. Será apresentado com detalhes as propriedades de cada um dos constituintes.

O aglomerante utilizado foi o cimento Portland CPV ARI Premium de alta resistência inicial da Empresa de Cimentos Liz S.A, ARI segundo classificação da (NBR 16697, 2018) e segundo a (ASTM C150/C150M – 18, n.d.) e a Tabela 1 apresenta as características físicas e químicas do cimento.

Tabela 1 - Característica do Aglomerante obtido na ficha técnica do fabricante. São apresentadas nas colunas da esquerda para a direita os Ensaio, a Metodologia, o valor e a unidade referente.

Norma ABNT NBR		Valor	Unidade
Massa específica (ABNT NBR 23:2001)		3,07	Kg/dm ³
Tempo de Pega (ABNT NBR 65:2003)	Início	137	min
	Fim	169	min
Resistência à compressão (ABNT NBR 7215:1997)	1 dia	25,9	MPa
	3 dias	42,2	MPa
	7 dias	49,6	MPa
	28 dias	59,1	MPa

Fonte: Adaptado de Empresa de Cimentos Liz S.A. (2021).

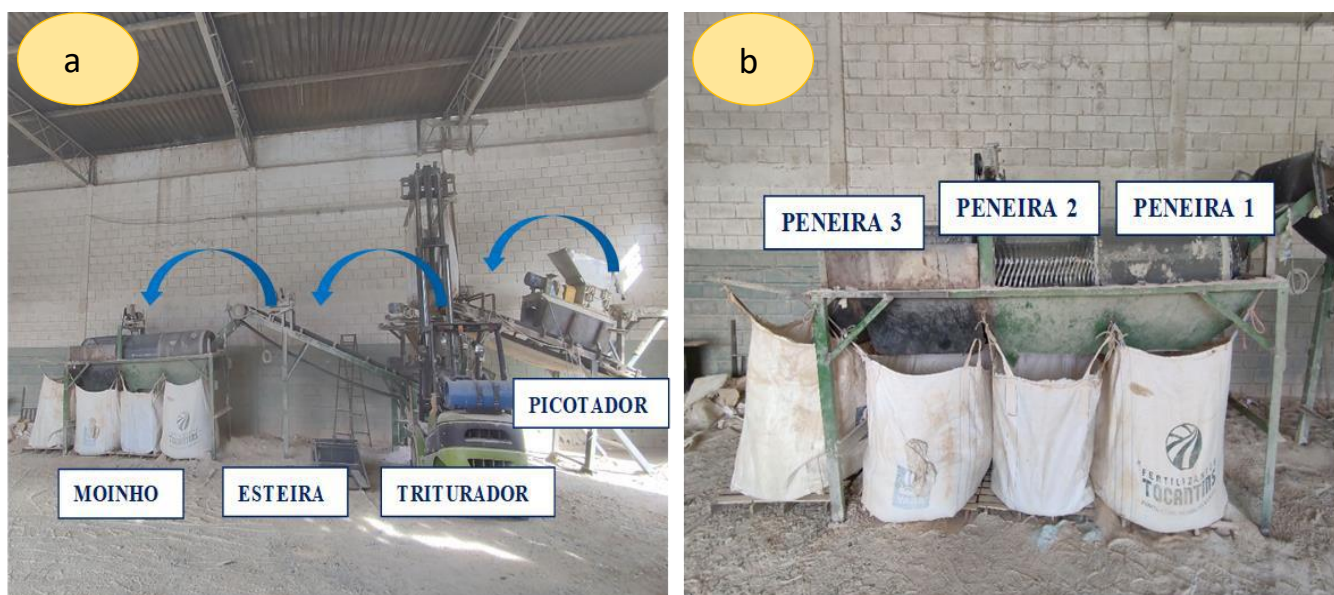
O Cimento CP-V ARI ou Cimento Portland de Alta Resistência Inicial: em função do seu processo de fabricação, tem alta reatividade nas primeiras horas de aplicação, fazendo com que atinja resistências elevadas em um curto intervalo de tempo. Ao final dos 28 dias de cura, também atinge resistências maiores que os cimentos convencionais. É muito utilizado em obras industriais que exigem um tempo de desforma menor. É recomendado apenas para a fabricação de concretos e possui massa específica aparente entre 0,9 g/cm³ a 1,2 g/cm³ e massa específica absoluta entre 2,8 g/cm³ e 3,2 g/cm³.

O agregado miúdo utilizado foi a areia média com granulometria abaixo de 4,8mm e tem origem no município de Itajubá, localizado no estado de Minas Gerais.

O resíduo de vidro triturado foi adquirido na empresa Raneri situada no município de Varginha-MG na qual realiza serviço de trituração de resíduos de vidro dos tipos laminado, temperado, espelho e para brisa de carros e revende para empresas de piso cerâmico e Jateamento.

Para chegar no estado final, os resíduos de vidro passam pelo processo de trituração na qual se inicia com o picotador, sendo colocado os resíduos de vidro que chegam na empresa, em seguida passam pelo triturador, conforme mostrado na Figura 1(a) e através de uma esteira vão para o moinho na qual possui três peneiras, separando o vidro em três granulometrias diferentes para comercialização, conforme mostrado na Figura 1(b).

Figura 1 - (a) Quatro etapas de trituração de resíduos de vidro. **(b)** Peneira com três granulometrias diferentes.



Fonte: Própria dos autores (2022).

Cada um desses sacos da Figura 1(b) armazena vidro com granulometria diferente de acordo com que passam pelas peneiras. A primeira peneira possui abertura de 5 a 10mm, a segunda peneira possui abertura de 1 a 5mm e a terceira é de 0 a 1mm. O saco da esquerda armazena o resíduo que não passou pelas peneiras no qual é colocado no triturador passando novamente pelo processo até conseguir passar pelas peneiras. Para este trabalho será utilizado o resíduo de vidro triturado da peneira 3 com a menor granulometria, na qual possui um aspecto de areia, conforme mostrado na Figura 2.

Figura 2 - Resíduo de vidro triturado. É possível verificar que o mesmo possui um aspecto de areia.



Fonte: Própria dos autores (2022).

A Sílica Ativa é um produto de origem metalúrgica, sendo um pó fino obtido através do processo de fabricação do ferro silício ou silício metálico. Por causa do alto teor de SiO_2 (no formato amorfo não cristalino) e da elevada finura (partículas esferas menores que $1\mu\text{m}$), a sílica ativa apresenta altíssima reatividade com os produtos decorrentes da hidratação do cimento, fazendo com que os concretos e argamassas possuam melhor desempenho. A sílica ativa utilizada como agregado nesta pesquisa foi fabricada pela empresa Palmyra do Brasil Indústria e Comércio de Silício Metálico.

A Tabela 2 mostra as características físicas e químicas da Sílica Ativa obtido na ficha técnica do fabricante.

Tabela 2 - Características físicas e químicas da Sílica Ativa obtido na ficha técnica do fabricante. Nas colunas da esquerda para a direita são apresentadas as propriedades, o resultado e a unidade referente.

Propriedades	Resultado	Unidade
Teor de SiO ₂	> 90	%
Massa Específica	2.220	Kg/m ³
Superfície Específica	19.000	m ² /Kg
Formato da Partícula	Esférico	-
Massa Unitária – Nao Densificado	< 350	Kg/m ³
Massa Unitária – Densificado	> 350	Kg/m ³

Fonte: Adaptado do Grupo Tecnosil (2022).

A Sílica Ativa é um pó fino pulverizado obtido do processo de fabricação do silício metálico ou ferro silício. Portanto é um produto de origem metalúrgica, o que lhe confere maior estabilidade quanto a sua composição química e física. No processo de fabricação do silício metálico, é gerado um gás (Si-O) que, ao sair do forno elétrico oxida-se formando a sílica amorfa (SiO), que é captada em filtros manga, em seguida armazenada em silos adequados e embalada em big bags e sacos de craft. As partículas da Sílica Ativa são esféricas, vítreas e possuem um diâmetro médio menor do que 1µm, apresentando altíssima superfície específica aparentemente baixa.

As suas partículas possuem o formato de uma esfera, diâmetro não superior a 0,2 µm (100 vezes menor que as do cimento, por exemplo), uma massa específica entre 2g/cm³ e 2,2g/cm³ (a do cimento possui 3g/cm³), além de massa unitária entre 200 e 500kg/m³ (considerada baixa, o que exige extrema habilidade durante o seu manuseio).

Um aditivo com efeito superplastificante de alta tecnologia ADITIBRAS ADI-SUPER H25 foi utilizado durante a confecção do concreto autoadensáveis. Este aditivo é formulado a base de polímeros de éteres carboxílicos modificados e uma das especialidades do ADI-SUPER H25 é para concreto autoadensáveis, conforme mostrado na Tabela 3.

Tabela 3 - Características físicas e químicas do superplastificante obtido na ficha técnica do fabricante. Nas colunas são apresentadas as Propriedades, a Metodologia segundo as normas, os resultados e unidades.

Propriedades	Metodologia	Resultado	Unidade
Aparência	ABNT NBR 11768:2019	Líquido Castanho Claro	-
Massa Específica	ABNT NBR 11768:2019	1,055 ± 0,020	g/cm ³
Ph	ABNT NBR 11768:2019	5,50 ± 1,0	-

Fonte: Adaptado da Ficha Técnica ADI-SUPER25 (2021).

São produtos líquidos, prontos para uso e isentos de cloretos. Atendem aos requisitos da norma (ABNT NBR 11768, 2019). Os aditivos classificados como Redutor de água tipo 2 (RA2) proporcionam elevada redução no consumo de água de concretos, quando comparado com aditivos redutores de água tipo 1, sem modificar sua consistência, além de poderem proporcionar significativo aumento no abatimento e na fluidez do concreto, sem alterar o consumo de água. Aditivos redutores de água podem produzir esses dois efeitos simultaneamente

É uma linha de aditivos superplastificantes de alta tecnologia. São formulados a base de polímeros de éteres carboxílicos modificados, que agem sobre as partículas de cimento apresentando um altíssimo efeito dispersante, de onde se obtém concretos

altamente fluidos com uma relação água/ligante total extremamente baixa, longa manutenção e elevadas resistências mecânicas iniciais e finais.

Possui efeito superplastificante com manutenção moderada da trabalhabilidade possibilitando a obtenção de altas resistências iniciais e finais. Versão com maior desincorporação de ar e Aparência: Líquido Castanho, Claro pH: $5,5 \pm 1,0$ e Massa Específica: $1,055 \pm 0,020$ g/cm.

Para obter o traço referência (TR) de AAA com a substituição do agregado miúdo por resíduo de vidro, foi adotado como base o traço desenvolvido por Silva (2019), onde foi utilizado o método proposto por Tutikian (2004).

A partir do traço desenvolvido por Silva (2019), o traço referência foi acertado fazendo as devidas adequações, começando com uma relação a/c de 0,30 e 0,50% de superplastificante em relação ao peso do cimento.

Após definido o TR, foram adicionados os resíduos de vidro reciclado (VR) em substituição do agregado miúdo, sendo o primeiro traço começando com proporção de 5% (T5) e os traços seguintes com 10% (T10), 15% (T15), 20% (T20) e 30% (T30).

Para a execução dos traços, foram adicionados primeiro os materiais secos (cimento, sílica ativa, areia e %), que foram misturados manualmente. Em seguida, à metade da mistura de secos foi adicionada cerca de 80% da água e misturados na argamassadeira, acrescidos em seguida o restante da mistura de secos e finalmente o SPA diluído no restante da água. O traço inicial está demonstrado na Tabela 4.

Tabela 4 - Traço Unitário em massa inicial de argamassa autoadensável (AAA).

Cimento	Sílica	Areia	SP	a/c	Consumo de cimento emKg / mt
1,0	0,10	2,00	1,0%	0,35	667,3

Fonte: Própria dos autores (2022).

Após a realização do traço inicial e realização dos ensaios no estado fresco, foram realizados ajustes obter a argamassa autoadensável, utilizando esse traço ajustado como o traço de controle, para comparação com os demais traços com substituição. A Tabela 05 demonstra os traços realizados na pesquisa.

Tabela 5 - Traço referência e com resíduo de vidro. São apresentados, em substituição do agregado miúdo, o primeiro traço começando com proporção de 5% (T5) e os traços seguintes com 10% (T10), 15% (T15), 20% (T20) e 30% (T30) .

Mistura	% Vidro	Cimento	Sílica	Vidro	Areia	a/c	SP	Consumo de cimento em KG / mt
TR	0	1	0,10	0,0	2	0,45	1,51	667,28
T5	5	1	0,10	0,10	1,9	0,45	1,51	667,28
T10	10	1	0,10	0,20	1,8	0,45	1,51	667,28
T15	15	1	0,10	0,30	1,7	0,45	1,51	667,28
T20	20	1	0,10	0,40	1,6	0,45	1,51	667,28
T30	30	1	0,10	0,30	0,70	0,45	1,51	667,28

Fonte: Própria dos autores (2022).

Após executar o traço, os ensaios do estado fresco e moldar os corpos de prova, espera-se pelo mínimo 24 horas para desmoldar esses corpos de prova os quais foram curados em uma cura úmida, submersos em água saturada de cal. De modo a garantir as características de argamassa autoadensável, os ensaios no estado fresco são os primeiros a serem feitos nos corpos de prova para verificar a sua característica autoadensável.

A Tabela 6 apresenta a quantidade, os ensaios e dimensões produzidas para cada ensaio para o grupo de corpo de prova produzido.

Tabela 6 - Traço referência e com resíduo de vidro. Na primeira coluna são apresentados os ensaios, seguindo pelo grupo 1 e 2 e as dimensões do corpo de prova.

Ensaio	Grupo 1		Dimensões do Corpo de Prova
Resistencia à compressão axial	3	2	cilindro Ø5x10cm
Resistência à tração por compressão axial	3	-	cilindro Ø5x10cm
Resistência à tração na flexão	3	-	prisma 4x4x16cm
Reatividade Álcali-agregado - Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado	-	3	barra 2,5x2,5x28,5cm

Fonte: Própria dos autores (2022).

Os corpos-de-prova com formato cilíndrico de dimensões de Ø5x10cm foram moldados com 5 corpos de prova para os ensaios de resistência à compressão axial, resistência à tração na flexão com formato de prisma com dimensões de 4x4x16cm e para reatividade Álcali-agregado - Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado no formato de barras com dimensões de 2,5x2,5x28,5cm.

2.1 Ensaio no estado fresco

De modo a avaliar as propriedades de argamassa autoadensável, os ensaios no estado fresco são os primeiros a serem feitos nos corpos de prova para verificar a sua característica autoadensável.

O ensaio de *mini v-funnel test* é utilizado para caracterizar a viscosidade, sendo o método proposto por Okamura & Ouchi (2003)(Hajime; et al., 2003) em que consiste em medir o tempo que a argamassa leva para passar pelo funil. Inicialmente, o funil é umedecido com água e preenchido até a sua borda superior com a argamassa, sem adensar. Após preenchido, a portinhola na parte inferior é aberta e inicia-se a marcação do tempo necessário para que toda a argamassa escoe pelo funil, conforme mostrado na Figura 3.

Okamura e Ouchi (2003), Nepomuceno et al (2012) e Rao et al (2015) definiram em seus trabalhos que o tempo para escoamento fique entre 7 e 11 segundos para que o tempo relativo de escoamento para argamassas fique próxima a 1 e (Gomes, Paulo César Correia; Barros, 2009) sugerem tempo de 5 a 10 segundos, resultando em R_m entre 1 e 2.

Figura 3 - Ensaio de viscosidade para obter o tempo de escoamento. Após preenchido, a portinhola na parte inferior é aberta e inicia-se a marcação do tempo necessário para que toda a argamassa escoe pelo funil.



Fonte: Própria dos autores (2022).

Para determinar a fluidez da argamassa, o ensaio de *mini-cone slump flow test* é utilizado para analisar a capacidade de escoamento da argamassa pela ação do seu peso próprio, obtendo o diâmetro de espalhamento, conforme mostrado na Figura 4.

Okamura e Ouchi (2003), Nepomuceno et al (2012) e Rao et al (2015) definiram em seus trabalhos que o diâmetro fique entre 240 mm e 260 mm e para Gomes e Barros (2009), o valor do parâmetro de fluidez (G_m) deve ficar entre 3 e 8.

Figura 4 - Execução do ensaio de fluidez para obter o diâmetro de espalhamento. Utilizado para analisar a capacidade de escoamento da argamassa pela ação do seu peso próprio, obtendo o diâmetro de espalhamento.



Fonte: Própria dos autores (2022).

Nos corpos de prova no estado endurecido foram utilizados os ensaios de ensaios de resistência a compressão axial, tração por flexão a 3 pontos e Reatividade Álcali agregado , conforme mostrado na Tabela 7.

Tabela 7 - Ensaio aplicados na Argamassa Auto Adensável no estado endurecido. Na primeira coluna são apresentados os ensaios, seguido pela norma ABNT e as dimensões do corpo de prova.

Ensaio	Norma ABNT	Dimensões do Corpo de Prova
Resistencia à compressão axial	NBR 5739:2018b	cilindro Ø5x10cm
Resistência a tração na flexão a 3 pontos	NBR 13279 (2010)	prisma 4x4x16cm
Reatividade Álcali-agregado	NBR 15577-4 (ABNT, 2018)	barra 2,5x2,5x28,5cm

Fonte: Própria dos autores (2022).

A desmoldagem dos corpos de provas foram após 24h da moldagem e submersas em água com 5% de cal até a data de realização dos ensaios aos 28 dias, conforme mostrado na Figura 5.

Figura 5 - Corpos de prova submersos. Etapa necessária para a desmoldagem dos corpos de provas após 24h da moldagem.



Fonte: Própria dos autores (2022).

O método de cura indicado pela norma brasileira ABNT NBR 5738 (2018) para corpos-de-prova cilíndricos e prismáticos de concreto de cimento Portland estabelece que os corpos-de-prova devem ficar imersos em água ou permanecer em câmara úmida, ou ficar enterrados em areia completamente saturada de água, até início do ensaio, ou seja, até a data de ensaio à compressão ou à flexão.

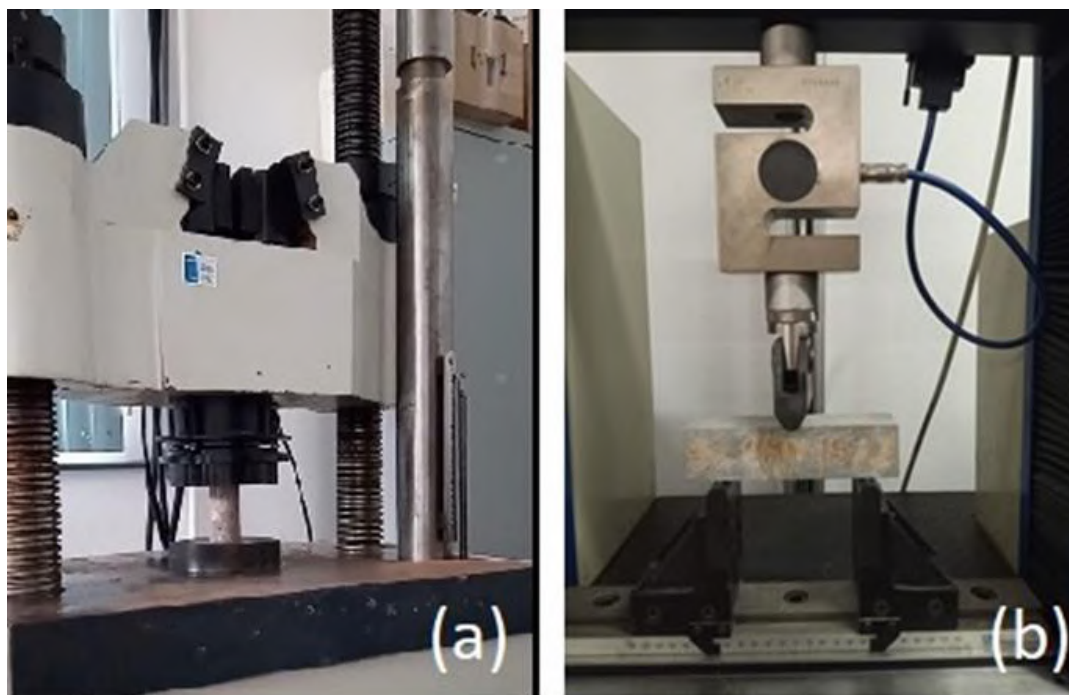
Os ensaios para determinação da resistência a compressão axial para argamassas foram realizados segundo a NBR 5738 (2018) utilizando a máquina INSTRON 8801, conforme mostrado na Figura 6 (a). As bases dos corpos de provas confeccionados em formato cilíndricos com 50mm de diâmetro e 100mm de altura e imersos em cura úmida até o período de 28 dias foram preparadas por uma retificadora e foram rompidos com uma carga de $0,45 \pm 0,15$ MPa/s aplicado até a ruptura do corpo de prova.

O ensaio de compressão é feito em corpo-de-prova cilíndrico que deve ser posicionado de modo que, quando estiver centrado, seu eixo coincida com o da máquina de ensaio, de modo que a resultante das forças passe pelo centro. Além da carga de ruptura interessa saber o tipo de ruptura.

O ensaio de resistência a tração na flexão a 3 pontos foi realizado conforme a NBR 13279 (2010). O ensaio de flexão consiste na aplicação de uma carga crescente em determinados pontos de uma barra bi apoiada, em geral conforme mostrado na Figura 6 (b), os ensaios são de dois tipos sendo o ensaio de flexão 3 pontos.

Durante o ensaio foram monitoradas a carga aplicada e a deflexão da barra, o ensaio de flexão foi caracterizado por trabalhar apenas no regime elástico de deformação até a fratura ou deformação de 5% do CP. A ABNT NBR 13279 (1995) indica o cálculo da resistência à tração na flexão, para prismas de 40x40x160mm.

Figura 6 - Ensaio no estado endurecidos realizados (a) resistência à compressão axial (b) resistência a tração na flexão.



Fonte: Própria dos autores (2022).

Para os ensaios sobre ocorrência da Reação Álcali Agregado foi realizada moldagem de corpos de prova para o ensaio de determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado, realizado com base na (ABNT NBR 15577-4, 2009). Considerando a característica de autoadensabilidade do material, não foi realizada a etapa de adensamento manual com os golpes previstos em norma.

Os traços utilizados para a realização deste ensaio foram os mesmos para a realização dos ensaios no estado endurecido, ou seja, com proporções diferentes e adições inexistentes na norma, porém com o objetivo de avaliar justamente o efeito da autoadensabilidade e do resíduo de vidro.

Entretanto, para efeito de comparação, um traço seguindo a dosagem de argamassa determinada no item 6.3 da norma foi executado, porém com a substituição de 30% de resíduo de vidro. A Figura 7 mostra um conjunto de barras após a moldagem de Argamassa Auto Adensável.

Figura 7 - Corpos de prova moldados para ensaio de ocorrência de Reação Álcali Agregado.



Fonte: Própria dos autores (2022).

O ensaio consiste em, após a moldagem, manter os corpos de prova em cura úmida por 24 horas e após esse período, identificá-las e levá-las para imersão em água a temperatura ambiente em recipiente selado. O recipiente é levado a uma estufa ventilada ou banho termo regulador por 24 horas, aquecendo durante até 80°C em (6 ± 2) h. Em seguida, a leitura inicial das barras de argamassa é realizada, retirando uma de cada vez da água e colocadas no comparador (em posição a ser marcada para que as próximas leituras sejam sempre na mesma posição), giradas lentamente 360° e anotada a menor leitura. Após a primeira leitura, as barras devem ser todas colocadas em outro recipiente, totalmente imersas em uma solução de NaOH $(1,0 \pm 0,1)N$ à temperatura de (80 ± 2) °C, selando e retornando o recipiente à estufa ou banho termo regulador. As barras devem permanecer nesta condição por mais 28 dias, sendo realizadas leituras aos 14 dias e 28 dias de imersão na solução, além de leituras intermediárias para acompanhar a evolução das expansões.

3. Resultados e Discussão

A Tabela 8 mostra os valores da composição granulométrica do agregado miúdo, sendo que o valor encontrado para o diâmetro máximo da areia é de 4,75 mm, sendo classificados como agregado miúdo, pois seu diâmetro está situado entre 0,075 mm e 4,8 mm e o valor do módulo de finura (MF), para o agregado miúdo foi de 2,20. Os resultados demonstram que há uma maior quantidade, em porcentagem, ou seja, de massa retida de grãos do agregado miúdo foi de 0,15 mm.

Tabela 8 - Tabela de Granulometria da Areia. Valores da composição granulométrica do agregado miúdo, sendo que o valor encontrado para o diâmetro máximo da areia é de 4,75 mm

Abertura da peneira (mm)	% retida	% retida acumulada
9,50	0	0
6,30	0	0
4,75	0	0
2,40	9,1	9,1
1,20	11,1	20,1
0,60	17,1	37,2
0,30	24,1	61,4
0,15	30,5	91,9
< 0,15	8,1	100,0
Massa específica (g/cmt)	2,67	
Módulo de Finura	2,20	
Diâmetro Máximo (mm)	4,75	
Massa Unitária (g/cmt)	1,69	
Material fino (passante 0,075mm) (%)	1,18	

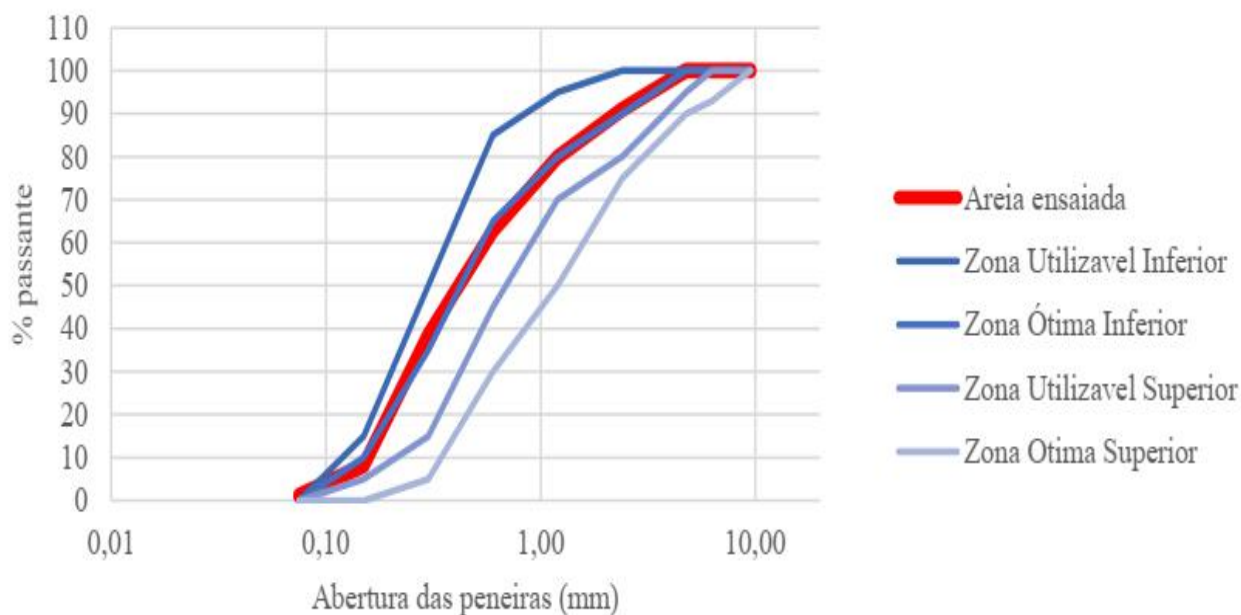
Fonte: Própria dos autores (2022).

Com o ensaio granulométrico pode-se observar também que o resíduo de vidro possui frações granulométricas bem pequena, na sua maior quantidade apresenta diâmetro menor que 0,6 mm, conforme pode observar na Tabela 7.

A Figura 8 mostra as curvas granulométricas da areia. As curvas da distribuição granulométrica mostram que a areia é pertencente a faixa da zona utilizável inferior, pois o módulo de finura está na faixa de valores entre 1,55 e 2,20.

Segundo a (ABNT 7211, 2019), através da faixa de valores do agregado miúdo, observou-se que o valor do módulo de finura da areia é classificada como areia fina ($1,55 < MF < 2,20$).

Figura 8 - Curva Granulométrica da Areia. As curvas da distribuição granulométrica mostram que a areia é pertencente a faixa da zona utilizável inferior, pois o módulo de finura está na faixa de valores entre 1,55 e 2,20.



Fonte: Própria dos autores (2022).

A curva da areia na Figura 8 a ser utilizada no experimento ficou dentro da curva granulométrica utilizável como agregado miúdo. Pelo fato da proposta é utilizar o resíduo de vidro em substituição ao agregado miúdo, o resíduo de vidro seguiu as mesmas normas de ensaio granulométrico que a areia.

A Tabela 9 mostra os valores da composição granulométrica do resíduo de vidro. Para o diâmetro máximo (DM), o valor encontrado para o resíduo de vidro é 1,20 mm, sendo classificados como agregado miúdo, pois seu diâmetro está situado entre 0,075 mm e 4,8 mm e o valor do módulo de finura (MF) para o resíduo de vidro e de 2,73.

Os resultados demonstram que há uma maior quantidade, em porcentagem, ou seja, de massa retida de grãos de resíduo de vidro na peneira com abertura de 0,30 mm. Observando a granulometria da amostra de areia em relação ao resíduo de vidro, pode-se observar que o resíduo de vidro apresenta uma distribuição granulométrica similar ao da areia.

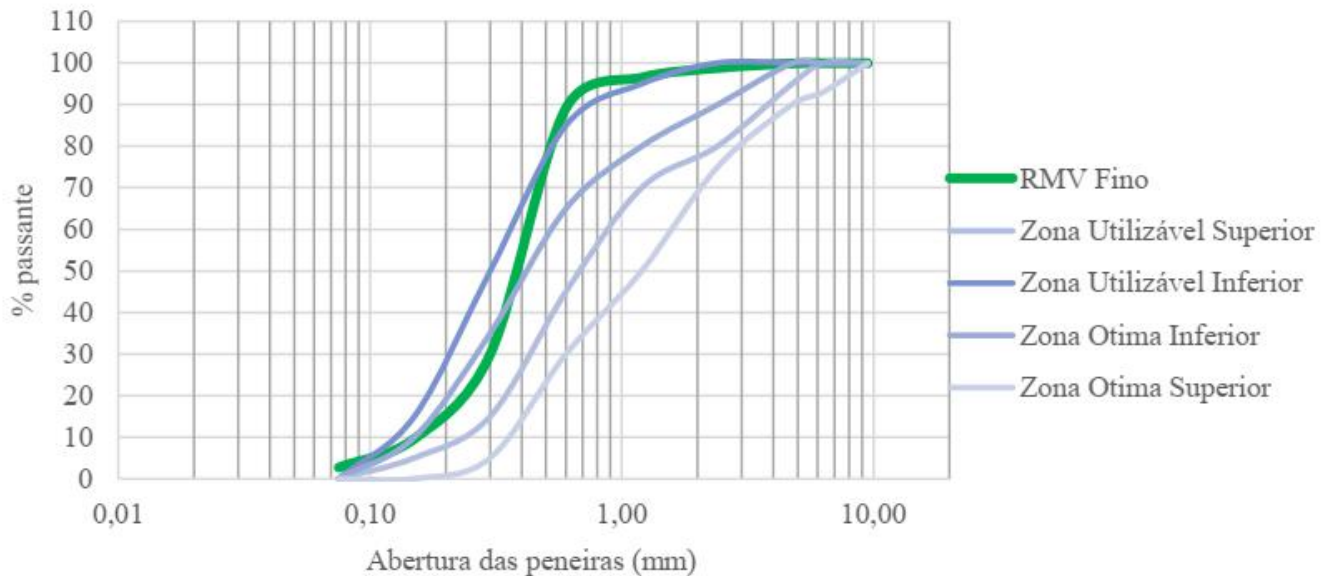
Tabela 9 - Composição da granulometria do resíduo de vidro. Na primeira coluna são apresentados os valores de abertura da peneira em mm, seguido pelas proporções retida, acumulada e passante.

Abertura da peneira (mm)	% retida	% retida acumulada
4,75	0,08	0,08
2,4	1,12	1,20
1,2	2,28	3,48
0,6	7,35	10,84
0,3	59,17	70,00
0,15	20,35	90,35
0,075	6,93	97,28
Fundo	2,72	100,00
Massa específica (g/cmt)	2,55	
Módulo de Finura	2,73	
Diâmetro Máximo	1,2	
Massa Unitária (g/cmt)	1,24	

Fonte: Própria dos autores (2022).

A Figura 9 mostra as curvas granulométricas do resíduo de vidro. As curvas da distribuição granulométrica mostram que o resíduo de vidro é pertencente a faixa da zona ótima, pois o módulo de finura está na faixa de valores entre 2,20 e 2,90. Segundo a ABNT 7211 (2019) através da faixa de valores do agregado miúdo, observou-se que o valor do módulo de finura do resíduo de vidro é classificada como areia grossa (MF >2,71).

Figura 9 - Curva granulométrica do resíduo de vidro. As curvas da distribuição granulométrica mostram que o resíduo de vidro é pertencente a faixa da zona ótima, pois o módulo de finura está na faixa de valores entre 2,20 e 2,90.



Fonte: Própria dos autores (2022).

A diferença entre o volume de cada grupo de dimensão máxima de grão do resíduo de vidro original pode ser verificada visualmente na Figura 10, que mostra os grupos acondicionados em embalagens plásticas após a separação. A diferença entre o volume de cada grupo de dimensão máxima de grão do resíduo de vidro original pode ser verificada visualmente na Figura 11.

Figura 10 - Resíduo de vidro separado por dimensão de grãos retidos nas peneiras.



Fonte: Própria dos autores (2022).

Figura 11 - Resíduo de vidro fino original separado em grupos por dimensão máxima de grão.



Fonte: Própria dos autores (2022).

Após a separação foi feito o cálculo da quantidade necessária para os traços a serem realizados, chegando a um peso total de resíduo de vidro a ser construído. Assim, seguindo aproximadamente os percentuais de grãos retidos nas peneiras da

areia, foi feita a pesagem de cada grupo na quantidade necessária e em seguida a mistura dos grupos, chegando a um resíduo de vidro com granulometria próxima à da areia que seria utilizada e substituída.

Os resultados do ensaio de viscosidade plástica aparente “*Funil V*” (R_m) das argamassas são mostrados na Tabela 10 e foram realizados conforme método de Okamura e Ouchi (2003). Foi adotado um valor mínimo para R_m de 1 e máximo de 2, portanto, sendo o escoamento menor que 10 segundos. Os valores de tempo de escoamento das amostras do Grupo 1 ficaram entre 7 e 10 segundos, e o R_m com valores entre 1,0 e 1,4. Todos os traços, com exceção do 30 % para o Grupo 2, tiveram tempos de 7 a 10 segundos, o que resultaram em R_m entre 1 e 2, desta forma, dentro do intervalo considerado como aceitável para produzir argamassas para compor um concreto autoadensável, e coerentes com os encontrados em outro estudo. Assim como nos resultados de G_m , os valores de R_m não apresentaram relação proporcional, crescente ou decrescente em relação ao percentual de substituição, diferente dos resultados de Tuam et al. (2018) que observou um aumento proporcional.

Tabela 10 - Resultados do ensaio de viscosidade plástica aparente são apresentados os valores do Tempo e R_m .

TRAÇO (%)	Grupo 1		Grupo 2	
	t (s)	R_m	t (s)	R_m
0	7	1,4	7	1,4
5	9	1,1	9	1,1
10	7	1,4	9	1,1
15	8	1,3	8	1,3
20	10	1,0	7	1,4
30	8	1,3	11	0,9

Fonte: Própria dos autores (2022).

Analisando os valores de R_m traços é possível perceber que todos os traços com substituição tiveram resultados iguais ou inferiores aos traços controles, evidenciando um aumento da viscosidade com o uso do resíduo de vidro.

Os resultados do ensaio de espalhamento da argamassa autoadensável pelo “*Slump flow test*” são mostrados na Tabela 11 e foram realizados conforme o Método proposto por Okamura e Ouchi (2003). O cálculo de G_m , resultou em valores entre 5,9 e 7,3 o que corresponde a diâmetros médios de 26,3 a 28,8 cm para os traços do Grupo 1, e valores de 3,6 a 7,1 com diâmetros médios de 21,5 a 28,5 cm para os traços do Grupo 2.

Tabela 11 - Resultados do ensaio de espalhamento da argamassa autoadensável pelo “*Slump flow test*”.

Traço (%)	Grupo 1			Grupo 2		
	d1 (cm)	d2 (cm)	G_m	d1 (cm)	d2 (cm)	G_m
0	28,0	27,5	6,7	28,50	28,50	7,1
5	26,5	26,0	5,9	24,50	24,50	5,0
10	27,5	27,5	6,6	24,50	24,50	5,0
15	27,5	27,5	6,6	26,50	26,50	6,0
20	28,5	29,0	7,3	23,50	24,50	4,8
30	26,0	26,5	5,9	21,50	21,50	3,6

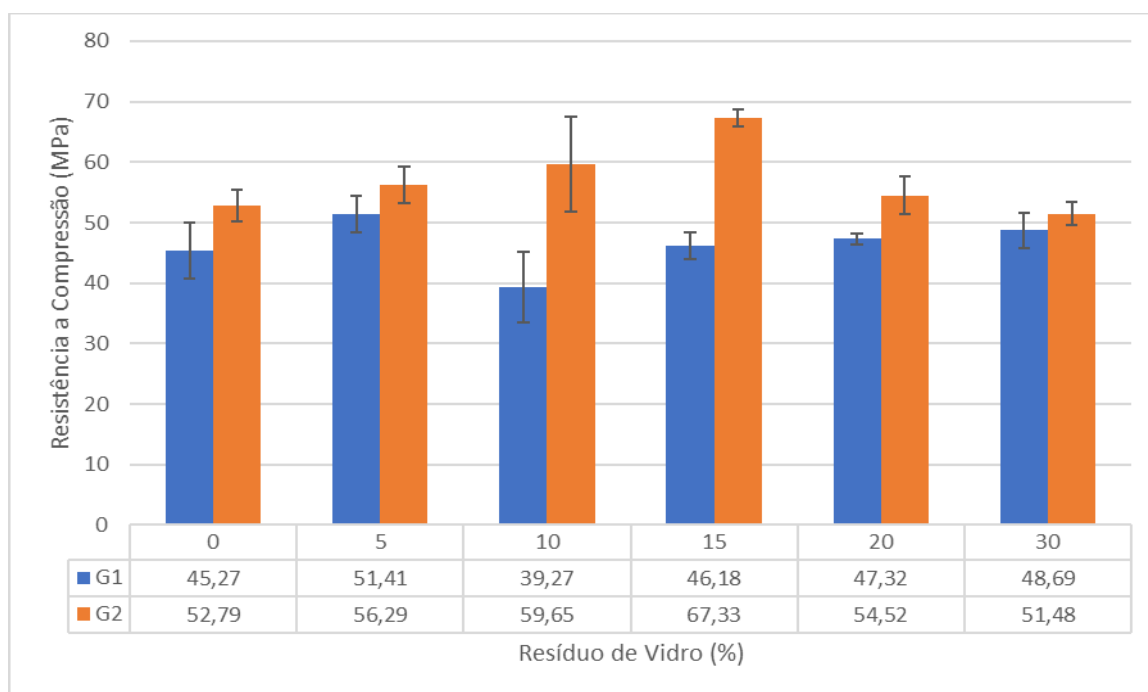
Fonte: Própria dos autores (2022).

Os resultados mostram que, adotando o intervalo sugerido por Gomes e Barros (2009) de $3 > G_m > 8$, todos os traços tiveram o parâmetro de fluidez aceitável para AAA. Em comparação com o traço controle (0 %), que teve $G_m=6,7$ no Grupo 1 e $G_m=7,1$ no Grupo 2, a média de G_m dos traços com substituição de areia por % foi de 6,4 no Grupo 1 e 4,9 no Grupo 2.

O estudo de Tuum et al. (2018) em traços de argamassa auto adensável contendo resíduo de vidro encontrou dimensões de diâmetro médio entre 242 mm e 255 mm para as misturas com os mesmos teores de substituição do presente estudo, porém aquele estudo variou a dosagem de superplastificante proporcionalmente ao aumento do resíduo de vidro, enquanto no presente estudo a dosagem foi mantida a mesma para todos os traços. De modo geral, exceto o traço com 20% do Grupo 1, todos os demais resultaram em misturas com uma deformabilidade menor em relação aos seus respectivos traços controle.

A Figura 12 mostra os ensaios de resistência à compressão axial foram realizados após 28 dias de cura submersa para todos os traços da argamassa auto adensável, dos grupos 1 e 2.

Figura 12 - Resistência a Compressão dos Grupos 1 e 2 aos 28 dias.



Fonte: Própria dos autores (2022).

Todas as amostras com incorporação de resíduo de vidro apresentaram valores de resistência média à compressão superiores aos limites que atendem os requisitos de classificação como argamassa estrutural, bem acima do valor médio aos 28 dias de 17,2 MPa, especificado pela norma ASTM C270-10 (2019).

No Grupo 2 foram moldados e ensaiados apenas dois corpos de prova, pois o objetivo principal da execução dos traços foi de moldar as barras para o ensaio de Reação Alkali Agregado, entretanto pretendia-se também verificar se os traços se repetiriam em condições no estado fresco e no endurecido, para isso verificando apenas a resistência à compressão, diferentemente de alguns resultados apresentados na literatura, nos quais o uso de resíduos de vidro reciclado como substituição da areia em materiais cimentícios indicaram diminuição da resistência à compressão quando comparado com traço de controle (Ali & Al-Tersawy, 2012).

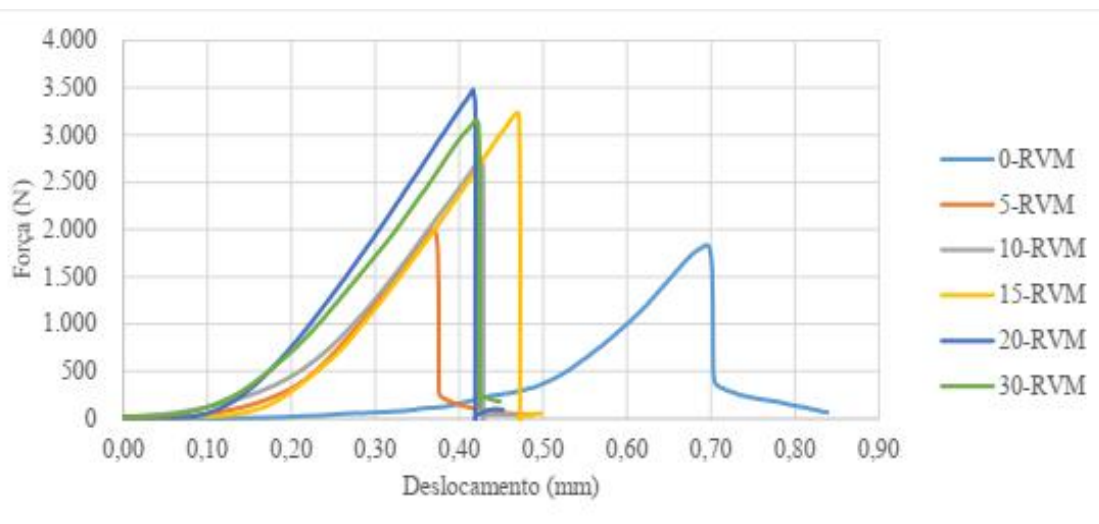
Pode-se perceber que apenas o traço da argamassa autoadensável com a proporção de substituição de 10% de resíduo de vidro do Grupo 1 apresentou redução da resistência em 6%, em comparação com os resultados do traço referência. Para o mesmo teor de substituição no traço do Grupo 2, a resistência média foi maior do que a do Grupo 1 e acima dos traços referência.

Os demais traços do Grupo 1 apresentaram aumento da resistência à compressão, cujo destaque foi traço 5 % que obteve um aumento de 6,14% em relação ao traço referência, seguido do traço 30 % com aumento de 3,42%. No Grupo 2 apenas o traço 30 % apresentaram uma pequena queda na resistência em relação ao traço controle, onde destaque foi para o traço 15% seguido do traço 10 %, com aumentos de 14,54% e 6,86%, respectivamente. No Grupo 1, os traços com teor de substituição de 15% e 20% de areia por resíduo de vidro tiveram um pequeno aumento, porém um valor acima do traço de referência e também foi observado mesmo comportamento no Grupo 2, nos traços de 5% e 20%.

A variação de resultados de resistência também foi observada no trabalho de Ahmad et al. (2021), cuja incorporação com resíduos de vidro em substituição do cimento, apresentaram aumento da resistência a compressão em até 20%, depois diminuiu gradualmente, conforme observado nos resultados do concreto com 30% de resíduos de vidros, em comparação com o concreto controle.

Os ensaios de resistência à tração na flexão a três pontos foram realizados após 28 dias de cura submersa para todos os traços de argamassa autoadensável, conforme mostrado na Figura 13. O ensaio fornece dados da força e o respectivo deslocamento no ponto de aplicação da força para cada amostra, com os quais foi possível traçar as curvas de Força em função do deslocamento para todas as amostras.

Figura 13 - Curvas de Força em função do deslocamento para diferentes traços de argamassa autoadensável.



Fonte: Própria dos autores (2022).

Das três amostras de cada traço, foi selecionada a curva média em termos de valores de deslocamentos para o propósito de comparação dos resultados, conforme mostrada na Figura 13, percebe-se que o traço referência apresentou o menor valor de força de pico e uma rigidez muito reduzida ao deslocamento vertical no início do ensaio. Os prismas de traços com substituição por resíduo de vidro obtiveram um menor valor de deslocamento para atingir um valor máximo da força, porém com maiores valores de força do que o traço referência.

Os valores dos espécimes com substituição de resíduo de vidro apresentaram no pico da curva, a força máxima aplicada superior ao obtido pelo corpo de prova referência. Quanto ao comportamento das curvas desses corpos de prova, pode-se entender que seja comportamento típico de materiais quase-frágeis, como argamassas e concreto, quando submetido a tensões de tração na flexão.

Pode-se observar nos resultados apresentados na Figura 13, que logo após o ensaio atingir o pico de carga, provavelmente ocorrem as primeiras fissuras na parte tracionada do corpo de prova, e observa-se uma parte descendente da curva de forma brusca. Este fato está associado a reduzida resistência dos materiais quase-frágeis. O fenômeno que ocorre quando a

força máxima é atingida está relacionado com a superação da resistência à tração do material com consequente início do estado de fissuração. A rigidez é reduzida abruptamente e o corpo de prova passa a não absorver mais carga.

Porém, é importante ressaltar que, diferentemente dos materiais que apresentam comportamento de escoamento, como o aço, os materiais quase-frágeis desenvolvem uma região denominada coesiva à frente das primeiras fissuras. Nesta região de micro fissuração, o volume do material está parcialmente destruído, porém, ainda continua a transferir tensões entre as seções adjacentes, fenômeno denominado de fratura coesiva. O corpo de prova com material quase-frágil apresenta, na primeira parte da curva, um aumento contínuo de absorção de carga com desenvolvimento de deformações, até o pico de carga.

Após o pico de carga, ocorre um estado de fissuração e o corpo de prova passa a apresentar um decréscimo de carga com pouco desenvolvimento de deformação. Nesta segunda parte da curva ocorre o denominado amolecimento do material.

A Tabela 12 mostra os resultados de força, deformação máxima, resistência à tração na flexão (R_f), além da comparação deste último resultado em relação ao traço referência e a proporção em relação a resistência à compressão.

Tabela 12 - Resultados do ensaio de resistência à tração na flexão.

TRAÇO	Força máxima (N)	Deformação na força máxima (mm)	Resistência à tração		
			R_f (MPa)	Varição em relação ao traço referência (%)	Proporção em relação à resistência à Compressão (%)
0 %	1.918	0,5160	3,30	-	7,3
5 %	1.923	0,4051	3,31	0,3	6,4
10 %	2.608	0,3977	4,48	36,0	11,4
15 %	2.941	0,4601	5,05	53,3	10,9
20 %	3.026	0,4105	5,20	57,8	11,0
30 %	3.300	0,4333	5,67	72,0	11,6

Fonte: Própria dos autores (2022).

A Tabela 13 mostra os dados dos ensaios da expansão em barras da argamassa pelo método acelerado para o grupo de barras de referência, sem substituição de areia por resíduo de vidro com o número de dias a partir do primeiro em solução e as medidas de variação em relação à barra padrão em cada idade.

A partir da medida de variação são calculados, para cada idade: os comprimentos totais das barras em cada idade, somando a variação à medida da barra padrão; a média de comprimento total das barras; a variação média acumulada através da diferença entre a medida em cada idade e a medida inicial; e a variação média acumulada em percentual.

Tabela 13 - Ensaio de expansão pelo método acelerado para o traço referência 0 %.

GRUPO	AAA CONTROLE - 0% %				
Dias a partir do 1º na solução	Leitura inicial	5	20	22	29
Variação (mm)					
Barra 1	5,165	5,221	5,341	5,402	5,608
Barra 2	6,118	6,160	6,231	6,298	6,458
Barra 3	5,363	5,388	5,471	5,543	5,721
Comprimento da barra (mm)					
Barra 1	300,165	300,221	300,341	300,402	300,608
Barra 2	301,118	301,160	301,231	301,298	301,458
Barra 3	300,363	300,388	300,471	300,543	300,721
Comprimento médio (mm)	300,549	300,590	300,681	300,748	300,929
Variação média acumulada (mm)	0	0,041	0,132	0,199	0,380
Variação média acumulada (%)	0	0,014	0,044	0,066	0,127

Fonte: Própria dos autores (2022).

As leituras foram realizadas para todos os traços, cujos dados finais estão apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 - Traços 0 %, 5 %, 10 %, 15 % e 20 % para as argamassas autoadensáveis aoensaio de expansão acelerada.

TRAÇO AAA 0 %					
Dias a partir do 1º na solução	Leitura inicial	5	20	22	29
Variação média acumulada	0,000%	0,014%	0,044%	0,066%	0,127%
TRAÇO AAA 5 %					
Dias a partir do 1º na solução	Leitura inicial	4	19	21	28
Variação média acumulada	0,000%	0,04%	0,12%	0,14%	0,20%
TRAÇO AAA 10 %					
Dias a partir do 1º na solução	Leitura inicial	4	19	21	28
Variação média acumulada	0,000%	0,00%	0,04%	0,06%	0,13%
TRAÇO AAA 15 %					
dias a partir do 1º na solução	Leitura inicial	13	15	22	28
Variação média acumulada	0,000%	0,00%	0,03%	0,03%	0,02%
TRAÇO AAA 20 %					
dias a partir do 1º na solução	Leitura inicial	13	15	22	28
Variação média acumulada	0,000%	-0,07%	0,01%	0,01%	0,00%
TRAÇO AAA 30 %					
dias a partir do 1º na solução	Leitura inicial	13	15	22	28
Variação média acumulada	0,000%	0,01%	0,01%	0,05%	0,15%

Fonte: Própria dos autores (2022).

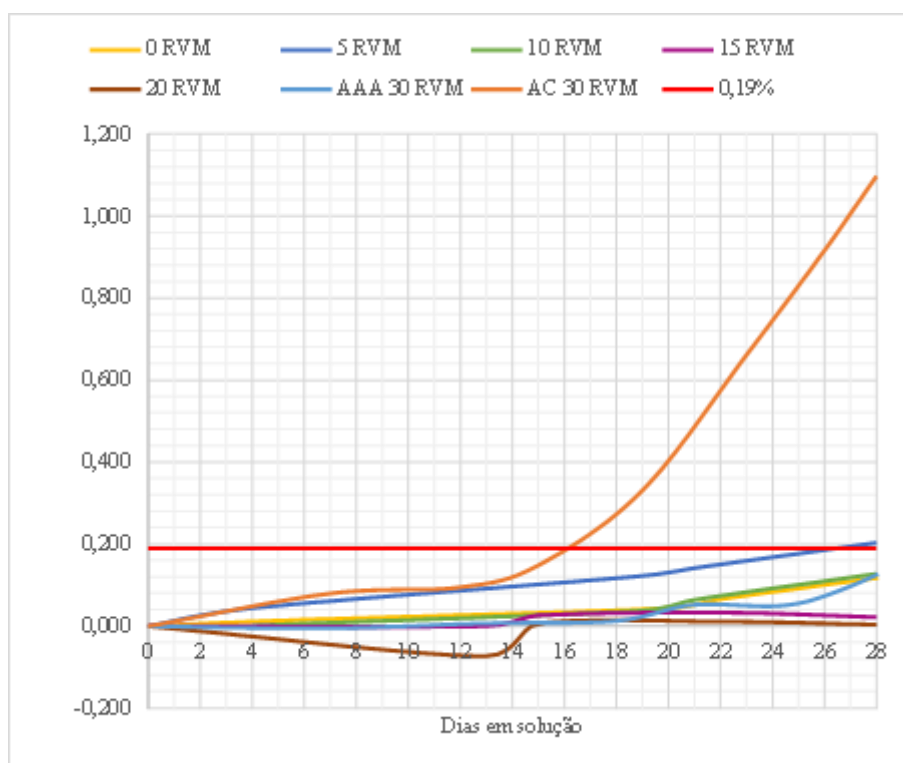
A Tabela 14 mostra a evolução das expansões das barras de argamassa. O traço sem substituição apresentou um bom desempenho, apresentando um aumento da expansão a partir do 20º dia em solução, porém ficando abaixo do limite considerado potencialmente reativo ao final dos 28 dias com uma variação dimensional de 0,127% em relação à leitura inicial.

Isso demonstra que, para o traço e os materiais utilizados na argamassa autoadensável desenvolvida para comparação, o uso desta areia não representa um risco ao concreto a ser desenvolvido a partir desta argamassa.

O traço com substituição de 5% de areia por resíduo de vidro foi o único que apresentou uma expansão final acima dos 0,19% aos 28 dias utilizados pela (ABNT NBR 15577-4, 2009) para considerar que um agregado é potencialmente reativo para Reação Álcali Agregado. Ainda assim, o valor foi muito próximo, sendo 0,20%, porém demonstra que o resíduo de vidro é um material capaz de provocar a reação alcali agregado nas argamassas autoadensáveis.

O comparativo entre as curvas de todos os traços pode ser observado na Figura 14, onde o destaque da expansão do traço de argamassa convencional é notório.

Figura 14 - Expansão por reação álcali-agregado - Método Acelerado para todos os traços.



Fonte: Própria dos autores (2022).

A Figura 14 não diferencia qual o tipo de mistura e materiais utilizados por cada estudo, mas é possível observar por exemplo que, para o teor de substituição de 30%, a maioria das argamassas estava com expansão acumulada abaixo dos 0,10% aos 14 dias (limite para essa idade no ensaio na norma ASTM C1260-21 (2021), sendo que apenas 5 estavam acima de 0,20%.

Comparando com o presente estudo, aos 14 dias todos os traços estavam com expansão acumulada abaixo de 0,20%, sendo que apenas os traços 5 % e AC 30 % estavam acima de 0,10%. Entretanto, aos 28 dias o traço AC 30 % apresentou uma expansão de 1,10% em relação à medida inicial, o que é um valor muito alto, mesmo em comparação com outros estudos com argamassas de teores mais altos. Além das leituras das variações de expansão, as barras de argamassa tiveram seus aspectos visuais acompanhados ao longo do ensaio e ao final, conforme mostra a Figura 15.

Em todas as amostras de Argamassa Auto Adensável foi observada a presença de poros com seção circular, presença de sinais de estufamento, lascamento, presença de material esbranquiçado em forma de respingos, manchas ou massa. É importante recordar que na moldagem das Argamassa autoadensável não foi realizada a etapa de adensamento manual.

Figura 15 - Barras do traço AAA 0 % após ensaio de expansão.



Fonte: Própria dos autores (2022).

Figura 16 - Presença de resíduo de vidro e sinais de fissura, estufamento e manchas brancas em barra do traço AAA 5 %.



Fonte: Própria dos autores (2022).

Figura 17 - Trincas radiais em torno de material branco em área lascada em barra de argamassa traço AAA 10%.



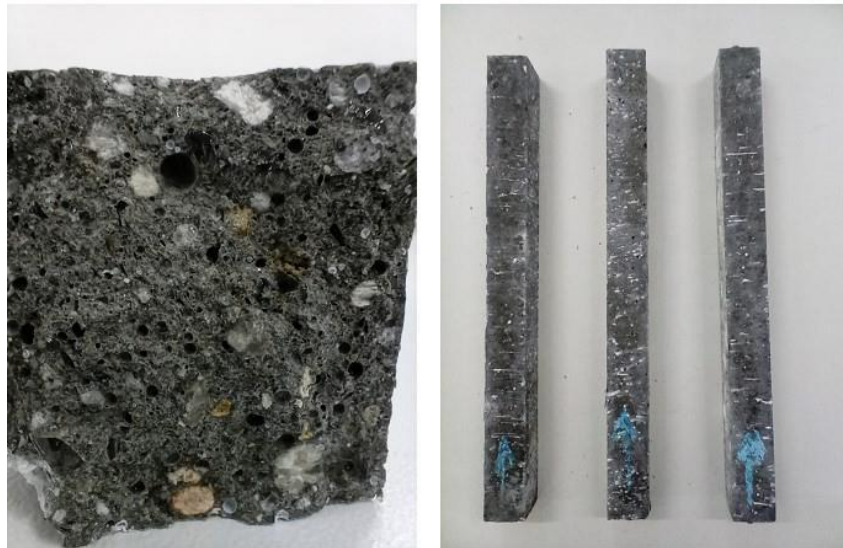
Fonte: Própria dos autores (2022).

Figura 18 - Barra do traço 15 % em seção e área estufada.



Fonte: Própria dos autores (2022).

Figura 19 - Traço AAA 20 % seção de barra de argamassa; barras com sinais de material esbranquiçado.



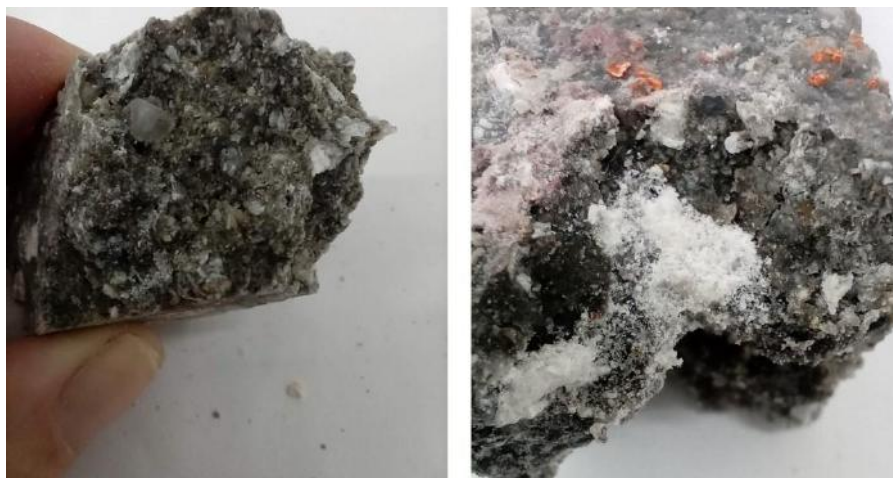
Fonte: Própria dos autores (2022).

Figura 20 - Barras de AAA com 30% de substituição de areia por vidro após ensaio de expansão por reação álcali agregado.



Fonte: Própria dos autores (2022).

Figura 21 - Barra de argamassa convencional com 30% de substituição de areia por RVM após ensaio de expansão por reação álcali agregado.



Fonte: Própria dos autores (2022).

Observando as Figuras 20 e 21 é possível perceber a diferença no aspecto geral das argamassas com e sem o uso de sílica ativa e aditivo superplastificante. Embora o traço de Argamassa Auto Adensável tenha apresentado características que remetem à ação da expansão por Reação Álcali Agregado, como área com um volume de material esbranquiçado, a argamassa autodensável se manteve com bom aspecto, equilibrado em quantidade de poros, agregados aparentes e distribuição de pasta.

(Abdallah, et al., 2014) faz uma interessante observação, de que a Reação Álcali Agregado, embora seja prejudicial à estabilidade do concreto, em certa medida a reação química pode aumentar a resistência do concreto.

O processo de preenchimento da área de adesão com os produtos da reação cimentícia que ocorreram, porém não causaram expansão deletéria, é atribuído ao aumento da resistência, processo que pode ser considerado semelhante à reação pozolânica nos concretos. Tal observação pode ser pensada como uma relação possível entre os resultados do traço 5 %, que teve o maior resultado de resistência à compressão e também a maior variação de expansão final e apenas pouco acima do valor potencialmente, assim como no traço 30 %.

Serpa et al. (2013) apresenta dados da literatura que indicam que o uso do pó de vidro utilizado em substituição ao cimento promove a mitigação dos efeitos da Reação Álcali Agregado, comparativamente a outros pós finos reativos, observando que quanto mais fino for o pó de vidro melhor será seu desempenho na mitigação.

Como foi relatado, o resíduo de vidro utilizado neste estudo foi manipulado para que sua granulometria ficasse muito próxima à da areia, contudo o fino pó que recobria os grãos de todos os tamanhos é muito presente e não foi eliminado. Desta forma, parte do resíduo de vidro não entrou na mistura como agregado, mas sim como material fino.

A variação não linear entre o teor de substituição e a expansão pode indicar que, no caso do traço 5 % o efeito do potencial reativo do vidro em dimensões de agregado foi superior ao efeito mitigador do pó de vidro, levando as barras a expandirem mais do que os traços seguintes. Isso pode ser observado pela diminuição da variação de expansão na medida que o teor de substituição aumentou até o traço com 20%, progressivamente. O comportamento muda novamente quando o teor de substituição chega aos 30%, porém ainda assim ficando semelhante ao traço controle.

O potencial reativo do resíduo de vidro como agregado em uma quantidade maior na argamassa fica mais evidente e, nesta situação, a possível ação mitigadora do pó, mesmo que proporcionalmente também esteja em maior quantidade, não consegue ter o mesmo efeito observado nos traços 15 % e 20 %, onde a expansão foi praticamente nula.

4. Conclusão

Todas as amostras com incorporação de resíduo de vidro apresentaram valores de resistência média à compressão superiores aos limites que atendem os requisitos de classificação como argamassa estrutural, bem acima do valor médio aos 28 dias de 17,2 MPa, especificado pela norma ASTM C270 (ASTM, 2019). Diferentemente de alguns resultados apresentados na literatura, nos quais o uso de resíduos de vidro reciclado como substituição da areia em materiais cimentícios indicaram diminuição da resistência à compressão quando comparado com traço de controle.

Pode-se perceber que apenas o traço da argamassa autoadensável com a proporção de substituição de 10% de resíduo de vidro do Grupo 1 apresentou redução da resistência em 6%, em comparação com os resultados do traço referência. Para o mesmo teor de substituição no traço do Grupo 2, a resistência média foi maior do que a do Grupo 1 e acima dos traços referência.

Os demais traços do Grupo 1 apresentaram aumento da resistência à compressão, cujo destaque foi traço 5 % que obteve um aumento de 6,14% em relação ao traço referência, seguido do traço 30 % com aumento de 3,42%. No Grupo 2 apenas o traço 30 % apresentaram uma pequena queda na resistência em relação ao traço controle, onde destaque foi para o traço 15% seguido do traço 10 %, com aumentos de 14,54% e 6,86% respectivamente.

No Grupo 1, os traços com teor de substituição de 15% e 20% de areia por resíduo de vidro tiveram um pequeno aumento, porém um valor acima do traço de referência e também foi observado mesmo comportamento no Grupo 2, nos traços de 5% e 20%.

Quanto ao comportamento das curvas desses corpos de prova, pode-se entender que seja comportamento típico de materiais quase-frágeis, como argamassas e concreto, quando submetido a tensões de tração na flexão.

É possível observar por exemplo que, para o teor de substituição de 30%, a maioria das argamassas estava com expansão acumulada abaixo dos 0,10% aos 14 dias (limite para essa idade no ensaio na norma ASTM C1260-21, sendo que apenas 5 estavam acima de 0,20%.

Comparando com o presente estudo, aos 14 dias todos os traços estavam com expansão acumulada abaixo de 0,20%, sendo que apenas os traços 5 % e AC 30 % estavam acima de 0,10%. Entretanto, aos 28 dias o traço AC 30 % apresentou uma expansão de 1,10% em relação à medida inicial, o que é um valor muito alto, mesmo em comparação com outros estudos com argamassas de teores mais altos.

Em todas as amostras de Argamassa Auto Adensável foi observada a presença de poros com seção circular, presença de sinais de estufamento, lascamento, presença de material esbranquiçado em forma de respingos, manchas ou massa. É importante recordar que na moldagem das Argamassa autoadensável não foi realizada a etapa de adensamento manual. É importante destacar que os materiais ou a tecnologia do concreto autoadensável favorece o controle da reação álcali agregado, sendo que a sílica e superplastificante tem papel importante no controle, mostrando que o concreto (ou compósitos cimentícios) são bastante favoráveis à incorporação de resíduos potencialmente reativos como o vidro.

Para as principais sugestões de trabalhos futuros, a investigação da microestrutura do concreto com resíduo de vidro e relacioná-la com suas propriedades físicas e mecânicas, uso da Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE) para monitoramento da corrosão em concreto armado, ensaio de carbonatação do concreto, investigação estrutural através de difração de raio x e também investigar a incorporação de Metacaulim no concreto com resíduo de vidro na reação álcali agregado.

Agradecimentos

A empresa Raneri pelo fornecimento do vidro triturado, da Aditibras pelo fornecimento do aditivo superplastificante e da Tecnosil pelo fornecimento da sílica ativa.

Referências

- Abdallah, S., & Fan, M. (2014). Characteristics of concrete with waste glass as fine aggregate replacement. *International Journal of Web Engineering and Technology*, 2, 11–17.
- ABNT 7211. (2019). ABNT 7211: Agregados para concreto - Especificação. In *Agregados para concreto - Especificação*.
- ABNT NBR 11768. (2019). *Aditivos químicos para concreto de cimento Portland - Parte 1: Requisitos*.
- ABNT NBR 13279. (1995). Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos - Determinação da retenção de água. In *Associação Brasileira de Normas Técnicas*.
- ABNT NBR 15577-4. (2009). *Agregados — Reatividade álcali-agregado Parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado*.
- ABNT NBR 5738. (2018). ABNT NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova (Concrete - Procedure for molding and curing concrete test specimens) [in Portuguese]. In *Associação Brasileira de Normas Técnicas*.
- ADI-SUPER25. (2021). *ADI-SUPER ADI-SUPER Superplastificante para concreto* —. 20–21.
- Ahmad, J., Aslam, F., Martinez-Garcia, R., de-Prado-Gil, J., Qaidi, S. M. A., & Brahmia, A. (2021). Effects of waste glass and waste marble on mechanical and durability performance of concrete. *Scientific Reports*, 11(1), 21525. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-00994-0>
- Alducin-Ochoa, J. M., Martín-del-Río, J. J., Torres-González, M., Flores-Alés, V., & Hernández-Cruz, D. (2021). Performance of mortars based on recycled glass as aggregate by accelerated decay tests (ADT). *Construction and Building Materials*, 300, 124057. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124057>
- Ali, E., & Al-Tersawy, S. (2012). Recycled glass as a partial replacement for fine aggregate in self compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 35, 785–791. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.117>
- ASTM C1260-21. (2021). *Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method)*.
- ASTM C270-10. (2019). *ASTM C270-10. Standard Specification for Mortar for Unit Masonry: C270 – 14a*. <https://doi.org/10.1520/C0270-14A>. Copyright
- Azevedo, A., Marvila, M., Rocha, H., Reis, L., & Vieira, C. M. (2020). Use of glass polishing waste in the development of ecological ceramic roof tiles by the geopolymerization process. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 17. <https://doi.org/10.1111/ijac.13585>
- Duan, W., Zhuge, Y., Pham, P. N., Liu, Y., & Kitipornchai, S. (2022). A ternary blended binder incorporating alum sludge to efficiently resist alkali-silica reaction of recycled glass aggregates. *Journal of Cleaner Production*, 349, 131415. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131415>
- Faraj, R. H., Hama Ali, H. F., Sherwani, A. F. H., Hassan, B. R., & Karim, H. (2020). Use of recycled plastic in self-compacting concrete: A comprehensive review on fresh and mechanical properties. *Journal of Building Engineering*, 30, 101283. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.job.2020.101283>
- Gomes, P. C. C., & Barros, A. R. (2009). *Métodos de Dosagem de Concreto Autoadensável*. (Pini (ed.); 1°).
- Laura Posser Donadel, Juliana Ferreira Soares, A. S. (2022). *IBEAS - Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais IBEAS - Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais*. 13281, 1–6.
- Marvila, M. T., Azevedo, A. R. G., Delaqua, G. C. G., Mendes, B. C., Pedroti, L. G., & Vieira, C. M. F. (2021). Performance of geopolymer tiles in high temperature and saturation conditions. *Construction and Building Materials*, 286, 122994. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122994>
- NBR 16697. (2018). Cimento Portland — Requisitos. *Abnt*, 1–9.
- NBR 5738. (2018). *Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos Conforme a 5738.pdf.pdf*.
- NBR ABNT, & 13279. (2010). *Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão*. 663. <https://www.skoob.com.br/impresso-no-brasil-191576ed214066.html>
- Nepomuceno, M., Oliveira, L., & Lopes, S. M. R. (2012). *Construção e materiais de construção utilizando diferentes adições minerais em misturas binárias de pós. d*, 317–326.
- Novaes, A. H., Duarte, F., Riveiro, L. O., & Santos, T. E. (2019). Metodologia Científica Teoria e aplicação na educação a distância. In *Petrolina - PE Universidade Federal do Vale do São Francisco* (Vol. 53, Issue 9). <http://portais.univasf.edu.br/dacc/noticias/livro-univasf/metodologia-cientifica-teoria-e-aplicacao-na-educacao-a-distancia.pdf>
- Okamura, H., & Ouchi, M. (2003). *Betão Auto-compactável*. 1(1), 5–15.
- Okamura, Hajime, & Ouchi, M. (2003). Self-Compacting Concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 1(1), 5–15. <https://doi.org/10.3151/jact.1.5>
- Petek Gursel, A., Masanet, E., Horvath, A., & Stadel, A. (2014). Life-cycle inventory analysis of concrete production: A critical review. *Cement and Concrete Composites*, 51, 38–48. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.03.005>
- R. G. Torres, M. L. N. M. Melo, V. C. dos Santos, V. A. S. Ribeiro, A. F., & Oliveira, A. P. M. A. (2022). Investigação das propriedades físicas e mecânicas do compósito cimentício autoadensável com substituição do agregado miúdo por resíduo de vidro. *Research, Society and Development*, 11(13), e481111335642.
- Ramos, K. da S., Luz, J. A. M. da, & Milhomem, F. de O. (2022). Da viabilidade de fabrico de vidro com resíduos de mineração. *Research, Society and Development*, 11(9), e13711929828. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i9.29828>

- Rao, S., Silva, P., & De Brito, J. (2015). Experimental study of the mechanical properties and durability of self-compacting mortars with nano materials (SiO₂ and TiO₂). *Construction and Building Materials*, 96, 508–517. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.049>
- Rasheed, P. A., Nayar, S. K., Barsoum, I., & Alfantazi, A. (2022). Degradation of Concrete Structures in Nuclear Power Plants: A Review of the Major Causes and Possible Preventive Measures. *Energies*, 15(21). <https://doi.org/10.3390/en15218011>
- Serpa, D., Santos Silva, A., de Brito, J., Pontes, J., & Soares, D. (2013). ASR of mortars containing glass. *Construction and Building Materials*, 47, 489–495. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.058>
- Sharma, N., Sharma, P., & Parashar, A. K. (2022). Use of waste glass and demolished brick as coarse aggregate in production of sustainable concrete. *Materials Today: Proceedings*, 62, 4030–4035. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.602>
- ASTM C150/C150M – 18. <https://doi.org/10.1520/C0150>
- Tuaum, A., Shitote, S., & Oyawa, W. (2018). Experimental study of self-compacting mortar incorporating recycled glass aggregate. *Buildings*, 8(2). <https://doi.org/10.3390/buildings8020015>
- Tutikian, B. F. (2004). *Método para dosagem de concretos auto- método para dosagem de concretos autoadensável*.
- Wang, Y., Mo, K. H., Du, H., & Ling, T.-C. (2022). Effects of CO₂ curing treatment on alkali-silica reaction of mortars containing glass aggregate. *Construction and Building Materials*, 323, 126637. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126637>
- Xiao, Y., Pham, B. T., Guo, M.-Z., & Ling, T.-C. (2022). Use of luminescent-glass aggregates for the production of decorative architectural mortar. *Journal of Building Engineering*, 50, 104233. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104233>
- Ya. Pak, A., Bolatova, Z., Nikitin, D. S., Korchagina, A. P., Kalinina, N. A., & Ivashutenko, A. S. (2022). Glass waste derived silicon carbide synthesis via direct current atmospheric arc plasma. *Waste Management*, 144, 263–271. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.04.002>
- Yoo, D.-Y., Lee, Y., You, I., Banthia, N., & Zi, G. (2022). Utilization of liquid crystal display (LCD) glass waste in concrete: A review. *Cement and Concrete Composites*, 130, 104542. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104542>