

Investigação das propriedades físicas e mecânicas do compósito cimentício autoadensável com substituição do agregado miúdo por resíduo de vidro

Investigation of the physical and mechanical properties of self-adhesive composite with replacement of the kid aggregate by glass powder

Investigación de las propiedades físicas y mecánicas del compuesto autoadhesivo con la sustitución del agregado infantil por residuos de vidrio

Recebido: 21/09/2022 | Revisado: 06/10/2022 | Aceitado: 07/10/2022 | Publicado: 13/10/2022

Rafael Gonçalves Torres

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9926-154X>
Universidade Federal de Itajubá, Brasil
E-mail: rafael.gtorres@yahoo.com.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

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

Adhimar Flávio Oliveira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2586-7359>
Universidade Federal de Itajubá, Brasil
E-mail: adhimarflavio@unifei.edu.br

Ana Paula Mota Alves

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

Resumo

O objetivo desse trabalho é avaliar a produção de compósito Cimentício autoadensável com os resíduos de vidro moído, nas proporções de 5%, 10%, 15%, 20% e 30% em substituição ao agregado miúdo e investigar suas propriedades físicas e mecânicas. O concreto é um dos materiais mais utilizados na construção civil e muitos tipos de resíduos podem ser usados em sua composição para diminuir a extração de matérias primas naturais, como por exemplo o vidro que é um material 100% reciclável podendo ser utilizado como agregado no compósito Cimentício ou o pó de vidro na fabricação do cimento. Para tanto será utilizado para a caracterização do resíduo de vidro os ensaios de granulometria, massa específica, massa unitária. No estado fresco foram realizados os métodos “Mini-Cone Slump Flow” e “mini v-funnel test” para obter a viscosidade e índice de diâmetro de espalhamento e no estado endurecido foram realizados os ensaios de resistência mecânica à compressão axial e diametral, massa específica e índice de vazios. Os resultados obtidos indicam que a resistência a compressão diminuiu com o aumento da resistência a compressão aos 28 dias.

Palavras-chave: Concreto; Compósito cimentício autoadensável, Resistência a compressão; Índice de vazios.

Abstract

The objective of this work is to evaluate the production of self-adensible cementitious composite with the residues of ground glass, in the proportions of 5%, 10%, 15%, 20% and 30% in place of the kid aggregate and investigate its physical and mechanical properties. Concrete is one of the most used materials in civil construction and many types of waste can be used in its composition to reduce the extraction of natural raw materials, such as glass which is a 100% recyclable material and can be used as aggregate in cementitious composite or glass powder in cement making cement. For this, the tests of granulometry, specific mass, unit mass, mass will be used for the characterization of glass residue. In the fresh state, the "Mini-Cone Slump Flow" and "mini v-funnel test" methods were performed to obtain viscosity and spreading diameter index and in the hardened state were performed mechanical strength tests to

axial and diametric compression, specific mass and void stake. The results obtained indicate that the compressive strength decreased with the increase of compressive strength at 28 days.

Keywords: Concrete; Self-adensable cementitious composite, Compressive strength; Void stake.

Resumen

El objetivo de este trabajo es evaluar la producción de composite cementicio autoadquirente con los residuos de vidrio esmerilado, en las proporciones de 5%, 10%, 15%, 20% y 30% en lugar del agregado infantil e investigar sus propiedades físicas y mecánicas. El hormigón es uno de los materiales más utilizados en la construcción civil y se pueden utilizar muchos tipos de residuos en su composición para reducir la extracción de materias primas naturales, como el vidrio, que es un material 100% reciclable y se puede utilizar como agregado en compuesto cementicio o polvo de vidrio en cemento para cementar. Para ello, se utilizarán los ensayos de granulometría, masa específica, masa unitaria, masa para la caracterización de residuos de vidrio. En el estado fresco, se realizaron los métodos "Mini-Cone Slump Flow" y "mini v-funnel test" para obtener viscosidad e índice de diámetro de propagación y en el estado endurecido se realizaron pruebas de resistencia mecánica a la compresión axial y diametral, masa específica e índice vacío. Los resultados obtenidos indican que la resistencia a la compresión disminuyó con el aumento de la resistencia a la compresión a los 28 días.

Palabras clave: Hormigón; Compuesto cementicio autoadquirente; Resistencia a la compresión; Índice vacío.

1. Introdução

A evolução constante da construção civil provoca a busca de tecnologias inovadoras para melhorar a qualidade e segurança das edificações e reduzir o impacto causado no meio ambiente, tendo a construção civil grande importância nas pesquisas nas áreas sustentáveis (Silva et al., 2020).

Devido à ênfase significativa no aumento da sustentabilidade e proteção ambiental, há também a necessidade de levar isso em consideração nas práticas de construção. O setor da construção civil foi responsável por 36% do consumo final de energia e 39% das emissões de energia e dióxido de carbono (CO₂) associadas ao processo em 2018. Destes, 11% deveram-se à produção de materiais de construção e produtos como aço, cimento e vidro. A produção de cimento é um processo de uso intensivo de energia que representa 5% do consumo de energia industrial e 3% do consumo total de energia em todo o mundo. Além disso, a produção de uma tonelada de cimento gera cerca de 0,9 toneladas de CO₂ por descarbonização, que é liberada no meio ambiente (USEPA, 2010).

Enquanto isso, o concreto é o material de construção mais utilizado no mundo (a produção mundial em 2012 foi de 7 milhões de m³ por ano, ou seja, três vezes mais do que a madeira e sete vezes mais do que o aço por ano (Czarnecki & Kapron, 2010).

De acordo com estatísticas da indústria publicadas no The Global Cement Report, 13th Edition (Armstrong, 2016), o consumo de cimento no mundo aumentou 2,8% para 4,08 milhões de toneladas em 2019. Portanto, há a necessidade de buscar materiais como substitutos para cimento ou agregado.

O vidro é um dos materiais mais antigos fabricados pelo homem. É produzido em muitas formas, incluindo embalagem ou recipiente de vidro, vidro plano, bulbo de vidro e vidro de tubo de raios catódicos, todos os quais têm uma vida limitada em todas as formas em que são produzidos. Assim, o vidro precisa ser reutilizado/reciclado para evitar problemas ambientais que podem ser criados, se forem estocados ou enviados para aterros. Teoricamente, o vidro é um material 100% reciclável; podendo ser reciclado indefinidamente sem perda de qualidade (Ali & Al-Tersawy, 2012).

Hipoteticamente, todo o vidro é reciclável, apesar disso, apenas uma pequena fração é recuperada globalmente. Além disso, a taxa de decomposição dos resíduos de vidro é menor quando comparada aos resíduos convencionais, como papel, borracha e plástico. Portanto, uma utilização lucrativa de resíduos de vidro na produção de concreto autoadensável (CAA) seria fascinante (Singh & Siddique, 2022). Muitos pesquisadores demonstraram grande interesse em investigar os efeitos dos resíduos de vidro para suas adequadas características, em forma de pó ou em forma de agregados miúdos e graúdos, para melhorar as propriedades do concreto (Rahma et al., 2017). O vidro separa dois tipos de antagonismo, a reação alcalino-sílica

(ASR), ocorre entre certas formas de sílica, estruturalmente distorcidas ou amorfas, e soluções de hidróxido alcalino, como KOH e NaOH o que causa danos no concreto, e sua reação pozolânica, que é considerada benéfica para as propriedades do concreto (Rahma et al., 2017).

Higuchia & Vasconcelos (2022) investigaram a utilização de resíduo de vidro na produção do concreto autoadensável. Foi utilizada a substituição parcial do cimento por resíduo de vidro a 10%, 15% e 20% e sua dosagem foi determinada usando uma metodologia baseada na teoria do empacotamento de partículas. Constatou-se que, no estado fresco, todos os concretos desenvolvidos apresentaram espalhamento, viscosidade e capacidade de passagem compatíveis com o concreto autoadensável. Não houve evidência de segregação e um aumento na fluidez foi observado à medida que o teor de resíduo de vidro na mistura aumentou. No estado endurecido, dentre os níveis de resíduo de vidro estudados, os concretos contendo 15% de resíduo de vidro apresentaram desempenho mecânico superior aos demais após 28 dias de cura, tanto na compressão quanto na tração. A partir dos resultados obtidos, pode-se concluir que 15% é o teor ideal de substituição parcial do cimento por resíduo de vidro para a produção de concreto autoadensável de alta resistência.

Małek et al. (2020) investigou quatro conteúdos diferentes de resíduo de vidro (5, 10, 15 e 20% em peso de agregado fino). As resistências à tração e à compressão foram avaliadas. A adição do resíduo de vidro aumentou as propriedades mecânicas da argamassa. Ao comparar a força, a melhora obtida na resistência à tração foi a menos afetada. O objetivo desse trabalho é investigar as Propriedades Físicas e Mecânicas do Compósito Cimentício Autoadensável com substituição do agregado miúdo por resíduo de vidro.

2. Metodologia

O método utilizado para pesquisa 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 lavada comum, resíduo de vidro moído, sílica ativa, superplastificante e água. Será apresentado com detalhes as propriedades de cada um dos constituintes.

O aglomerante utilizado foi o cimento Portland CPV ARI de alta resistência inicial, 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 Ensaios, a Metodologia, o valor e a unidade referente.

| Ensaios | Metodologia | Valor | Unidade |
|---------------------------|------------------|------------------------------|-------------------|
| Massa Específica Aparente | ABNT NBR 23:2001 | 0,9 a 1,2 | g/cm ³ |
| Massa Específica Absoluta | ABNT NBR 23:2001 | $2,8 \leq \gamma_r \leq 3,2$ | g/cm ³ |

Fonte: Adaptado de Votorantim (2020).

O Cimento CP-V ARI (NBR 5.733) 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

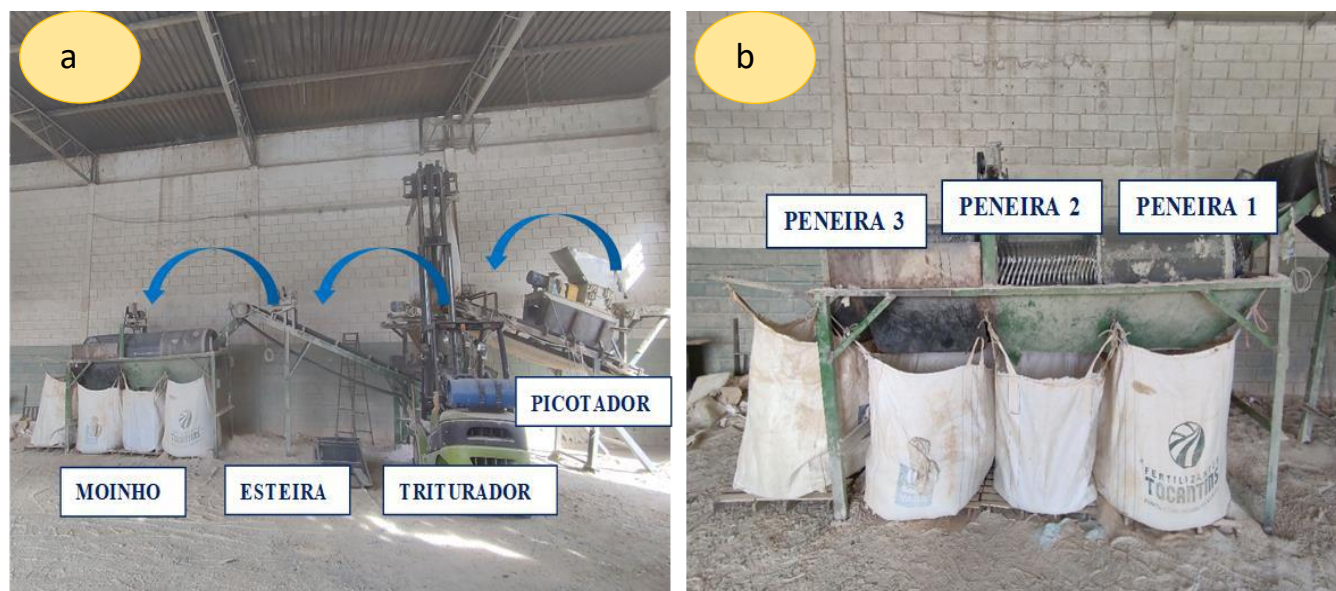
intervalo de tempo. Ao final dos 28 dias de cura, também atinge resistências maiores que os cimentos convencionais. É muito utilizado em obras industriais que exigem um tempo de desforma menor. É recomendado apenas para a fabricação de concretos e possui massa específica aparente entre $0,9 \text{ g/cm}^3$ a $1,2 \text{ g/cm}^3$ e massa específica absoluta entre $2,8 \text{ g/cm}^3$ e $3,2 \text{ g/cm}^3$.

O agregado miúdo utilizado foi a areia média com granulometria abaixo de $4,8\text{mm}$ 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: Autoria própria (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: Autoria própria (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 fornecida pela empresa Tecnosil. 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, viteras e possuem um diâmetro médio menor do que $1\mu\text{m}$, 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/cm^3 e $2,2\text{g/cm}^3$ (a do cimento possui 3g/cm^3), além de massa unitária entre 200 e 500kg/m^3 (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 $\pm 0,020$ | g/cm^3 |
| Ph | ABNT NBR 11768:2019 | 5,50 $\pm 1,0$ | - |

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

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: $1,055 \pm 0,020 \text{ g/cm}$.

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), conforme mostrado na Tabela 4.

Tabela 4. 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 |
|---------|---------|---------|--------|-------|-------|------|------|
| TR | 0 | 1 | 0,10 | 0,0 | 1,0 | 0,45 | 1,51 |
| T5 | 5 | 1 | 0,10 | 0,05 | 0,95 | 0,45 | 1,51 |
| T10 | 10 | 1 | 0,10 | 0,10 | 0,90 | 0,45 | 1,51 |
| T15 | 15 | 1 | 0,10 | 0,15 | 0,85 | 0,45 | 1,51 |
| T20 | 20 | 1 | 0,10 | 0,20 | 0,85 | 0,45 | 1,51 |
| T30 | 30 | 1 | 0,10 | 0,30 | 0,70 | 0,45 | 1,51 |

Fonte: Autoria própria (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 5 apresenta a quantidade, os ensaios e dimensões produzidas para cada ensaio para o grupo de corpo de prova produzido.

Tabela 5. Traço referência e com resíduo de vidro. Na primeira coluna são apresentados os ensaios, seguindo pelo grupo 1 e as dimensões do corpo de prova.

| Ensaio | Grupo 1 | Dimensões do Corpo de Prova |
|---|---------|-----------------------------|
| Resistência à compressão axial | 6 | cilindro Ø5x10cm |
| Resistência à tração por compressão axial | 6 | cilindro Ø5x10cm |
| Absorção de água, índice de vazios e massa específica | 6 | cilindro Ø5x10cm |

Fonte: Autoria própria (2022).

Os corpos-de-prova com formato cilíndrico de dimensões de Ø5x10cm foram moldados com 6 corpos de prova cada para os ensaios de resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão axial e absorção de água, índice de vazios e massa específica.

2.1 Ensaios 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 e OUCHI (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 & 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: Autoria própria (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: Autoria própria (2022).

Nos corpos de prova no estado endurecido foram utilizados os ensaios de absorção de água, índice de vazios, massa específica, ensaios de resistência a compressão axial e de tração por compressão diametral, conforme mostrado na Tabela 6.

Tabela 6. Ensaios aplicados no AAA no estado endurecido. Na primeira coluna são apresentados os ensaios, seguido pela norma ABNT e as dimensões do corpo de prova.

| Ensaios | Norma ABNT | Dimensões do Corpo de Prova |
|--|-------------------|------------------------------------|
| Resistencia à compressão axial | NBR 5739:2018b | cilindro Ø5x10cm |
| Resistência à tração por compressão axial | NBR 7222:2011 | cilindro Ø5x10cm |
| Absorção de água, índice de vazios | NBR 9778:2005 | cilindro Ø5x10cm |

Fonte: Autoria própria (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.



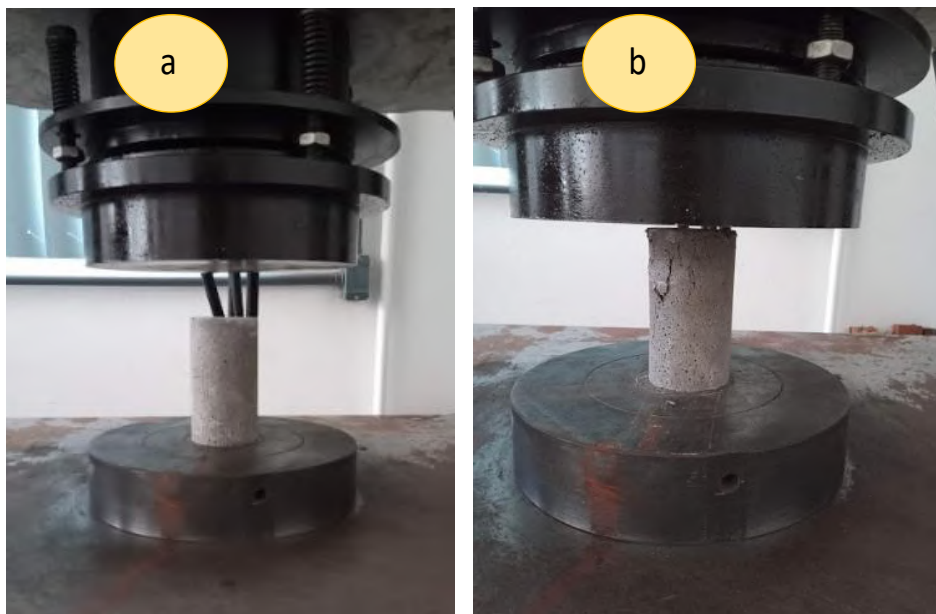
Fonte: Autoria própria (2022).

O método de cura indicado pela norma brasileira 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, conforme mostrado na Figura 6 (b).

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. Os ensaios de resistência à tração por compressão diametral, são obtidos resultados de forma indireta a resistência a tração, conforme a NBR 7222 (2011). Nesse ensaio, os corpos de provas cilíndricos com 50mm de diâmetro e 100mm de altura são posicionados horizontalmente na máquina INSTRON 8801 e colocar duas chapas de madeira sobre o prato desta máquina sendo aplicada com crescimento constante da tensão de tração a uma velocidade de 0,05 MPa/s até a ruptura, conforme mostrado na Figura 7.

Figura 6. Ensaio de resistência a compressão axial, realizados segundo a NBR 5738 (2018) utilizando a máquina INSTRON 8801.



Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 7. Ensaio de Resistência à tração por compressão diametral para obtenção resultados de forma indireta a resistência a tração, conforme a NBR 7222 (2011).



Fonte: Autoria própria (2022).

O ensaio de tração por compressão diametral é um método indireto para obtenção da resistência à tração do concreto. No ensaio é aplicada uma tensão de compressão na geratriz do cilindro, que é apoiado em duas taliscas de madeira em contato com os pratos da prensa. O corpo de prova fratura devido à tração desenvolvida em planos diametralmente opostos. A grande vantagem de se realizar esse ensaio é a necessidade de somente um equipamento de compressão para obtenção da resistência à tração (Farias et al., 2001).

3. Resultados e Discussão

A Tabela 7 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 7. 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.

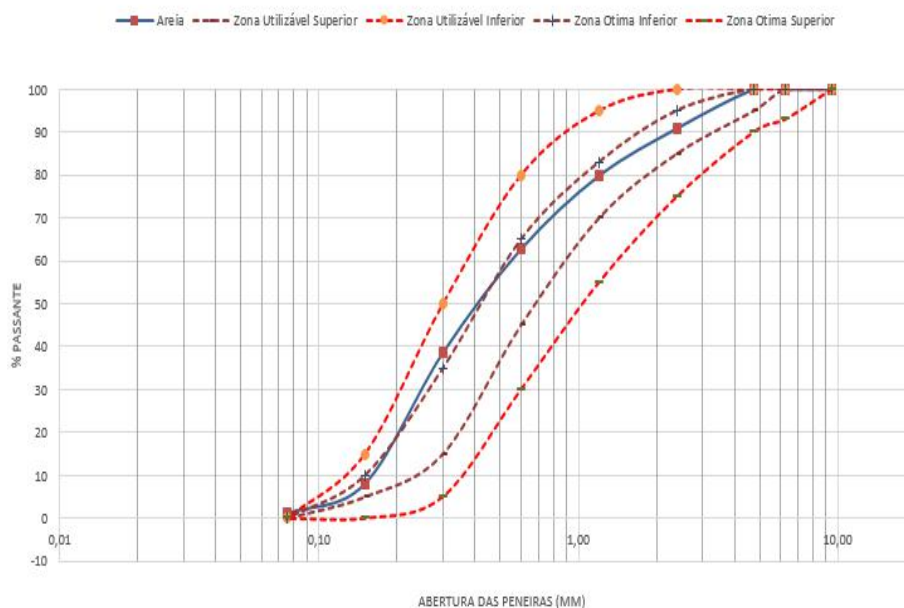
| Abertura da peneira (mm) | % retida | % retida e acumulada | % passante e acumulada |
|--|----------|----------------------|------------------------|
| 4,75 | 0 | 0 | 100 |
| 2,40 | 9,1 | 9,1 | 90,9 |
| 1,20 | 11,1 | 20,1 | 79,9 |
| 0,60 | 17,1 | 37,2 | 62,8 |
| 0,30 | 24,1 | 61,4 | 38,6 |
| 0,15 | 30,5 | 91,9 | 8,1 |
| < 0,15 | 8,1 | 100,00 | 0 |
| Diâmetro Máximo (mm) | 4,75 | | |
| Módulo de Finura | 2,20 | | |
| Massa Específica (g/cm³) | 2,59 | | |

Fonte: Autoria própria (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 NBR 7211 (2009), através da faixa de valores do agregado miúdo, observou-se que o valor do modulo 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: Autorial própria (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 8 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.

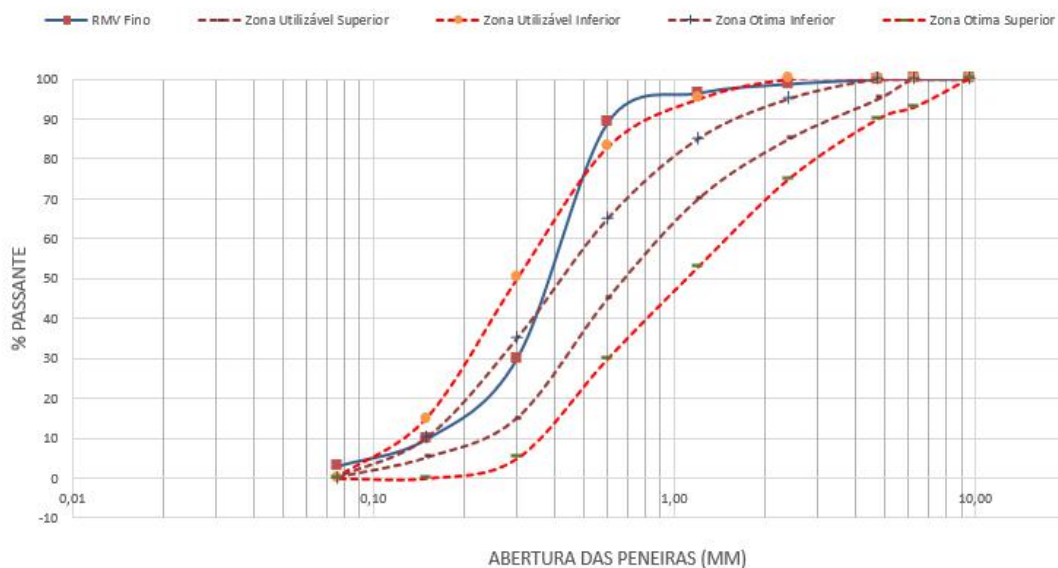
Tabela 8. Composição da granulometria do resíduo de vidro. Na primeira coluna são apresentados os valores de abertura da peneira em mm, seguido pelas proporções retida, acumulada e passante.

| Abertura da peneira (mm) | % retida | % retida e acumulada | % passante e acumulada |
|--|----------|----------------------|------------------------|
| 4,75 | 0,08 | 0,08 | 99,92 |
| 2,40 | 1,12 | 1,20 | 98,80 |
| 1,20 | 2,28 | 3,48 | 96,52 |
| 0,60 | 7,35 | 10,84 | 89,16 |
| 0,30 | 59,17 | 70,00 | 30,00 |
| 0,15 | 20,35 | 90,35 | 9,65 |
| 0,075 | 6,93 | 97,28 | 2,72 |
| < 0,15 | 2,72 | 100 | 0 |
| Diâmetro Máximo (mm) | 1,20 | | |
| Módulo de Finura | 2,73 | | |
| Massa Específica (g/cm³) | 2,41 | | |

Fonte: Autoria própria (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 NBR 7211 (2009), através da faixa de valores do agregado miúdo, observou-se que o valor do modulo 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: Autoria própria (2022).

Pela Tabela 8, nota-se que a quantidade de o resíduo de vidro que ficou retido na peneira 0,30mm é duas vezes a quantidade retido de areia.

Os resultados do ensaio de viscosidade plástica aparente “*Funil V*” (R_m) das argamassas são mostrados na Tabela 9 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.

Tabela 9. Resultados do ensaio de viscosidade plástica aparente São apresentados os valores do Tempo e R_m .

| Grupo 1 | | |
|---------|-----------|-------------------------|
| Traço | Tempo (s) | R_m ($1 < R_m < 2$) |
| TR | 7 | 1,4 |
| RMV 5% | 9 | 1,1 |
| RMV 10% | 7 | 1,4 |
| RMV 15% | 8 | 1,3 |
| RMV 20% | 10 | 1,0 |
| RMV 30% | 8 | 1,3 |

Fonte: Autoria própria (2022).

Os resultados do ensaio de espalhamento da argamassa autoadensável pelo “*Slump flow test*” são mostrados na Tabela 10 e foram realizados conforme o Método proposto por Okamura e Ouchi (2003). O valor de G_m foi calculado e seus valores estão no intervalo de 5,9 a 7,3; o que corresponde a diâmetros de espalhamento entre 26,3 cm e 28,8 cm.

Tabela 10. Resultados do ensaio de espalhamento da argamassa autoadensável pelo “*Slump flow test*”.

| Grupo 1 | | | | |
|---------|------------|------------|------------|-------------------------|
| Traço | d_1 (mm) | d_2 (mm) | d_0 (mm) | G_m ($3 < G_m < 8$) |
| TR | 288 | 275 | 100 | 6,7 |
| RMV 5% | 265 | 260 | 100 | 5,9 |
| RMV 10% | 275 | 275 | 100 | 6,6 |
| RMV 15% | 275 | 275 | 100 | 6,6 |
| RMV 20% | 285 | 290 | 100 | 7,3 |
| RMV 30% | 260 | 265 | 100 | 5,9 |

Fonte: Autoria própria (2022).

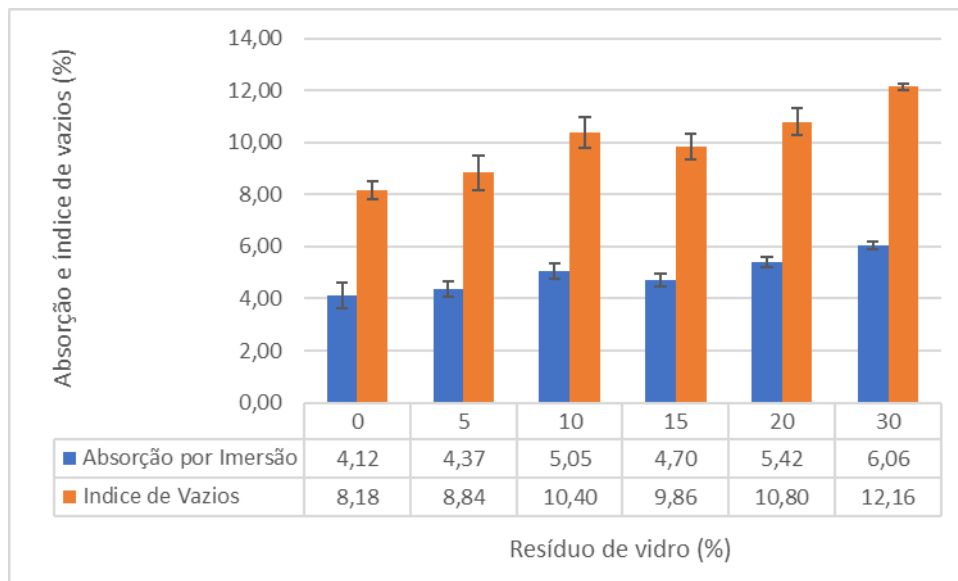
Na Figura 10 são mostrados os resultados do ensaio de absorção de água e índice de vazios para 28 dias. Todas as amostras com resíduos de vidro apresentaram a porcentagem de absorção e índice de vazios maiores que a amostra referencial.

Também se observa que com o aumento da porcentagem de substituição de areia por resíduo de vidro, houve um crescimento da porcentagem de absorção de água e índice de vazios, exceto com teor de 15% de resíduo de vidro que ficou abaixo do teor de 10% de resíduo de vidro.

Islam et al. (2017) observou que um aumento na porosidade ocorreu à medida que as porcentagens de resíduos de vidro aumentaram. O aumento da porosidade resulta em maior absorção de água. De acordo com um estudo, a maior absorção de água do concreto foi registrada com 0% de substituição de resíduos de vidro.

A menor absorção de água do concreto foi observada no corpo com 5% de resíduo de vidro. A diminuição da absorção de água do concreto com a substituição do vidro residual é devido à reação pozolânica do vidro residual, que melhora as qualidades de ligação da pasta de cimento (Dong et al., 2021). Além disso, o micro preenchimento de resíduos de vidro resulta em concreto mais denso preenchendo os vazios entre os ingredientes do concreto, resultando em menor absorção de água. No entanto, um aumento na absorção de água foi observado em uma dose maior de resíduos de vidro (30%) devido à falta de trabalhabilidade, o que aumentou os esforços de compactação, resultando em mais vazios no concreto endurecido e em maior absorção de água. Como resultado, uma dose mais alta de superplastificante é necessária para uma dose mais alta de resíduos de vidro (Dong et al., 2021).

Figura 10. Resultados do ensaio de absorção de água e índice de vazios para 28 dias. Todas as amostras com resíduos de vidro apresentaram a porcentagem de absorção e índice de vazios maiores que a amostra referencial.



Fonte: Autoria própria (2022).

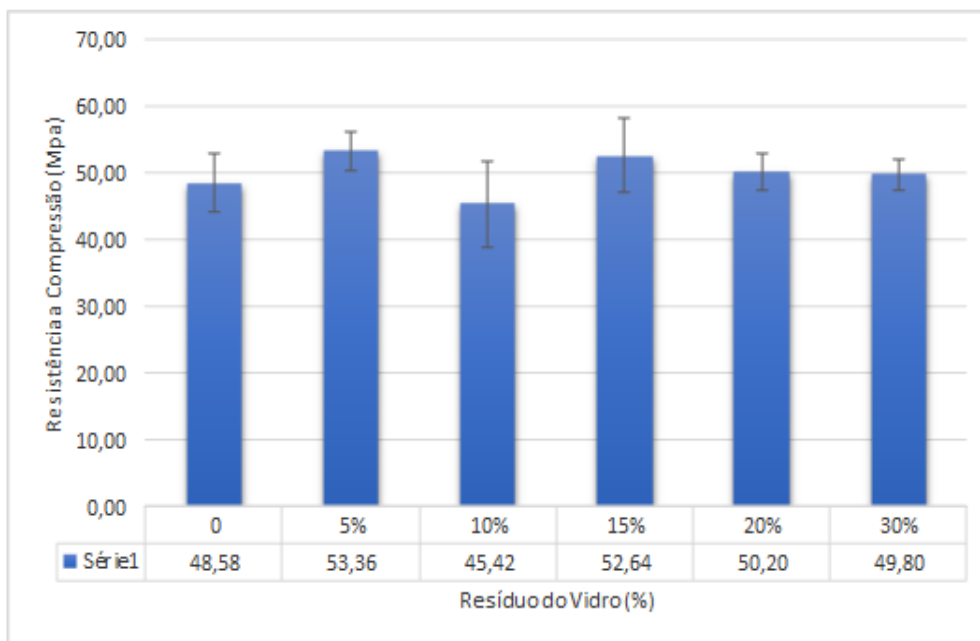
A Figura 11 mostra os valores encontrados para a resistência à compressão axial aos 28 dias para o concreto. Através dos resultados, observou-se que a resistência a compressão diminuiu de $(48,58 \pm 4,07)$ MPa da amostra referencial para $(45,42 \pm 4,61)$ MPa da amostra com 10%. O valor da resistência a compressão das amostras de referência e das amostras com resíduos de vidro em substituição da areia apresentaram valor superior ao indicado pela norma ASTM C270-10 (2017) de 17,2 MPa.

Também pela Figura 11 observou-se uma diminuição dos valores da resistência à compressão axial das amostras com resíduo de vidro de $(52,64 \pm 3,92)$ MPa da amostra com 15% de RMV para $(49,80 \pm 1,70)$ MPa da amostra com 30% de resíduo de vidro. No entanto, a argamassa com 5% de resíduo de vidro apresentou um maior valor de resistência a compressão.

Os resultados do estudo de Higuchi et al. (2021) indicam que argamassas com 5%, 10%, 15%, 20%, e 25% de resíduo de vidro mostraram uma redução na resistência à compressão em 28 dias de 14%, 18%, 9%, 18% e 27%, respectivamente, em comparação com a argamassa referência.

Esta diminuição dos valores da resistência à compressão do composto cimentício com resíduo de vidro pode ser explicada pelo efeito de diluição, devido à redução do teor de cimento e o aumento da relação água-cimento efetiva, de modo a diminuir a quantidade de formação de produtos de hidratação e, em última análise, reduzir a resistência à compressão da pasta de cimento (Santiago et al., 2022).

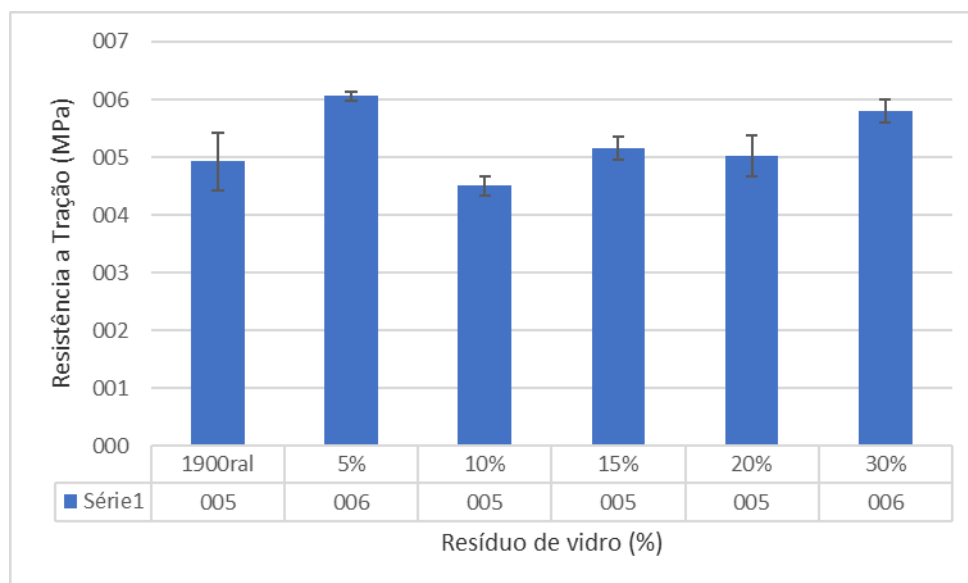
Figura 11. Valores encontrados para a resistência à compressão axial aos 28 dias para o concreto. Através dos resultados, observou-se que a resistência a compressão diminuiu de $(48,58 \pm 4,07)$ MPa da amostra referência para $(45,42 \pm 4,61)$ MPa da amostra com 10%.



Fonte: Autoria própria (2022).

Na Figura 12 são mostrados os resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral para 28 dias. Aos 28 dias, a resistência à tração por compressão dos concretos produzidos representa aproximadamente 4% da compressão axial força das misturas correspondentes. Sendo o mais baixo 4,50% para 10% e o mais alto 6,06% para 5%. Assim como na compressão, a resistência à tração também tende a ter um teor ótimo de substituição de cimento. Neste trabalho, quanto para tração, o valor ideal obtido é 5%.

Figura 12. Resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral para 28 dias. Aos 28 dias, a resistência à tração por compressão dos concretos produzidos representa aproximadamente 4% da compressão axial força das misturas correspondentes.



Fonte: Autoria própria (2022).

4. Conclusão

Observou-se através dos resultados um crescimento da porcentagem de absorção de água e índice de vazios, exceto com teor de 15% de resíduo de vidro que ficou abaixo do teor de 10% de resíduo de vidro.

Através dos resultados, observou-se que a resistência a compressão diminuiu da amostra referência para a amostra com 10%. O valor da resistência a compressão das amostras de referência e das amostras com resíduos de vidro em substituição da areia apresentaram valor superior ao indicado pela norma ASTM C270-10 (2017). Também observou-se uma diminuição dos valores da resistência à compressão axial das amostras com resíduo de vidro da amostra com 15% de resíduo de vidro para a amostra com 30% de resíduo de vidro. No entanto, a argamassa com 5% de resíduo de vidro apresentou um maior valor de resistência a compressão.

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 e investigação estrutural através de difração de raio x.

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

ADI-SUPER25. (2021). *ADI-SUPER ADI-SUPER Superplastificante para concreto* -. 20–21.

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>

Armstrong, T. (2016). Global Cement Report. *International Cement Review*.

- ASTM C270-10. (2017). *ASTM C270-10. Standard Specification for Mortar for Unit Masonry: C270 – 14a*. <https://doi.org/10.1520/C0270-14A>. Copyright
- Czarnecki, L., & Kapron, M. (2010). Sustainable construction as a research area. *International Journal of the Society of Material Engineering for Resources*, 17(2), 99–106. <https://doi.org/10.5188/ijmsr.17.99>
- Dong, W., Li, W., & Tao, Z. (2021). A comprehensive review on performance of cementitious and geopolymeric concretes with recycled waste glass as powder, sand or cullet. *Resources, Conservation and Recycling*, 172, 105664. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105664>
- Farias, L. A., Lopes, A. N. M., Stival, M. L., Andrade, M. A. S., & Bittencourt, R. M. (2001). *Ensaio de Tração Direta em Corpos de Prova de Concreto*. 1, 9.
- Gomes, Alexandre; Barros, P. C. (2009). *Métodos de dosagem de concreto autoadensável*.
- Higuchia, A. M. D., & Raimundo Pereira de Vasconcelos. (2022). The effect of glass powder on the rheological and mechanical performance of self-compacting high strength concrete. *Available at SSRN*. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4163556>
- Islam, G. M. S., Rahman, M. H., & Kazi, N. (2017). Waste glass powder as partial replacement of cement for sustainable concrete practice. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 6(1), 37–44. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijse.2016.10.005>
- Magni Darwich Higuchi, A., Gorett dos Santos Marques, M., Farias Ribas, L., & Pereira de Vasconcelos, R. (2021). Use of glass powder residue as an eco-efficient supplementary cementitious material. *Construction and Building Materials*, 304, 124640. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124640>
- Malek, M., Łasica, W., Jackowski, M., & Kadela, M. (2020). Effect of waste glass addition as a replacement for fine aggregate on properties of mortar. *Materials*, 13(14), 1–19. <https://doi.org/10.3390/ma13143189>
- 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 7222. (2011). NBR 7222: Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. In *Associação Brasileira de Normas Técnicas* (p. 5).
- 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.
- Rahma, A., Naber, N. El, & Ismail, S. I. (2017). Effect of glass powder on the compression strength and the workability of concrete. *Cogent Engineering*, 4(1), 1373415. <https://doi.org/10.1080/23311916.2017.1373415>
- 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>
- Santiago, J. M., Clementino, F. de S., Conceição, I. G. C. da, Sousa, H. F. de, & Santos, H. C. dos. (2022). Effects on the properties of cementitious composites using waste glass powder (WGP) as a partial replacement for cement. *International Journal for Innovation Education and Research*, 10(1), 307–324. <https://doi.org/10.31686/ijer.vol10.iss1.3619>
- Silva, L. R. R. da, Silva, J. A. da, Francisco, M. B., Ribeiro, V. A., de Souza, M. H. B., Capellato, P., Souza, M. A., dos Santos, V., Cesar Gonçalves, P., & de Lourdes Noronha Motta Melo, M. (2020). Polymeric Waste from Recycling Refrigerators as an Aggregate for Self-Compacting Concrete. *Sustainability*, 12(20). <https://doi.org/10.3390/su12208731>
- Singh, H., & Siddique, R. (2022). Utilization of crushed recycled glass and metakaolin for development of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 348, 128659. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128659>
- ASTM C150/C150M – 18. <https://doi.org/10.1520/C0150>
- Tutikian, B. F. (2004). *Método para dosagem de concretos auto- método para dosagem de concretos autoadensável*.
- USEPA. (2010). *Available and Emerging Technologies for Reducing Greenhouse Gas Emissions from the Petroleum Refining Industry* (Issue October).
- VOTORANTIM. (2020). *Ficha De Informações de Segurança De Produtos Químicos – FISPQ – Revisão n°00 06/01/2020*.