

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA CIVIL**

LEONARDO CANIATO MARTIOLI

**ESTUDO COMPARATIVO DO EFEITO DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO
CIMENTO PORTLAND POR VIDRO MOÍDO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2022

LEONARDO CANIATO MARTIOLI

**ESTUDO COMPARATIVO DO EFEITO DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO
CIMENTO PORTLAND POR VIDRO MOÍDO**

**Comparative study of the effect of partial replacement of Portland cement by
glass powder**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito parcial à obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Civil, da
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
(UTFPR).

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Lidiane Fernanda Jochem.

CURITIBA

2022



Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

LEONARDO CANIATO MARTIOLI

**ESTUDO COMPARATIVO DO EFEITO DA SUBSTITUIÇÃO PARCIAL DO
CIMENTO PORTLAND POR VIDRO MOÍDO**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 02 de dezembro de 2022.

Lidiane Fernanda Jochem
Doutora em Engenharia Civil
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

César Augusto Casagrande
Doutor em Engenharia Civil
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Janine Nicolosi Corrêa
Doutora em Engenharia Elétrica e Informática Industrial
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

CURITIBA

2022

Dedico este trabalho a Deus e aos meus pais,
Terezinha e Marino.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de iniciar os agradecimentos a todas as pessoas que contribuíram para a conclusão desse trabalho, do meu curso em geral e a todos que participaram do meu crescimento pessoal e profissional ao longo dessa jornada.

Agradeço a Deus, pela saúde, pela paz, pela força, fé e coragem que sempre me deu, também agradeço pelo autoconhecimento adquirido.

Agradeço aos meus pais, Terezinha e Marino, por todas as orações, por me manterem em pé nessa longa trajetória, por todo o carinho e direcionamento, pelo amor, pelas palavras que me renovavam as energias e por todo o suporte imensurável, amo vocês!

Agradeço à minha orientadora Prof^a. Dr^a. Lidiane Fernanda Jochem, por acreditar em mim, me incentivar, direcionar meu foco, por toda a compreensão, pelo profissionalismo, pelo respeito, pelas novas chances e por todas as oportunidades. Agradeço de todo o coração, sua ajuda foi imprescindível em todas as etapas.

Agradeço a todos os meus professores que, certamente, contribuíram de alguma forma nos meus estudos, tanto os que lecionaram nas disciplinas que cursei no campus Curitiba quanto no campus Campo Mourão.

Aos funcionários e colaboradores do laboratório, da segurança e da limpeza que sempre ajudaram de alguma forma, zelavam os ambientes e contribuíam com palavras de incentivo para o bom desempenho do estudo da universidade.

Também agradeço aos meus amigos, vocês foram peça-chave, obrigado pela força e pela paciência em todos os momentos tristes e alegres.

Agradeço a empresa e aos gestores que cederam de prontidão a minha solicitação para reutilizar o vidro incolor que viraria resíduo descartado por não apresentar as corretas condições de uso nos apartamentos como objeto de estudo.

Com o apoio, a orientação e incentivo de todos vocês saio dessa etapa mais forte, com mais sabedoria e discernimento, muito obrigado!

RESUMO

O cimento é um dos materiais que mais geram CO₂ na sua produção e, considerando, que o reaproveitamento dos resíduos sólidos como matéria-prima para a produção de outros produtos é uma solução ambientalmente correta. Objetivou-se com este trabalho avaliar o efeito, nas propriedades físicas e mecânicas, da substituição parcial do cimento Portland (CP V-ARI) por vidro moído em argamassas em diferentes proporções. Para tanto, os resultados obtidos nos ensaios das argamassas nos estados fresco e endurecido, desenvolvidos em laboratório, seguindo normas e padrões estabelecidos, serviram de base para caracterizar física e mecanicamente se as proporções de substituição adotadas (15, 25, 35 e 50%) apresentaram resultados equivalentes ou estatisticamente satisfatórios em relação à argamassa de referência (0% de substituição), também foi verificado se as diferentes cores adotadas nas análises tiveram influência significativa nos resultados apresentados. As argamassas foram preparadas com cimento Portland, agregado miúdo, vidro moído e relação água/cimento de 0,7. Os resíduos de vidro moído utilizados tinham as seguintes cores: verde, azul, incolor, âmbar e colorido. Com exceção do vidro verde, todas as outras cores apresentaram característica diametral com aproximadamente 44,87 µm. Valores inferiores a 75 µm dificultam que a reação álcali-sílica (RAS) ocorra porque adquire comportamento e característica de pozolana natural. Na resistência à tração na flexão, verificou-se aumento da resistência de 28 para 90 dias, também houve aumento na resistência de 90 para 365 dias. Aos 28 para 90 dias, com 15% de teor de substituição, os resultados com os maiores ganhos de resistência à tração na flexão em relação à referência foram obtidos nas cores verde (33,3%) e azul (17,7%), enquanto no teor de 25% os melhores resultados com ganhos de resistência foram nas cores verde (21,4%) e colorido (12,0%). Na resistência à compressão, o melhor resultado obtido para o teor de 15% aos 28 dias foi na cor azul (94,7% da referência) e verde (85,1% da referência), e aos 90 dias, também no teor de 15%, o melhor resultado obtido foi na cor azul (85,9% da referência) e verde (83,4% da referência). A reatividade álcali-sílica (RAS) nas argamassas com 50% de substituição do CP V-ARI por vidro moído não ocorreu em nenhuma argamassa pois os diâmetros dos vidros moídos estavam com baixa granulometria, de acordo com as expansões evidenciadas aos 30 dias. A análise de solubilidade indicou que as cores de vidro moído não influenciam na análise de condutividade. As argamassas que apresentaram o maior valor de absorção por imersão e porosidade aberta foram as que continham maior teor de vidro moído em sua composição (50% e 35%). As proporções mais adequadas, identificadas nesse estudo, foram nas substituições parciais de 15 e 25% do CP V-ARI por vidro moído porque se aproximaram mais do valor referencial quando comparadas às outras porcentagens de substituição.

Palavras-chave: vidro moído; argamassa; cimento Portland; material suplementar.

ABSTRACT

Cement is one of the materials that most generate CO₂ in its production and, considering that the reuse of solid waste as raw material to produce other products is an environmentally correct solution. The objective of this work was to evaluate the effect, on the physical and mechanical properties, of the partial replacement of Portland cement (CP V-ARI) by glass powder in mortars in different proportions. Therefore, the results obtained in the mortar tests in the fresh and hardened states, developed in the laboratory, following established norms and standards, served as a basis for physically and mechanically characterizing whether the replacement proportions adopted (15, 25, 35 and 50%) presented equivalent or statistically satisfactory results in relation to the reference mortar (0% replacement), it was also verified whether the different colors adopted in the analyzes had a significant influence on the presented results. The mortars were prepared with Portland cement, fine aggregate, glass powder and a water/cement ratio of 0,7. The glass powder waste used had the following colors: green, blue, colorless, amber and colored. Except for green glass, all other colors had a diametral characteristic of approximately 44,87 µm. Values below 75 µm make it difficult for the alkali-silica reaction to occur because it acquires the behavior and characteristics of natural pozzolan. In flexural tensile strength, there was an increase in resistance from 28 to 90 days, there was also an increase in resistance from 90 to 365 days. At 28 to 90 days, with 15% replacement content, the results with the highest gains in flexural tensile strength in relation to the reference were obtained in the green color (33,3%) and blue color (17,7%), while in the 25% content the best results with resistance gains were in green color (21,4%) and colored color (12,0%). In terms of compressive strength, the best result obtained for the 15% content at 28 days was for blue color (94,7% of the reference) and green color (85,1% of the reference), and at 90 days, also for the 15%, the best result obtained was in blue color (85,9% of the reference) and green color (83,4% of the reference). Alkali-silica reactivity in mortars with 50% replacement of CP V-ARI by glass powder did not occur in any mortar because the diameters of the glasses powder had low granulometry, according to the expansions evidenced at 30 days. The solubility analysis indicated that glass powder colors do not influence the conductivity analysis. The mortars that showed the highest immersion absorption value and open porosity were those that contained the highest glass powder content in their composition (50% and 35%). The most adequate proportions, identified in this study, were in the partial substitutions of 15 and 25% of CP V-ARI by glass powder because they were closer to the reference value when compared to the other substitution percentages.

Keywords: glass powder; mortar; Portland cement; supplementary material.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mecanismo da reação álcali-sílica	19
Figura 2 - Fluxograma dos procedimentos experimentais.....	22
Figura 3 - Moinho de Pano da UTFPR	25
Figura 4 - Processo de moagem dos vidros.....	26
Figura 5 - Argamassadeiras utilizadas no laboratório	30
Figura 6 - Corpos de prova prismáticos	31
Figura 7 - Ensaio de resistência à compressão.....	31
Figura 8 - Argamassa no estado fresco	32
Figura 9 - Condições de cura iniciais das argamassas	33
Figura 10 - Corpos de prova após desmoldagem	33
Figura 11 - Armazenamento dos corpos de prova	34
Figura 12 - Ensaio de absorção de água por imersão e porosidade aberta.....	35
Figura 13 - Aferição da variação dimensional	36
Figura 14 - Preparos para o ensaio de solubilidade.....	37
Figura 15 - Preparação do ensaio de solubilidade	37
Figura 16 - Ensaio de solubilidade	38
Figura 17 - Análise microscópica	38
Figura 18 - Microscopia.....	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Argamassas preparadas	27
Tabela 2 - Número de corpos de prova e idades dos ensaios	32
Tabela 3 - Massa específica nos diferentes teores de substituição	40
Tabela 4 - Massa específica nas diferentes cores	41

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Composição granulométrica do agregado miúdo	28
Gráfico 2 - Diâmetro das partículas do vidro e do cimento.....	29
Gráfico 3 - Massa específica no estado fresco.....	42
Gráfico 4 - Consumo de cimento.....	44
Gráfico 5 - <i>Flow table</i>	45
Gráfico 6 - Teor de ar aprisionado.....	46
Gráfico 7 - Massa específica aparente no estado endurecido	48
Gráfico 8 - Resistência à tração na flexão aos 28 dias	49
Gráfico 9 - Resistência à tração na flexão aos 90 dias	51
Gráfico 10 - Resistência à tração na flexão aos 365 dias	53
Gráfico 11 - Resistência à compressão aos 28 dias	55
Gráfico 12 - Resistência à compressão aos 90 dias	57
Gráfico 13 - Resistência à compressão aos 365 dias	59
Gráfico 14 - Variação dimensional em milímetros por metro.....	62
Gráfico 15 - Variação da massa das amostras.....	63
Gráfico 16 - Condutividade das argamassas.....	64
Gráfico 17 - pH das argamassas e água destilada.....	65
Gráfico 18 - Absorção de água por imersão e porosidade aberta	66
Gráfico 19 - Índice de vazios.....	67

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 Objetivos	13
1.1.1 Objetivo Geral	13
1.1.2 Objetivos Específicos.....	13
1.2 Justificativa	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 Resíduo de vidro	15
2.1.1 Produção do vidro plano sodo-cálcico	16
2.1.2 Aplicações do vidro moído em matrizes cimentícias.....	17
2.2 Argamassas	18
2.2.1 Caracterização no estado fresco	18
2.2.2 Propriedades físicas e mecânicas no estado endurecido	18
2.3 Interação do cimento com o vidro moído	19
2.4 Influência das cores do vidro	20
3 MATERIAIS E MÉTODOS	22
3.1 Materiais	23
3.1.1 Cimento Portland	23
3.1.2 Agregado miúdo.....	23
3.1.3 Vidro	24
3.2 Métodos	24
3.2.1 Caracterização dos agregados	24
3.2.2 Moagem do vidro	24
3.2.3 Dosagem das argamassas	27
3.2.4 Caracterização dos agregados e aglomerantes	28
3.2.5 Preparo das argamassas	30
3.2.6 Preparo dos corpos de prova.....	30
3.2.7 Idade dos corpos de prova	32
3.2.8 Condições de cura	33
3.3 Ensaio das argamassas no estado fresco	34
3.4 Ensaio das argamassas no estado endurecido	34

3.4.1 Reatividade álcali-sílica	35
3.4.2 Solubilidade	36
3.4.3 Microscopia.....	38
4 ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	40
4.1 Ensaio das argamassas no estado fresco.....	40
4.2 Ensaio das argamassas no estado endurecido	48
4.2.1 Massa específica aparente	48
4.2.2 Resistência à tração na flexão	49
4.2.3 Resistência à compressão	55
4.2.4 Reatividade álcali-sílica	61
4.2.5 Solubilidade	63
4.2.6 Absorção de água por imersão e porosidade aberta	65
4.2.7 Microscopia.....	68
5 CONCLUSÃO.....	69
5.1 Sugestões para trabalhos futuros	69
REFERÊNCIAS.....	71

1 INTRODUÇÃO

Com o crescimento das necessidades da população e o consequente aumento no consumo de produtos, vários resíduos são gerados. Dentre os diferentes tipos de resíduos, os que mais requerem atenção são os resíduos sólidos, pois quando dispostos em locais impróprios podem causar problemas ambientais e de saúde pública. Em agosto de 2010 foi implementada a Lei nº 12.305 (BRASIL, 2010), a qual trata sobre a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) e tem como finalidade principal estimular “o aumento da reciclagem e da reutilização dos resíduos sólidos”.

O reaproveitamento dos resíduos sólidos como matéria-prima para a produção de outros produtos é uma solução ambientalmente correta e tem impacto na redução do volume de resíduos que seriam descartados irregularmente. Nesse sentido, os variados meios produtivos que fazem parte do setor da construção civil podem contribuir com a reciclagem e o reuso dos resíduos sólidos gerados por eles e dos resíduos oriundos de outros geradores (CASSA, CARNEIRO e BRUM, 2001).

Para Torres e Gonçalves-Dias (2018), existe ainda um fator que desmotiva a reutilização do vidro, fator esse de caráter econômico, devido à logística reversa do vidro, uma vez que o custo é elevado quando comparado a diferentes materiais recicláveis. Além disso, a matéria prima do vidro é abundante na natureza e tem extração simples e a um baixo custo.

Ainda assim, é válido a reutilização do vidro, pois vale ressaltar que o vidro é um material que pode ser reciclado em sua totalidade e com ciclos incontáveis, sem desperdício do material. O Brasil produz por ano cerca de 8,6 bilhões de unidades de vidro, totalizando 1,3 milhões de toneladas. Deste montante, apenas 25% têm como destino a reutilização. Estudos apontam que a cada 6 toneladas de vidro reciclado na produção de novos vidros, a quantidade de dióxido de carbono (CO₂) que deixa de ser emitida no ambiente é, aproximadamente, de 1 tonelada (ABIVIDRO, 2021).

Ainda de acordo com a ABIVIDRO (2021), em comparação com 2019, é estimado que até 2050 o Brasil vai aumentar em praticamente 50% a quantidade de geração de resíduos, enquanto a média mundial será de cerca de 70%. Aponta também um crescimento da população de 12% no país, ou seja, a produção de lixo produzido por pessoa irá aumentar significativamente.

Desta forma, faz-se necessário o estudo do comportamento do vidro moído adicionado à argamassa cimentícia como substituto parcial do cimento Portland. Considerando a verificação de quais efeitos essas substituições em proporções distintas resultam em resultados satisfatórios para a recomendação do uso na construção civil e contribuindo na busca de uma destinação alternativa viável para o resíduo sólido resultante do vidro.

Para tanto, o presente trabalho pretende avaliar o efeito do teor de substituição parcial de CP V-ARI por vidro moído nas cores verde, azul, incolor, âmbar e colorido nas proporções de 15, 25, 35 e 50% em argamassas, contrapondo os resultados obtidos nas propriedades físicas e mecânicas com a argamassa referencial nos estados fresco e endurecido aos 28, 90 e 365 dias.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desta pesquisa é avaliar o efeito nas propriedades físicas e mecânicas da substituição parcial do cimento Portland por vidro moído em argamassas.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Verificar as proporções de substituição mais adequadas para as análises;
- Avaliar o efeito do teor de substituição do resíduo de vidro nas propriedades das argamassas.

1.2 Justificativa

O vidro é um material que pode ser reciclado totalmente, sem perdas. Porém, para que a sua reciclagem seja viável, deve existir uma estrutura de logística para a coleta e limpeza desses resíduos. Por causa da ineficiência dessa estrutura, estima-se que aproximadamente 60% dos resíduos de vidro são descartados em aterros (SILVA *et al.*, 2020).

O índice de reciclagem de vidro no Brasil variou de 33% em 1994 para 47% em 2008 (IPEA, 2017) e mesmo aumentando, a quantia de resíduos de vidro que é descartado irregularmente ainda é consideravelmente alta, visto que, o vidro tem tempo indeterminado de decomposição, pois depende da erosão e da ação de agentes químicos.

O vidro tem na sua composição mais de 70% de sílica ou dióxido de silício (SiO_2). A sílica também é o principal componente da areia que, por sua vez, é extensamente utilizada como agregado miúdo na indústria da construção civil. Sendo assim, o resíduo sólido de vidro, que tem relativo baixo custo e é de fácil aquisição, se constitui como um material potencialmente favorável para ser empregado em concretos não estruturais e argamassas especiais (SALES, 2014).

Portanto, a substituição parcial do cimento Portland por vidro moído na argamassa, é necessária e relevante para verificar e mensurar, com base em diferentes proporções de resíduo sólido de vidro, se a argamassa produzida com esse resíduo gera impacto positivo nos experimentos e se é uma alternativa viável com resultado e comportamento mecânico semelhantes ao da argamassa convencional, difundindo seu reuso na construção civil.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Resíduo de vidro

A composição do vidro constitui-se basicamente por 75% de óxido de silício, 15% de carbonato de sódio e 10% de carbonato de cálcio (CLAISSE, 2019).

A Organização das Nações Unidas definiu em uma negociação intergovernamental em 2015, com a participação do Brasil e dos outros países membros, os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). São 17 objetivos e 169 metas (ONU, 2015). Nesse contexto, o estudo proposto com a realização desse trabalho esteve ligado diretamente a seis dos dezessete objetivos (indústria, inovação e infraestrutura; cidades e comunidades sustentáveis; consumo e produção responsáveis; ação contra a mudança global do clima; vida na água; e vida terrestre), pois fomenta a inovação e estimula as cidades e empresas a adotarem uma infraestrutura mais sustentável através da substituição parcial de cimento Portland por vidro moído em diferentes proporções em argamassas.

A produção dos mais variados tipos de resíduos ocorre todos os dias com embalagens, recipientes e frascos, entre outros, para a conservação de produtos alimentícios e para finalidades diversas. No descarte desses resíduos, em muitos casos eles têm o potencial de serem reciclados e, conseqüentemente, reduzirem o impacto ambiental que seria causado como: degradação do solo; comprometimento dos corpos de água e mananciais; aumento da ocorrência de enchentes; poluição do ar; e o aumento da população de transmissores de doenças (ABIVIDRO, 2021).

Reciclando ou reutilizando poupa-se matéria-prima e energia. A capacidade de reciclagem do vidro é muito alta, visto que 100% do vidro pode ser reciclado. Ainda se estima que para cada um quilo de vidro, produz-se outro quilo de vidro. Nesse processo de reciclagem do vidro não há emissão do dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera, reafirmando e instigando a reciclagem desse material (ABIVIDRO, 2021).

Em produtos de matriz cimentícia, em média de 60 a 70% do volume da mistura é proveniente de agregados naturais. Além disso, os agregados são fundamentais para as reações com os aglomerantes em meio aquoso, influenciando diretamente na durabilidade, trabalhabilidade e nas propriedades mecânicas (LING, YONG e TAN, 2018). O vidro pode ser reutilizado seja na forma moída em argamassas

e concretos simples ou em outras aplicações que visam reduzir o montante de vidro disposto em locais inapropriados.

Além disso, colabora também para a redução da emissão dos gases poluentes que causam mudança climática e afetam os ecossistemas marinhos e terrestres, visto que o processo produtivo de cimento é um dos grandes responsáveis pelas emissões de CO₂ na atmosfera. No Brasil, o cimento responde por cerca de 2,6% do total do dióxido de carbono emitido. A nível global a situação é ainda pior, estima-se que o índice seja de 7%. Por isso, ações que visam reduzir a emissão de CO₂ são vistas como competitivas e sustentáveis (CIRILO, 2019).

2.1.1 Produção do vidro plano sodo-cálcico

Existem três tipos distintos de composições químicas que originam os vidros: vidro ao chumbo, usado na confecção de copos, taças, cálices e peças artesanais; vidro boro-silicato, utilizado pela indústria para fazer utensílios domésticos que têm capacidade de tolerar choque térmico; e o vidro sodo-cálcico, que tem sua aplicação para a produção de potes, embalagens, automóveis, eletrodomésticos, garrafas em geral e também é utilizado pela indústria da construção civil (ABIVIDRO, 2018).

A produção do vidro começa na retirada da matéria-prima mineral do meio ambiente, depois o substrato mineral passa pela etapa de dosagem e mistura e em seguida vai para a fusão, lenta e controlada, a 1600 °C. Após a fusão, o vidro plano sodo-cálcico é colocado sobre uma piscina de estanho a 650 °C, dando ao vidro uma espessura fina. Em seguida, o vidro é recozido de forma controlada para resfriar a chapa de vidro e, na última etapa, a lâmina de vidro é cortada em chapas após passar por uma inspeção contra eventuais defeitos fabris (ABIVIDRO, 2018).

2.1.2 Aplicações do vidro moído em matrizes cimentícias

O efeito da incorporação de resíduos em pastas, argamassas ou concretos vem sendo estudado e analisado com a finalidade de verificar a viabilidade na construção civil, seja como parte do agregado ou como parte do aglomerante. Dentre os resíduos possíveis, o vidro tem a característica de elevada durabilidade química, sem demonstrar sinais de deterioração no decorrer do tempo, visto que, com exceção do ácido fluorídrico, os vidros são resistentes a soluções ácidas e básicas de baixa intensidade com o pH menor do que 9, tornando-o uma opção para ser incorporado em elementos cimentícios, sendo que toda matriz cimentícia é alcalina (BALSAMO, CABRAL e SANFELICE, 2019).

O vidro, quando passa pela moagem adequada para ser utilizado em matrizes cimentícias, fica com dimensão inferior a 100 µm. Com dimensões menores ou iguais a 75 µm, age como um inibidor da reação álcali-sílica. Pode-se inferir que se torna um material em potencial para substituir parte do cimento e, assim, colabora com uma destinação ambientalmente correta (KHMIRI, SAMET e CHAABOUNI, 2012).

Os resultados de um estudo de avaliação de desempenho em argamassas com vidro plano moído indicam que a partir dos 7 dias já foi observado resultados satisfatórios de resistência mecânica. Resultados estes, não só em relação ao efeito de preenchimento que o vidro moído causou quanto pelo efeito pozolânico, após os 28 dias com traço 1:2,25 (cimento: agregado miúdo), relação água/cimento de 0,35, superplastificante e substituição de 20% do cimento por resíduo de vidro moído. O estudo apresentou valores de resistência mecânica 22% acima dos valores de referência após os 28 dias e 22% acima após os 56 dias (PAIVA, 2009).

Quando o vidro moído foi empregado, com dimensão máxima de 2,36 mm em diferentes proporções no lugar do agregado miúdo, o melhor resultado foi obtido com 50% de teor de substituição, com valores de resistência à compressão de 27,38% superior a argamassa de referência. Além disso, como melhorias advindas da substituição, a resistência à tração na flexão melhorou de forma gradual até os 28 dias e depois apresentou leve queda, indicando estabilidade. Por sua vez, na resistência à compressão, os valores foram aumentando até os 63 dias e depois, aos 91 dias, também houve leve diminuição da resistência e conseqüente indicativo de estabilização (TRENTIN *et al.*, 2020).

2.2 Argamassas

2.2.1 Caracterização no estado fresco

No estado fresco, as argamassas devem apresentar trabalhabilidade suficiente para que o seu manuseio e uso pelo trabalhador seja fácil, trazendo eficácia e produtividade na aplicação nas superfícies. Outro fator que deve ser observado no estado fresco é a retenção de água que influencia diretamente na trabalhabilidade. Quando a argamassa perde água muito rápido, tem a trabalhabilidade reduzida e fica suscetível a fissuras e microfissuras, por conta da retração, no processo de cura. A retração é influenciada diretamente pela quantidade e proporção de agregado miúdo em relação aos outros componentes da argamassa (aglomerante e água) que, na variação de volume quando está passando pelo processo de cura, tem fator determinante no comportamento da argamassa endurecida (LISBOA, ALVES e MELO, 2017).

2.2.2 Propriedades físicas e mecânicas no estado endurecido

No estado endurecido, a argamassa deve apresentar certa aderência aos diferentes tipos de superfície em que pode ser empregada, para que não haja descolamento e cause eventuais manifestações patológicas. Além disso, uma das principais funções da argamassa é a resistência mecânica, principalmente a resistência à compressão, que vai funcionar como uma barreira protetora da estrutura da edificação. Com bom desempenho mecânico, relacionado diretamente com a quantidade elevada de cimento, a argamassa aumenta o tempo de vida útil da estrutura (LISBOA, ALVES e MELO, 2017).

Contudo, ainda de acordo com o autor, uma argamassa com elevada resistência mecânica prejudica a própria capacidade de absorver as deformações e de proteger a estrutura. Sendo mais resistente, o módulo de elasticidade da argamassa é menor e, portanto, se torna mais propensa a apresentar fissuras, comprometer a aderência, estanqueidade e durabilidade.

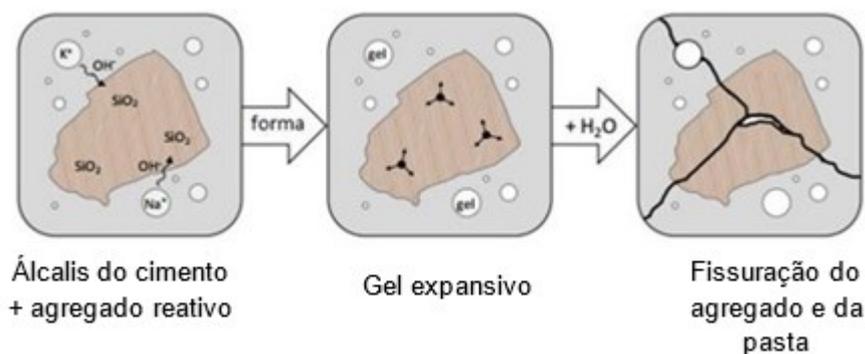
2.3 Interação do cimento com o vidro moído

A reação álcali-silica (RAS) necessita da tríade composta por minerais reativos do agregado (miúdo ou gráudo), quantidade suficiente de óxidos alcalinos (sódio: Na_2O e potássio: K_2O) e água (HASPARYK, 2011).

O vidro é rico em sílica e em contato com o hidróxido de cálcio reagem quimicamente e formam um gel sílico-alcalino que reage na presença de água, causando expansão do concreto. Conseqüentemente, a resistência mecânica diminui, podendo causar tanto a fissuração do agregado e da pasta quanto a redução do tempo de vida útil da estrutura e comprometimento do seu desempenho (MEHTA e MONTEIRO, 2014). Maiores temperaturas diminuem a quantidade necessária de água para que a reação álcali-silica ocorra (HASPARYK, 2011).

Por sua vez, o gel absorve a água da hidratação e expande, causando pressão que pode ocasionar microfissuras (Figura 1) e eventual degradação da argamassa dentro do perímetro dessas patologias (DYER e DHIR, 2001).

Figura 1 - Mecanismo da reação álcali-silica



Fonte: Adaptado de Deschenes (2009)

De acordo com Khmiri, Samet e Chaabouni (2012), com valores iguais ou inferiores a $75\ \mu\text{m}$, o vidro moído impede que a reação álcali-silica (RAS) ocorra porque adquire comportamento e característica de pozolana natural em decorrência da sua alta quantidade na sua composição de sílica amorfa.

2.4 Influência das cores do vidro

O descarte de vidro no meio ambiente ocorre devido ao custo do transporte até a reciclagem e pela dificuldade de separação dos resíduos de diferentes cores (PINTO, MASUERO e HASPARYK, 2008). Vidros com cores diferentes que por algum motivo estão misturados, não são considerados próprios para a utilização em embalagens e, portanto, a maioria acaba sendo enviada para aterros (MATA, 1998).

Os vidros apresentam em sua base praticamente a mesma composição, porém, aditivos são adicionados para dar cores distintas aos vidros ou para melhorar o vidro em alguma característica específica, ressaltam Shi e Zheng (2007).

Em um estudo de pesquisadores sobre a influência das cores dos vidros na reação álcali-sílica, Xi *et al.* (2004), constataram que vidros incolores são mais reativos com o gel sílico-alcálico do que os vidros coloridos. E que, quando o reagente de pigmentação é adicionado diretamente na mistura cimentícia, não se chega a resultados favoráveis, pois a reação álcali-sílica continua existindo.

Já em outro estudo na mesma linha de objetivo de pesquisa, verificou-se que o óxido de cromo, que origina a cor ao vidro verde, poderia impedir que a reação álcali-sílica fosse forte o suficiente para permitir a expansão do concreto (MEYER e BAXTER, 1998).

No estudo feito por Dyer e Dhir (2001), os autores fizeram a substituição parcial do cimento por vidro moído nas cores verde, incolor e âmbar em argamassas nas proporções de 10 e 20% e partículas inferiores a 600 µm. As amostras que continham teor de 10% de substituição por vidro verde e incolor obtiveram resistências que superaram o valor referencial na idade de 28 dias. Nas argamassas com 10 e 20% de vidro moído na cor âmbar o resultado foi equivalente à argamassa de referência. Os maiores acréscimos de resistência mecânica nas argamassas com vidro moído foram registrados entre os 7 e 28 dias da análise realizada pelos autores em comparação com a referência. Os autores ainda destacam que as composições químicas diferentes entre as diversas cores de vidro podem ocasionar em reações químicas distintas para cada cor de vidro utilizado, influenciando diretamente nos resultados de resistência mecânica. Ainda de acordo com esse estudo, foi verificado que conforme se aumenta o teor de vidro moído em substituição parcial ao cimento em argamassas, menores foram os resultados obtidos nas análises de expansão.

Lu e Poon (2019) dissertaram, em seu estudo sobre argamassas arquitetônicas, que resíduos de vidro com cores diversas resultam em uma estética agradável, pois os resíduos de vidro têm cores que chamam a atenção, tornando-se atrativas em relação ao aspecto visual do produto. Destacaram também que o resíduo de vidro pode ser utilizado em argamassas cimentícias a fim de incrementar as propriedades que influenciam na durabilidade das argamassas em substituição aos agregados miúdos, levando a redução da retração no processo de secagem visto que a absorção de água do resíduo de vidro é inferior à absorção de água do agregado miúdo natural. Outros aspectos melhorados que os autores identificaram foram a trabalhabilidade no estado fresco que aumentou em relação à referência, e a melhora na resistência à altas temperaturas e à penetração de íons de cloreto.

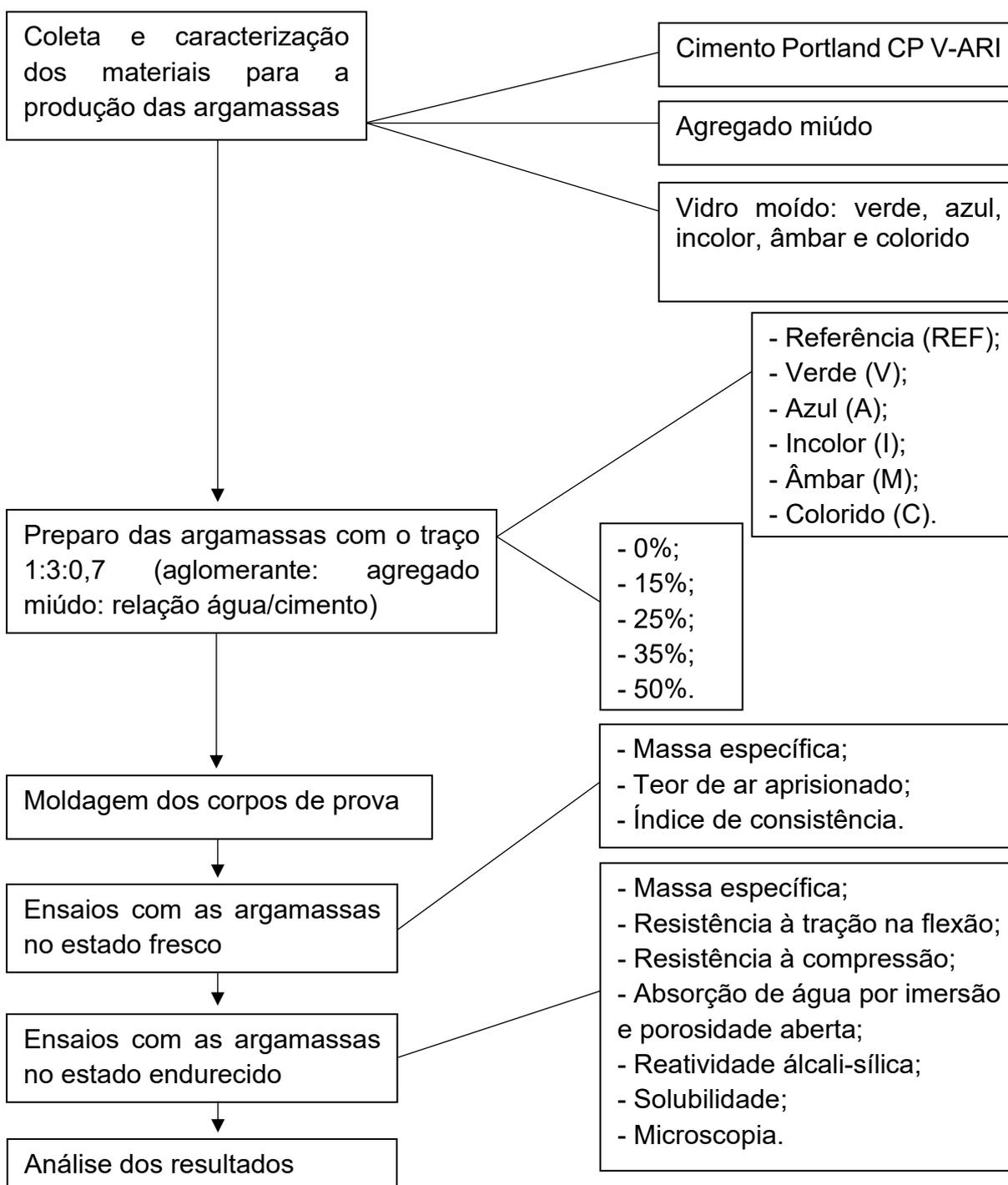
Na análise de Lordelo (2018), foi avaliada a influência da utilização do resíduo de vidro de garrafas na cor âmbar em substituição parcial do agregado miúdo natural em argamassas, com teores de substituição de 10, 20 e 30% em comparação com a argamassa referência (teor de 0% de vidro moído) no estado fresco e endurecido. O estudo obteve como resultado que a substituição de agregado miúdo por vidro moído não demonstrou alteração na fluidez das argamassas, porém, ocasionou a redução da densidade e acréscimo no teor de ar incorporado nas amostras (4%). Não houve a reação álcali-sílica e com até 30% de substituição de agregado miúdo por vidro moído na cor âmbar foi verificado aumento, em relação à argamassa referencial, nas resistências à tração na flexão (73% para o teor de 30% de substituição aos 90 dias) e à compressão (93% para o teor de 30% de substituição aos 90 dias). Além disso, o autor concluiu que as partículas de vidro moído na cor âmbar substituindo o agregado miúdo natural em argamassas podem ser consideradas como agregado não-reativo a longo prazo.

Ainda discorrendo sobre a influência das cores do vidro quando aplicado em argamassas e concretos, Sobolev *et al.* (2007) examinou o efeito dos resíduos de vidro na resistência mecânica e na microestrutura através de análise microscópica das amostras e dados obtidos atestam que o vidro incolor e o vidro verde influenciam mais diretamente no desempenho mecânico da argamassa e do concreto aos 28 dias.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

As principais etapas da pesquisa estão apresentadas na Figura 2.

Figura 2 - Fluxograma dos procedimentos experimentais



Fonte: O Autor (2022)

3.1 Materiais

Neste trabalho foram utilizados os seguintes materiais: cimento Portland, agregado miúdo, vidro moído e água. Não foi utilizado aditivo.

Para o preparo das argamassas o traço utilizado, com base na revisão bibliográfica (CLAISSE, 2019), foi de 1:3 (uma parte de aglomerante para três partes de agregado miúdo) para maior resistência mecânica e durabilidade, e a relação água/cimento (a/c) adotada foi de 0,70, em todas as composições.

3.1.1 Cimento Portland

O cimento Portland utilizado no estudo foi o CP V-ARI que é um material com maior pureza pela ausência de adições como pozolanas e escórias, o que permite avaliar o efeito pozolânico do resíduo de vidro moído. No caso do presente estudo, o material que vai substituir o cimento Portland é o vidro moído (verde, azul, incolor, âmbar e colorido) em proporções distintas. Os ensaios de resistência mecânica foram realizados nas idades de 28, 90 e 365 dias, e não a partir dos 7 dias, como diz a NBR 16697 (ABNT, 2018), pois com idade menor a 28 dias de hidratação, o vidro moído adicionado não terá reagido quimicamente o suficiente para apresentar resultados adequados para serem equiparáveis à argamassa referencial.

A coleta de todo o cimento que fez parte da dosagem das argamassas foi feita de um saco de cimento, que teve seu conteúdo pré-homogeneizado e, posteriormente, dividido nas proporções necessárias para cada traço.

3.1.2 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado nesse trabalho tinha dimensão máxima característica (DMC) de 4,8 mm e módulo de finura (MF) de 2,38 mm, classificado como areia média fina de origem natural, foi retirado da baía de agregados do laboratório da Universidade Tecnológica Federal do Paraná *Campus Curitiba*.

3.1.3 Vidro

O vidro incolor utilizado é proveniente de resíduos de obras da construção civil. No caso dos vidros com cor, foram utilizadas garrafas *long neck* de diferentes cores para o processo de moagem e realização dos ensaios.

3.2 Métodos

3.2.1 Caracterização dos agregados

A granulometria do agregado miúdo foi realizada conforme os procedimentos estabelecidos na NM 248 (ABNT, 2001). Para a determinação da massa específica do vidro moído e do agregado miúdo seguiu-se a NBR NM 52 (ABNT, 2009). Além disso, para a caracterização do vidro e do cimento, foi realizado o ensaio de granulometria a laser com o uso do granulômetro (equipamento que analisa a dimensão das partículas a laser por meio de um sistema de dispersão líquido numa faixa de análise de 0,01 a 3500 micrômetros).

3.2.2 Moagem do vidro

Para a redução do tamanho do vidro, a fim de caber no moinho de panelas, de especificação AMP1-M, da marca AMEF com capacidade de 125 ml, 1120 RPM e granulometria final de aproximadamente 400 mesh, foi necessário utilizar o almofariz, pistilo e um pano. No procedimento o vidro foi colocado no almofariz e foi coberto com um pano. Depois, golpes foram dados para quebrar o vidro em pedaços menores. Após, iniciou-se a moagem de cada cor do vidro separadamente, no moinho de panelas (Figura 3 (a)) por 60 segundos, com o intuito de que 90% das partículas ficassem com diâmetro inferior a 75 μm .

O painel do moinho de panelas foi ajustado para o tempo de ciclo de 60 segundos regressivos (Figura 3 (b)). Posteriormente, a tampa era aberta e as panelas eram retiradas com o conteúdo do vidro moído.

Figura 3 - Moinho de Painelas da UTFPR
(a) Equipamento; (b) Painel do moinho de painelas



(a)



(b)

Fonte: O Autor (2022)

A seguir, as painelas menores foram retiradas para facilitar o manuseio e, então, o vidro moído colocado dentro de recipientes para armazená-lo. Cada cor foi moída individualmente (Figura 4) e após cada cor, o conjunto de painelas foi limpo com agregado miúdo que foi moído durante 60 segundos no moinho de painelas para que não tivesse resíduo misturado de outras cores de vidro. Os outros acessórios utilizados no processo também foram limpos entre a moagem de uma cor e outra.

Depois da moagem inicial de 60 segundos, o vidro moído foi peneirado na peneira de 0,3 milímetros e todo o vidro retido na peneira foi novamente moído por mais 60 segundos, em seguida, o resíduo foi peneirado novamente até todo o material passar na peneira 0,3 mm.

Figura 4 - Processo de moagem dos vidros

Fonte: O Autor (2022)

Quanto mais fino o resíduo de vidro for moído, maior será a probabilidade de não gerar a reação álcali-sílica (SOUSA NETO, 2014). Para tanto, posteriormente, foi realizado o ensaio de granulometria a laser no resíduo moído, para verificar se o resíduo retido estava entre 10 e 15% na peneira 45 μm com a finalidade de reduzir a

influência causada pelo vidro moído na hidratação da argamassa. Deste modo, o restante do resíduo moído (85 a 90%) deveria ficar abaixo de 45 µm.

3.2.3 Dosagem das argamassas

A substituição do cimento Portland por resíduo de vidro moído foi realizada em volume, considerando a massa específica dos materiais. Assim, foram preparadas argamassas, sem vidro moído (referência) e com vidro moído (azul, verde, âmbar, incolor e colorido) com diferentes porcentagens de substituições, 15, 25, 35 e 50% (Tabela 1).

Tabela 1 - Argamassas preparadas

Argamassas	Cimento	Vidro Incolor	Vidro Azul	Vidro Âmbar	Vidro Verde	Vidro Colorido	Relação a/c
REF	100%	-	-	-	-	-	
I15	85%	15%					
I25	75%	25%					
I35	65%	35%					
I50	50%	50%					
A15	85%		15%				
A25	75%		25%				
A35	65%		35%				
A50	50%		50%				
M15	85%			15%			0,70
M25	75%			25%			
M35	65%			35%			
M50	50%			50%			
V15	85%				15%		
V25	75%				25%		
V35	65%				35%		
V50	50%				50%		
C15	85%					15%	
C25	75%					25%	
C35	65%					35%	
C50	50%					50%	

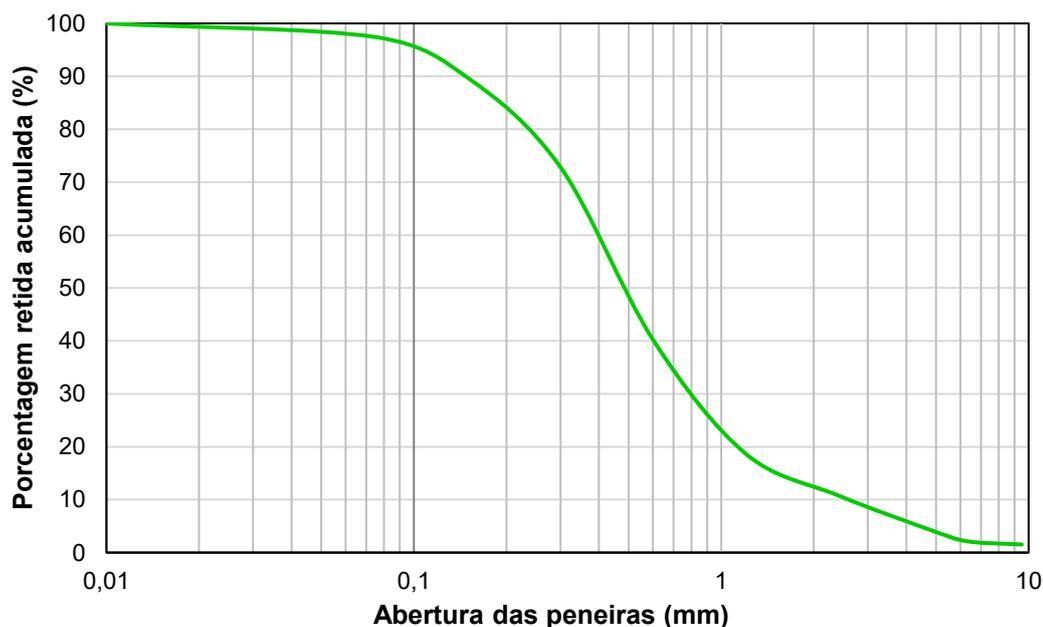
Fonte: O Autor (2022)

A argamassa denominada REF, é a argamassa referencial, composta apenas por cimento Portland, agregado miúdo e água. Já, as argamassas com 15, 25, 35 e 50% de substituição do cimento Portland por vidro moído, foram denominadas da seguinte forma: X15, X25, X35 e X50, para as argamassas contendo vidro moído, onde X é a letra inicial de cada cor de vidro que foi utilizada, sendo, “I” para incolor, “V” para verde, “M” para âmbar (marrom), “A” para azul e “C” para colorido. Sendo que no vidro colorido, todas as outras cores de vidro foram misturadas em partes iguais (1/4 incolor, 1/4 azul, 1/4 verde e 1/4 âmbar).

3.2.4 Caracterização dos agregados e aglomerantes

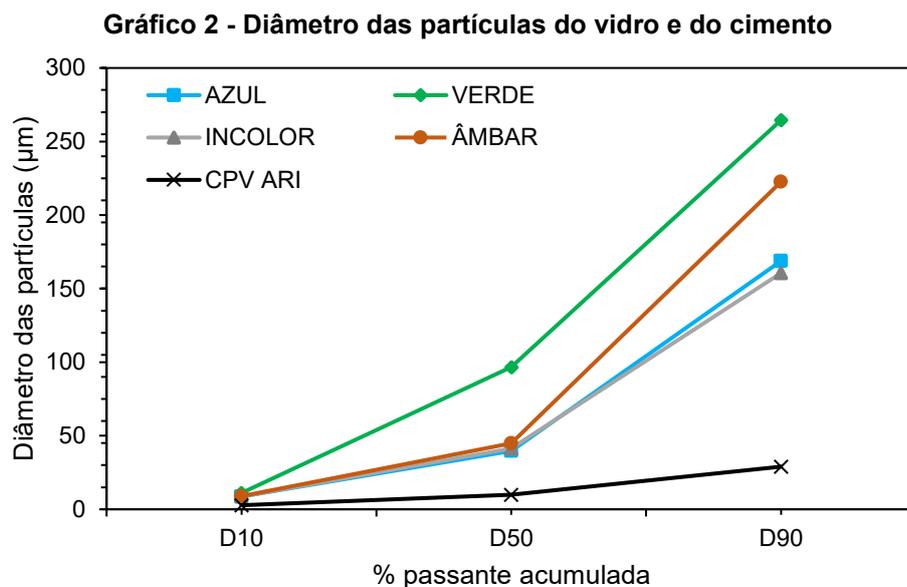
A caracterização, conforme o Gráfico 1, foi realizada da análise da média da composição de 3 amostras de agregado miúdo submetidas ao ensaio de composição granulométrica conforme a NM 248 (ABNT, 2001). O diâmetro máximo característico (DMC) identificado foi de 4,8 mm e o módulo de finura (MF) foi de 2,38 mm. De acordo com a NM 52, a massa específica obtida para o agregado miúdo foi de 2,57 g/cm³, para o vidro moído foi de 2,44 g/cm³ e para o cimento foi de 3,11 g/cm³ (ABNT, 2002).

Gráfico 1 - Composição granulométrica do agregado miúdo



Fonte: O Autor (2022)

De acordo com os resultados obtidos no Gráfico 2, o diâmetro médio das partículas do CP V-ARI utilizado para produzir as argamassas foi de 9,8 μm . E as partículas de vidro moído, com exceção do vidro moído verde que apresentou 96,7 μm de diâmetro médio das partículas, todos os demais vidros apresentaram diâmetro médio inferior a 44,9 μm .



Fonte: O Autor (2022)

Com esses valores pode-se inferir, segundo comparação com os resultados de Khmiri, Samet e Chaabouni (2012) em que o vidro moído que apresentar dimensão inferior a 75 μm impede que a reação álcali-sílica (RAS) ocorra porque adquire comportamento e característica de pozolana natural em decorrência da sua alta quantidade na sua composição de sílica amorfa. Deste modo, nos resultados deste trabalho apenas o vidro verde moído não apresentou atividade pozolânica, indicando que no estudo da RAS é provável que tenha ocorrido a reatividade álcali-sílica.

Borges (2021) conclui que os resultados provenientes do estudo de pozolanicidade apontaram que taxas de reação mais altas são obtidas com maiores áreas de contato, visto que quando a granulometria do vidro moído era reduzida, os efeitos da atividade pozolânica se destacavam. Na análise deste trabalho, concluiu-se que os vidros moídos nas diferentes cores apresentaram atividade pozolânica, assim como no trabalho do autor referenciado, devido a granulometria obtida após a moagem do vidro.

3.2.5 Preparo das argamassas

Para o preparado das argamassas foi utilizado o misturador mecânico, denominado argamassadeira (Figura 5), com rotação planetária que trabalha em duas velocidades diferentes (baixa e alta).

Figura 5 - Argamassadeiras utilizadas no laboratório



Fonte: O Autor (2022)

A mistura foi feita de acordo com a NBR 7215 (ABNT, 2019) e a NBR 16738 (ABNT, 2019). Colocou-se primeiramente o agregado miúdo, o aglomerante e o vidro moído e homogeneizou-se manualmente o material seco, após foi adicionado a água aos poucos, em seguida a argamassadeira foi ligada por 1 minuto na velocidade baixa para misturar a água com o material seco, posteriormente por mais 1 minuto na velocidade alta para homogeneizar a argamassa.

Logo em seguida, o misturador da argamassadeira foi desligado por 1 minuto para, com o auxílio de uma espátula, raspar as bordas da cuba e a pá do misturador. Para finalizar, a argamassadeira foi ligada na velocidade alta por mais 1 minuto.

3.2.6 Preparo dos corpos de prova

No presente estudo foram moldados 2 corpos de prova cilíndricos com diâmetro de 50 mm e altura de 100 mm para cada tipo de argamassa (referência e com cada cor de vidro), totalizando 42 corpos de prova.

A moldagem dos corpos de prova cilíndricos foi realizada de acordo com a NBR 7215 em quatro camadas de alturas aproximadamente iguais com a ajuda da espátula e cada camada foi adensada com 30 golpes uniformes, sendo rasada a superfície após a última camada adensada (ABNT, 2019).

Já, para os ensaios de resistência mecânica, conforme a NBR 13279 (ABNT, 2005) foram moldados 3 corpos de prova prismáticos com dimensões 40x40 mm de seção transversal e 160 mm de altura para cada tipo de argamassa e para cada idade (Figura 6).

Figura 6 - Corpos de prova prismáticos



Fonte: O Autor (2022)

No total foram ensaiados 189 corpos de prova para o ensaio de resistência à tração na flexão e 378 corpos de prova para o ensaio de resistência à compressão (Figura 7). Para o preparo dos corpos de prova prismáticos seguiu-se a NBR 16738 (ABNT, 2019).

Figura 7 - Ensaio de resistência à compressão



Fonte: O Autor (2022)

3.2.7 Idade dos corpos de prova

Os ensaios realizados no estado fresco, foram feitos logo após o preparo da argamassa, como exemplificado na argamassa fresca na Figura 8 (a) e o ensaio de índice de consistência (*flow table*) na Figura 8 (b).

Figura 8 - Argamassa no estado fresco

(a) Preparo da argamassa; (b) Aferição do índice de consistência



(a)



(b)

Fonte: O Autor (2022)

Já os ensaios nos corpos de prova no estado endurecido, foram realizados com idades diferentes em cada ensaio de acordo com a necessidade específica de cada um deles com o intuito de que o tempo de cura fosse suficiente para que o vidro moído apresentasse atividade pozolânica (Tabela 2).

Tabela 2 - Número de corpos de prova e idades dos ensaios

Ensaio	Idade do ensaio	Número de CPs
Massa específica	28 dias	42
Resistência à tração na flexão	28, 91 e 365 dias	189
Resistência à compressão	28, 91 e 365 dias	378
Absorção de água por imersão e porosidade aberta	28 dias	42
Reatividade álcali-silica (amostras de 50% e REF)	1, 2, 3, 4, 5, 7, 14, 21, 28, 35, 42, 50, 64, 90, 180, 270 e 365	18
Solubilidade (amostras de 50% e REF)	28 dias	6

Fonte: O Autor (2022)

3.2.8 Condições de cura

A idade do corpo de prova é contada a partir do momento em que o cimento Portland entra em contato com a água.

Finalizada o preparo dos corpos de prova, as fôrmas foram protegidas com plástico filme na face superior para não perder água demasiadamente para o ambiente e para proteger contra a queda de demais partículas, assim como evidenciado na Figura 9.

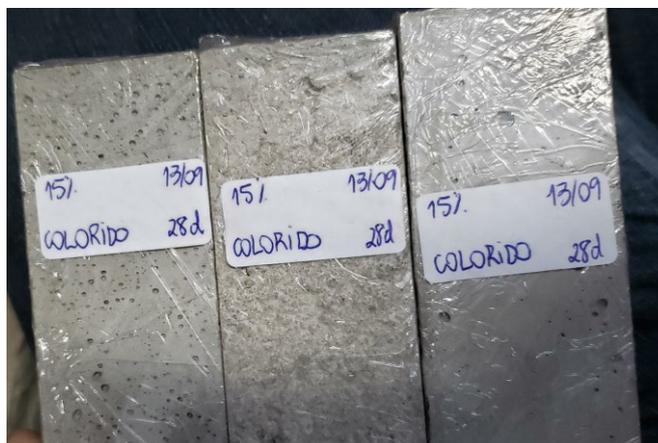
Figura 9 - Condições de cura iniciais das argamassas



Fonte: O Autor (2022)

Vinte e quatro horas após a moldagem, os corpos de prova foram desmoldados, identificados e envoltos com plástico filme em todas as faces de modo a garantir que as reações químicas de hidratação fossem mantidas sem perder água para o ambiente até o momento imediatamente anterior ao ensaio (Figura 10).

Figura 10 - Corpos de prova após desmoldagem



Fonte: O Autor (2022)

Além disso, como pode ser visto na Figura 11, os corpos de prova foram colocados em um local plano e visando o armazenamento foram mantidos dentro de uma sala de laboratório com controle de climatização de $23 (\pm 2) ^\circ\text{C}$ e umidade relativa do ar igual ou superior a 50%, atendendo aos padrões estabelecidos na NBR 16738 (ABNT, 2019).

Figura 11 - Armazenamento dos corpos de prova



Fonte: O Autor (2022)

3.3 Ensaio das argamassas no estado fresco

Os ensaios das argamassas no estado fresco se dividiram em: massa específica e teor de ar aprisionado, seguindo as premissas da NBR 13278 (ABNT, 2005) e o índice de consistência realizado conforme a NBR 13276 (ABNT, 2016).

3.4 Ensaio das argamassas no estado endurecido

Para a caracterização das argamassas no estado endurecido, foram realizados os seguintes ensaios: massa específica, de acordo com a norma ABNT NBR 13280 (ABNT, 2005); resistência à tração na flexão e resistência à compressão, conforme a NBR 16738 (ABNT, 2019); absorção de água por imersão e porosidade

aberta segundo a NBR 9778 (ABNT, 2005) representado na Figura 12 o banho térmico; os ensaios de reação álcali-sílica, NBR 15577-4 e 15577-1 (ABNT, 2018), e solubilidade em conformidade com a NBR 10006 (ABNT, 2004), por não serem usuais, foram descritos a seguir.

Figura 12 - Ensaio de absorção de água por imersão e porosidade aberta



Fonte: O Autor (2022)

3.4.1 Reatividade álcali-sílica

A reatividade expansiva álcali-sílica, um dos tipos da reação álcali-agregado, foi verificada por meio da variação de comprimento dos prismas de argamassa em conformidade com a NBR 15577-1 (ABNT, 2018) e com a NBR 15577-4 (ABNT, 2018). Foram moldados 3 corpos de prova (25x25x285 mm) para cada argamassa com substituição parcial de 50% do CP V-ARI por vidro moído e mais 3 para a argamassa referência, totalizando 18 prismas. Após o tempo inicial de cura de 24 horas os corpos de prova foram envolvidos com plástico filme e armazenados dentro de um recipiente numa sala climatizada de 23 ± 2 °C. As aferições da variação de comprimento

(variação dimensional) foram obtidas nas idades de 1, 2, 3, 4, 5, 7, 14, 21, 28, 35, 42, 50, 64, 90, 180, 270 e 365 dias.

No ensaio, a variação dimensional da longitude foi aferida em duas faces (frente e verso) do corpo de prova, tendo à frente determinada, fixada e identificada para que não fosse confundida com as outras faces do prisma em cada nova medição (Figura 13).

Figura 13 - Aferição da variação dimensional



Fonte: O Autor (2022)

Para tanto, os corpos de prova foram dispostos verticalmente no equipamento de ensaio de variação longitudinal que contém um relógio medidor (com precisão de 0,001 mm). Ao final das aferições, a média da variação dimensional em cada uma das idades de ensaio foi analisada.

3.4.2 Solubilidade

O ensaio de solubilidade seguiu as especificações da NBR 10006 (ABNT, 2004), norma que padroniza o procedimento para a obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Os corpos de prova, nas amostras com teor de 50% de substituição

e na referência, foram um a um sendo quebrados em partículas pequenas com o auxílio de uma marreta em um recipiente metálico limpo, depois foram passados na peneira de malha de 9,5 milímetros, armazenados e identificados (Figura 14).

Figura 14 - Preparos para o ensaio de solubilidade



Fonte: O Autor (2022)

Uma porção de 60 gramas da amostra foi aferida e colocada em contato com 240 ml de água destilada e deionizada em um béquer, que foi rotacionado em velocidade de rotação baixa por 5 minutos. Após, o béquer foi tampado com plástico filme e deixado em repouso por 7 dias dentro de um laboratório com temperatura controlada de 25 ± 1 °C (Figura 15).

Figura 15 - Preparação do ensaio de solubilidade



Fonte: O Autor (2022)

Após o intervalo de 7 dias, o líquido com as partículas em suspensão foi filtrado com o auxílio de uma bomba de vácuo e de um filtro simples e, então, com a

amostra líquida obtida (Figura 16(a)), aferiu-se o pH (Figura 16(b)) e a condutividade elétrica de cada amostra (Figura 16(c)).

Figura 16 - Ensaio de solubilidade

(a) Amostra de solubilidade. (b) Equipamento para aferir o pH. (c) Equipamento para aferir a condutividade elétrica.



(a)



(b)

Fonte: O Autor (2022)



(c)

3.4.3 Microscopia

O ensaio de microscopia foi realizado com a utilização do microscópio Olympus (Figura 17) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná Campus Curitiba (UTFPR-CT).

Figura 17 - Análise microscópica



Fonte: O Autor (2022)

O microscópio da marca OLYMPUS, Modelo BX51 com luz transmitida e refletida de 100 W halogênio e altura máxima da amostra de 25 mm, foi manuseado pelo técnico do laboratório e estava ligado diretamente a um computador onde todas as informações da análise eram transmitidas simultaneamente para a tela do monitor através do software Stream Essentials. Várias imagens foram obtidas pela câmera SC30, colorida de 3.3 megapixel, em diferentes aproximações e posteriormente foram selecionadas para a análise microscópica das amostras com teor de 50% de substituição.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 Ensaio das argamassas no estado fresco

Na Tabela 3, tem-se os resultados da massa específica no estado fresco das argamassas preparadas. Comparando estatisticamente todas as argamassas com as mesmas proporções de substituição entre si indistintamente da cor (exemplo: todas as argamassas com teor de 15% verde, azul, incolor, âmbar e colorido), verifica-se com o desvio padrão em relação à média, que são estatisticamente iguais ou diferentes com base nos resultados.

Tabela 3 - Massa específica nos diferentes teores de substituição

Argamassas	Média (g/cm³)	1 desvio 1 (68%)	2 desvios (95%)	3 desvios (99%)	REF (massa específica de 2,00 g/cm³)
Teor de 15%	2,02	± 0,02	± 0,04	± 0,06	Iguais com 68% de certeza
Teor de 25%	2,00	± 0,02	± 0,04	± 0,06	Iguais com 68% de certeza
Teor de 35%	1,97	± 0,02	± 0,04	± 0,06	Iguais com 95% de certeza
Teor de 50%	1,95	± 0,02	± 0,04	± 0,06	Iguais com 99% de certeza

Fonte: O Autor (2022)

Uma análise de um conjunto de dados comparando a média do valor (\bar{y}) das amostras com um desvio padrão, evidencia que com 1 desvio padrão para mais e para menos, as amostras que ficarem nessa faixa de valores tem a probabilidade com 68% de certeza de serem estatisticamente iguais. Se for levado em consideração 2 vezes o desvio padrão, os resultados que ficarem nessa faixa de valores mais ampla do que a mencionada anteriormente evidenciam que com 95% de certeza esses resultados são estatisticamente iguais. Por fim, se for levado em consideração 3 vezes o desvio padrão para determinar a faixa de intervalo das amostras que se encaixam nessa amplitude, tem-se que com aproximadamente 99% de certeza estes resultados são estatisticamente iguais aos demais resultados que se encontrarem dentro da faixa, não resultando estatisticamente em uma diferença significativa na comparação dos resultados.

Analisando separadamente as amostras feitas com 15% de substituição do CP V-ARI por vidro moído, Tabela 3, foi obtido uma média de 2,02 g/cm³. Evidencia-

se que essas massas específicas podem ser consideradas iguais com 68% de certeza dentro do intervalo de confiança. Comparando o valor médio das amostras com 15% de substituição com a referência, não se tem redução e sim um aumento de 1% na massa específica no estado fresco.

Nas amostras feitas com 25% de substituição do CP V-ARI por vidro moído, foi obtido uma média de 2,00 g/cm³. Evidencia-se que essas massas específicas podem ser consideradas iguais à referência com 68% de certeza dentro do intervalo de confiança. E na comparação do valor médio das amostras com 25% de substituição com a referência, não se tem redução nem aumento, pois apresentam os mesmos valores de massa específica.

Para as amostras preparadas com 35% de substituição do CP V-ARI por vidro moído, foi obtido uma média de 1,97 g/cm³. Evidencia-se que essas massas específicas também podem ser consideradas iguais ao valor referencial com 95% de certeza dentro do intervalo de confiança. Comparando o valor médio das amostras com 35% de substituição com a referência, tem-se uma redução de 1,5%.

Já para as amostras feitas com 50% de substituição do CP V-ARI por vidro moído, obteve-se uma média de 1,95 g/cm³. Desta forma, evidencia-se que as massas específicas de todas as argamassas com vidro moído no teor de 50% são estatisticamente iguais à referência com 99% de certeza dentro do intervalo de confiança. Quando comparado o valor médio das amostras com 50% com a referência, tem-se que a massa específica média dos vidros apresentou redução de 2,5% da massa específica.

Comparando as argamassas de diferentes teores na cor verde, Tabela 4, tem-se que a média da massa específica resulta em 1,96 g/cm³, sendo igual ao valor referencial com 95%.

Tabela 4 - Massa específica nas diferentes cores

Argamassas	Média (g/cm³)	1 desvio 1 (68%)	2 desvios (95%)	3 desvios (99%)	REF (massa específica de 2,00 g/cm³)
VERDE	1,96	± 0,03	± 0,06	± 0,09	Iguais com 95% de certeza
AZUL	1,99	± 0,01	± 0,02	± 0,03	Iguais com 68% de certeza
INCOLOR	2,00	± 0,05	± 0,10	± 0,15	Iguais com 68% de certeza
ÂMBAR	2,00	± 0,03	± 0,06	± 0,09	Iguais com 68% de certeza
COLORIDO	1,98	± 0,03	± 0,06	± 0,09	Iguais com 68% de certeza

Fonte: O Autor (2022)

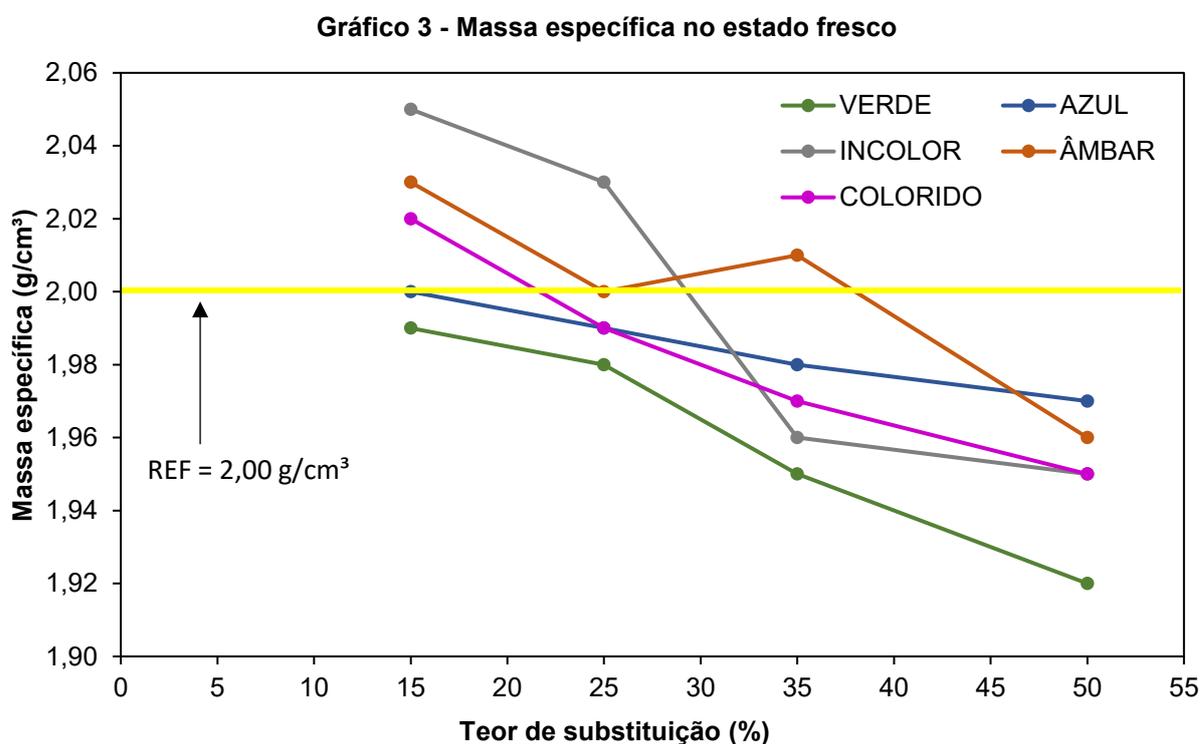
Na argamassa produzida com vidro azul moído, a média da massa específica obtida foi de $1,99 \text{ g/cm}^3$, resultando com 68% de certeza do intervalo de confiança, que estatisticamente os valores em relação à referência são considerados iguais.

Em relação a argamassa do vidro incolor, tem-se uma média de massa específica de $2,00 \text{ g/cm}^3$. Nesta análise, também com 68% de certeza, pode ser considerada igual ao valor referencial que ficou dentro da faixa de valores.

Para o vidro âmbar, obteve-se a média da massa específica com o valor de $2,00 \text{ g/cm}^3$. Sendo assim, os resultados são considerados iguais ao valor da argamassa referencial com 68% de certeza.

Já para as argamassas com vidro colorido, a média da massa específica resulta em $1,98 \text{ g/cm}^3$. Analisando o resultado das amostras, tem-se com 68% de certeza dentro do intervalo de confiança que os resultados são iguais à referência.

De acordo com os valores apresentados no Gráfico 3, algumas análises puderam ser evidenciadas em relação à massa específica no estado fresco.



Fonte: O Autor (2022)

Analisando-se todos os 20 valores da massa específica no estado fresco das argamassas que contém vidro moído (eixo das abscissas do V50 até o C15), tem-se uma média de $1,99 \text{ g/cm}^3$ com desvio padrão de 0,03. Sendo assim, com 1 desvio

($1,99 \pm 0,03$) é possível afirmar com 68% de certeza que todas as massas específicas no estado fresco das argamassas que contém vidro moído substituindo parcialmente o CP V-ARI são estatisticamente iguais. Em comparação com o resultado da argamassa de referência no valor de $2,00 \text{ g/cm}^3$, o valor médio encontrado de $1,99 \text{ g/cm}^3$ é apenas 0,5% menor do que a referencial.

Na análise das argamassas com vidro moído em diferentes proporções, a média do consumo de cimento analisando todas as cores com 15% de vidro moído, pôde-se observar que a média do consumo de cimento foi de $375,70 \text{ kg/m}^3$, resultando em um aumento de consumo de 11,98% em relação à argamassa com 25% de vidro moído e uma diminuição de aproximadamente 11,91% em comparação com a argamassa referência.

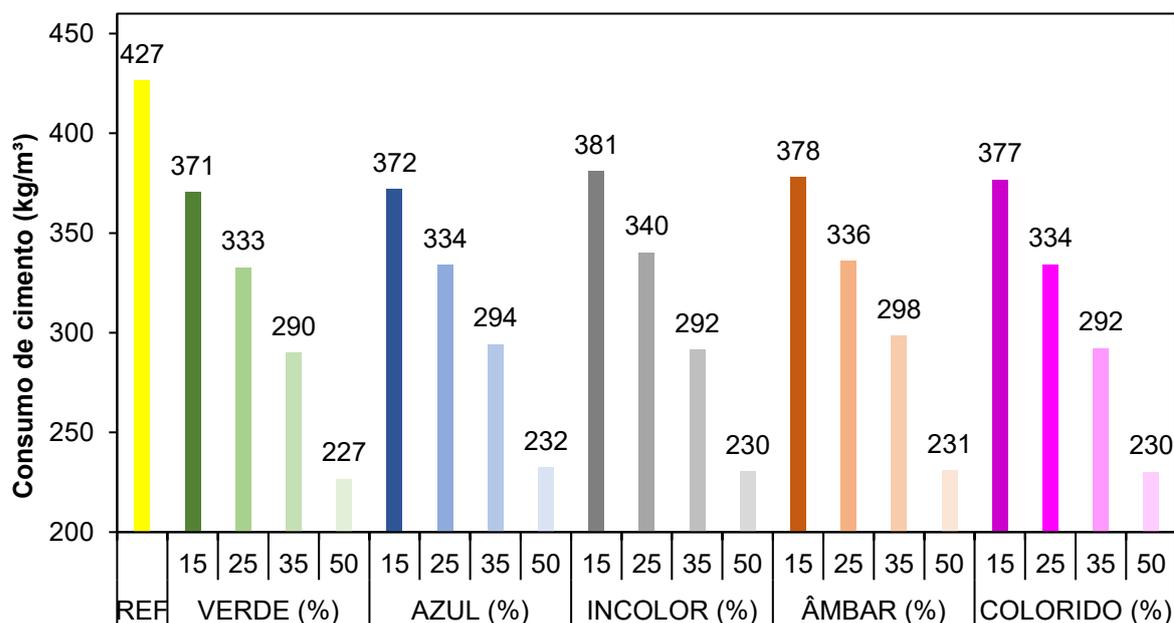
Nas argamassas feitas com 25% de vidro moído, contactou-se que a média do consumo de cimento foi de $335,52 \text{ kg/m}^3$. Comparando com as argamassas de 35% de vidro moído, o consumo aumentou em 14,39%. O resultado obtido sugere uma redução de 21,33% no consumo de cimento em comparação com a argamassa referência.

Para as argamassas com 35% de vidro moído, a média do consumo de cimento foi de $293,32 \text{ kg/m}^3$, representando um aumento de 27,44% no consumo em comparação com as argamassas de 50% de vidro moído e uma redução de 31,23% com a argamassa referencial.

Já nas argamassas feitas com 50% de substituição do CP V-ARI por vidro moído foi de $230,16 \text{ kg/m}^3$. Este resultado aponta para uma redução de 46,04% em comparação com os $426,5 \text{ kg/m}^3$ da argamassa referência.

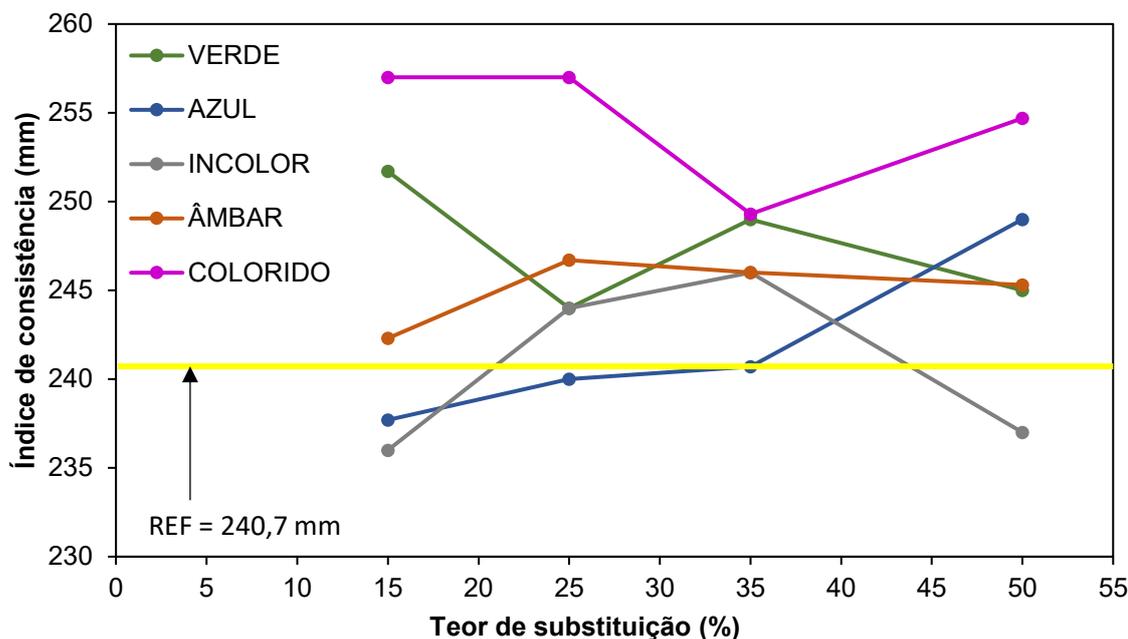
No estudo realizado por Freitas (2019), se assimila a mesma relação obtida no Gráfico 4 deste trabalho, onde quanto maior o teor de vidro moído incorporado em substituição ao cimento Portland (CP) menor é o consumo de cimento, e consequentemente maior é a trabalhabilidade da argamassa com quantias maiores de vidro moído visto que a água tem menos aglomerante para reagir.

Gráfico 4 - Consumo de cimento



Fonte: O Autor (2022)

Os resultados do ensaio de consistência (*flow table*) apontam para valores muito próximos independentemente da cor de vidro adotada na argamassa, por essa razão a análise foi realizada em conjunto, comparando apenas as argamassas de vidro moído em substituição ao CP V-ARI com a argamassa referência. Conforme os resultados do Gráfico 5, obteve-se o resultado médio de 245,9 mm, e a diferença entre o maior e o menor valor identificada foi de 21 mm (2,1 cm). Quando exposto em contraste com a consistência da argamassa de referência, percebeu-se que houve um aumento de 2,17% no valor médio das argamassas com vidro moído, indicando que elas ficaram menos consistentes do que a argamassa de referência, melhorando a trabalhabilidade na comparação com a REF.

Gráfico 5 - *Flow table*

Fonte: O Autor (2022)

Assim como foi evidenciado no estudo de Oliveira (2020), os resultados de índice de consistência deste trabalho na *flow table* apontam que quando o vidro moído é incorporado à compostos cimentícios de alto desempenho, a trabalhabilidade é mantida, sem perda que distancie significativamente do valor referencial.

Com o teor de substituição de 20%, Lee *et al.* (2018) verificou que houve aumento na trabalhabilidade do composto cimentício em relação à referência e atribuiu esse resultado tanto em relação ao tamanho inferior da superfície específica quanto ao formato das partículas de vidro moído. Em concordância com Sharifi, Afshoon e Firoozjaie (2015), conclui-se que a trabalhabilidade aumenta porque o vidro apresenta uma capacidade irrelevante de absorção de água não apenas devido ao aumento do teor de vidro moído em pequenas partículas, mas também esses valores se devem à redução do montante de cimento. Desta forma, a trabalhabilidade tende a aumentar porque com maior relação de água/cimento se eleva a fluidez e consequentemente a trabalhabilidade.

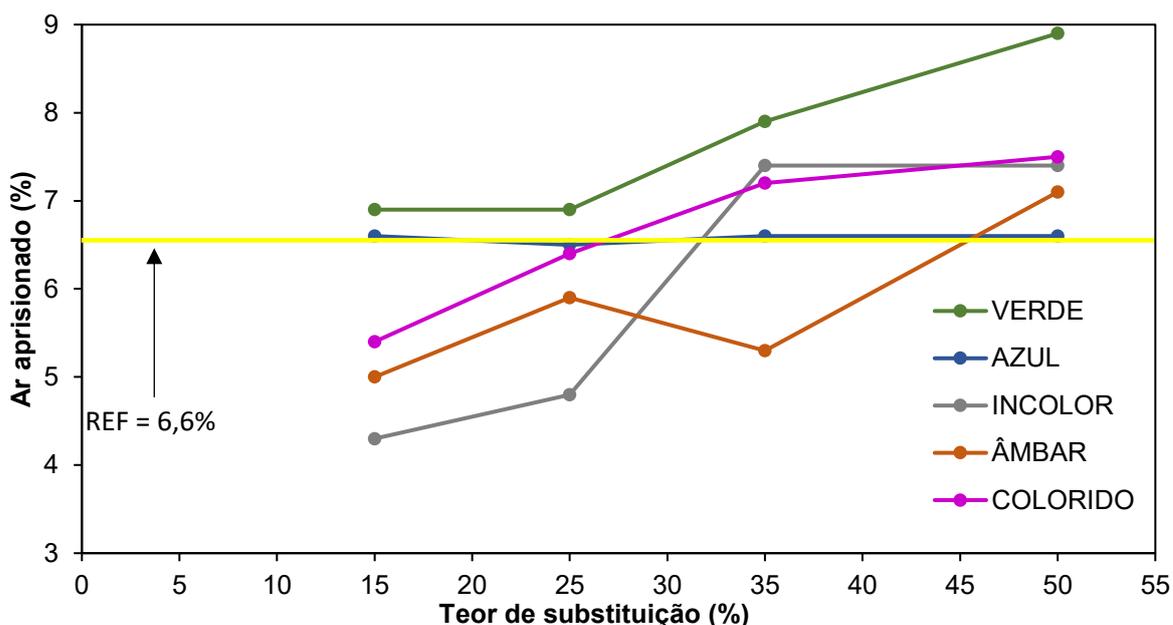
Em partículas de vidro moído com dimensão média inferior a 300 μm , conforme o teor de vidro moído se eleva no composto cimentício, é verificada a redução da trabalhabilidade em proporção ligada diretamente ao teor utilizado (NWAUBANI e POUTOS, 2013). Em contrapartida, neste trabalho, não foi obtido o

mesmo resultado, visto que o vidro azul apresentou resultado contrário (maior o teor, maior a trabalhabilidade) e as demais cores resultaram em dados onde a proporcionalidade de vidro moído não apresentou mudança proporcional nos resultados, possivelmente devido à dimensão média inferior a 44,9 µm das cores dos vidros, exceto o verde.

O vidro moído substituindo o cimento com teor variando de 0 a 20% no estudo de Patel *et al.* (2019), no teor de 20%, foi verificado a melhora da trabalhabilidade. Os autores atribuem o resultado obtido em função da finura das partículas (entre 75 e 63 µm) e à elevada área específica do vidro moído. Neste estudo, os resultados apontaram para a estabilidade da trabalhabilidade nas argamassas de diferentes teores com vidro moído colorido e âmbar. Na argamassa incolor, com exceção de I50, conforme o teor de vidro aumentava também foi verificado aumento na trabalhabilidade. Na cor azul verificou-se o contrário, quanto menor o teor de vidro moído, houve redução na trabalhabilidade. E no vidro verde, aumentando o teor de vidro moído, os resultados da trabalhabilidade reduziram.

Na análise dos resultados do teor de ar aprisionado, de acordo com o Gráfico 6, tem-se que nas argamassas de cor azul, a médio do teor de ar aprisionado foi de 6,58%, sendo praticamente o mesmo valor da argamassa de referência.

Gráfico 6 - Teor de ar aprisionado



Fonte: O Autor (2022)

Na argamassa incolor, as proporções do I50 e I35 apresentaram o mesmo resultado de 7,4% enquanto para as argamassas I25 e I15, o teor de ar aprisionado diminuiu significativamente, apresentando os valores respectivos de 35,14% e 41,89% de redução.

Para as argamassas verde e colorida, o teor de ar aprisionado diminuiu ao passo que a porcentagem de cimento foi aumentando nas argamassas. A argamassa âmbar foi a única que apresentou valores desordenados em relação à quantidade de vidro moído na argamassa.

Comparando a totalidade das argamassas com vidro moído com a referencial tem-se a média de 6,53% de teor de ar aprisionado contra os 6,6% da referência, sinalizando uma redução de 1,06%. Os valores mais destoantes da REF podem ser observados para as argamassas V50 e I15. Ambas estão com a diferença de 34,85% do valor referencial.

Soliman e Tagnit-Hamou (2016) afirmam que a densidade se torna menor à medida que o teor de vidro moído é adicionado, resultando em um maior teor de ar aprisionado. A massa específica do CP V-ARI é maior do que do vidro moído, por esse motivo que com teores maiores de substituição, as amostras apresentam o teor de ar aprisionado maior, resultante assim como nesse estudo.

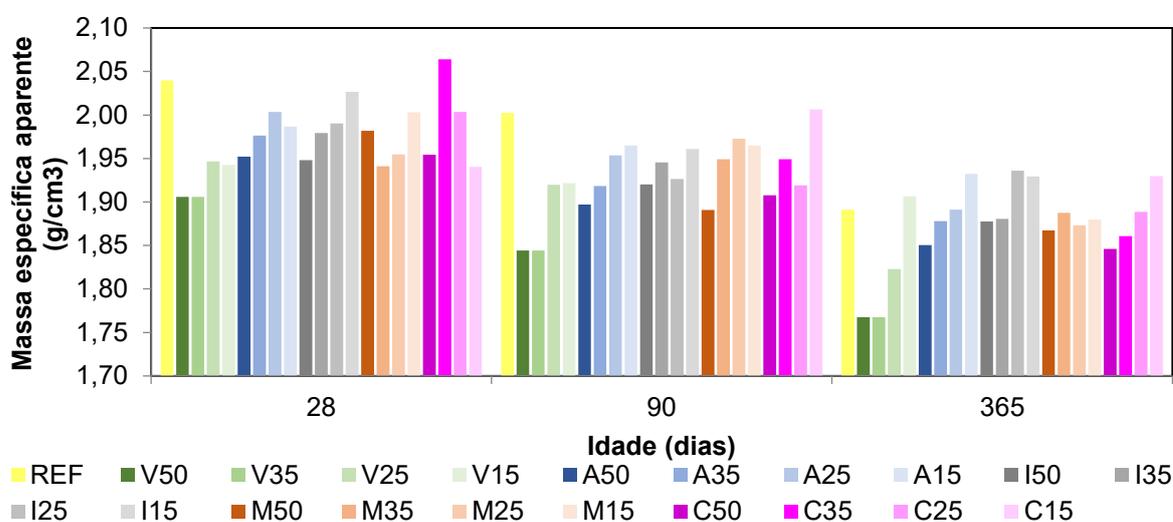
De acordo com a bibliografia de Sharifi, Afshoon e Firoozjaie (2015), quanto menor for o teor de ar aprisionado, mais água disponível estará presente para reagir quimicamente e aumentar a densidade e resistência mecânica das amostras e isso pôde ser evidenciado neste estudo, visto que as argamassas com teor de 15 e 25% de substituição apresentaram os resultados mecânicos de resistência à tração na flexão e resistência à compressão mais satisfatórios em relação à referência.

4.2 Ensaio das argamassas no estado endurecido

4.2.1 Massa específica aparente

A massa específica aparente no estado endurecido diminuiu, na maioria das argamassas, com o aumento da idade (tempo de hidratação) (Gráfico 7).

Gráfico 7 - Massa específica aparente no estado endurecido



Fonte: O Autor (2022)

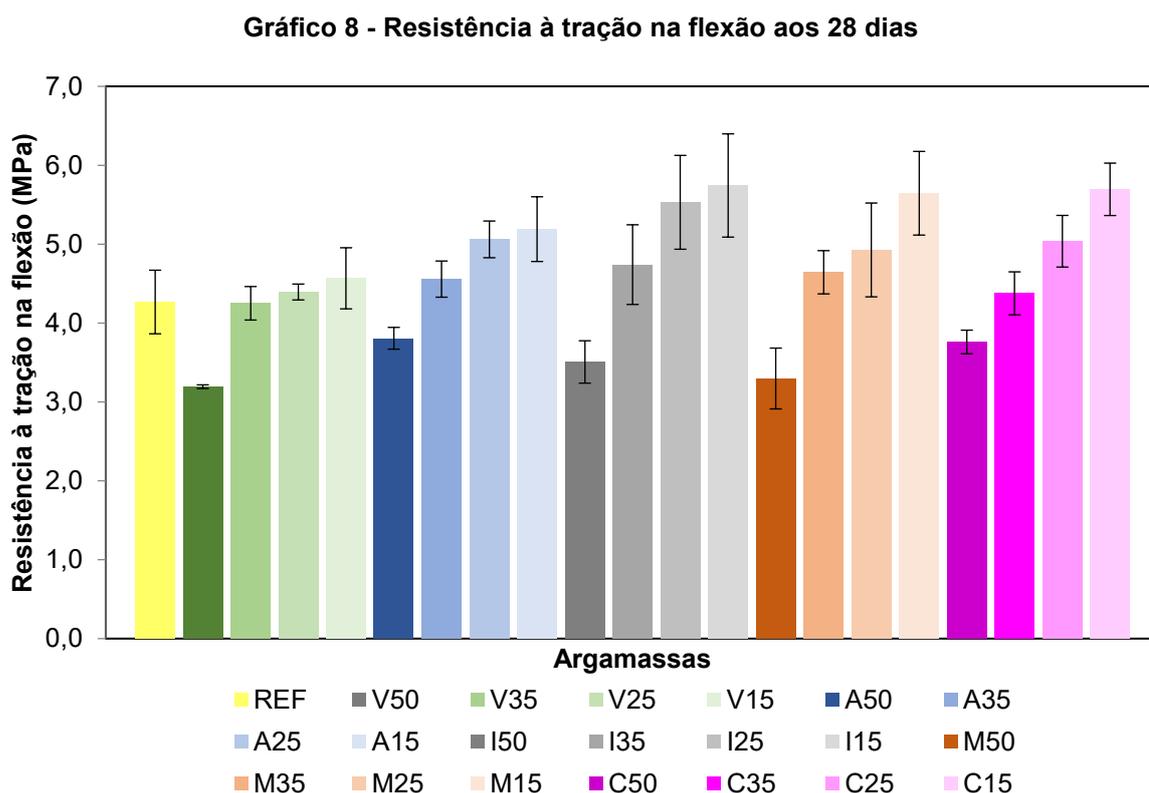
No caso da argamassa REF, foi de 2,04 g/cm³ com 28 dias, para 2,00 g/cm³ aos 90 dias e 1,88 g/cm³ aos 365 dias. Comparando as amostras com idade de 90 dias em relação às amostras de 28 dias, tem-se que M35 (+0,4%), M25 (+0,9%) e C15 (+3,4%) tiveram aumento na massa específica aparente. Considerando a idade de 365 dias em relação aos 90 dias, tem-se apenas a argamassa I25 com aumento de 0,5% na massa específica aparente.

Analisa-se ainda que quando aumenta a proporção de vidro moído em substituição ao CP V-ARI, a massa específica aparente tende a ser menor do que as substituições com porcentagens mais baixas. No geral, todas as cores apresentaram massas específicas aparente muito próximas quando comparamos as mesmas proporções de substituição, por exemplo as cores azul e incolor nas três idades analisadas. A maior diferença entre as massas específicas aparente de diferentes cores pôde ser verificada nas amostras C35, com redução de 9,9% na massa

específica aparente de 365 dias comparada ao resultado dos 28 dias e V50, com redução de 7,3% (mesmo valor obtido da análise da argamassa referencial) nas mesmas idades.

4.2.2 Resistência à tração na flexão

Os resultados de resistência à tração na flexão aos 28 dias são apresentados no Gráfico 8 com a barra representando na ordenada o valor da resistência mecânica atingida em MPa e na abscissa as argamassas feitas para as análises, levando em consideração ainda o desvio padrão para cima e para baixo disperso na extremidade de cada barra.



Fonte: O Autor (2022)

Na comparação dos resultados obtidos de resistência à tração na flexão aos 28 dias, observou-se que 17 das 20 argamassas com vidro moído tiveram resistência mecânica igual ou superior aos 4,3 MPa da argamassa referencial. Os valores superiores à referência foram evidenciados nas argamassas com menor teor de vidro

moído que continham, conseqüentemente, mais cimento Portland em sua composição.

Desta forma, os resultados que mais se destacaram foram nas argamassas I15 e C15, ambas com valores de 5,7 MPa, superando em 32,6% o valor referencial. O segundo aumento registrado foi na argamassa M15 com ganho de 30,2% sobre a referência, seguido por A15 com ganho de 20,9% e V15 foi a argamassa com teor de 15% que obteve o menor ganho sobre o valor referencial, resultando em um acréscimo de 6,9% sobre a referência.

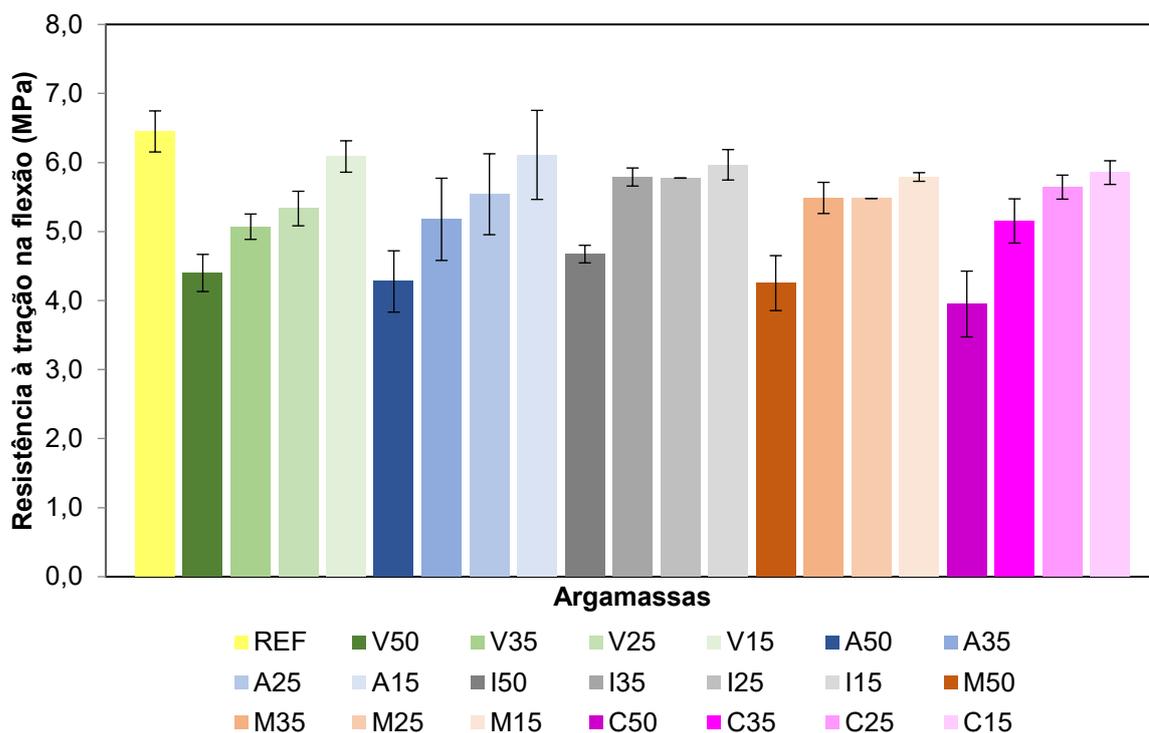
Nas argamassas com teor de 25% de vidro moído, o maior valor comparado ao referencial foi obtido na argamassa I25 com 5,5 MPa, superando em 27,9% o valor referencial, enquanto a argamassa com o menor acréscimo foi a V25 que resultou em 4,4 MPa, sendo 2,3% maior do que a referência.

Analisando as argamassas com teor de 35%, o valor que superou a referência com a maior porcentagem foi verificado na argamassa I35 com 4,7 MPa, sendo 9,3% acima da REF e, por outro lado, a argamassa com teor de 35% denominada V35 obteve resultado igual à referência.

Já nas argamassas com o teor de 50% de substituição de cimento Portland por vidro moído, todas ficaram abaixo do valor referencial de 4,3 MPa, com destaque para as argamassas V50 e M50 que atingiram 74,4 e 76,7% respectivamente do valor da argamassa referência.

Para os resultados dispostos no Gráfico 9, em relação à resistência à tração na flexão aos 90 dias pode-se observar a mesma tendência dos resultados analisados aos 28 dias, na qual as argamassas com os menores teores de substituição (15 e 25%) apresentaram resultados mais próximos ao referencial, enquanto os resultados das argamassas contendo os maiores teores (35 e 50%) obtiveram o maior distanciamento do valor referencial.

Gráfico 9 - Resistência à tração na flexão aos 90 dias



Fonte: O Autor (2022)

Diferentemente dos valores obtidos aos 28 dias, com a idade maior de hidratação, nenhuma argamassa com vidro moído superou o resultado de 6,5 MPa da referência.

Aos 90 dias observou-se que 11 das 20 argamassas com vidro moído alcançaram pelo menos 85% do valor da resistência à tração na flexão de 6,5 MPa da argamassa referencial, com destaque para as argamassas com 15% de teor de substituição V15 e A15 (93,8% da REF), I15 (92,3% da REF) e C15 (90,8% da REF). No mesmo teor de substituição, a amostra com o maior distanciamento do valor referencial foi identificada na M15 com 5,8 MPa (89,2% da REF).

No teor de 25% de substituição de cimento Portland por vidro moído, a argamassa I25 atingiu 5,8 MPa que representa 89,2% do valor referencial. E a argamassa V25 com 5,3 MPa foi a argamassa com teor de 25% que obteve o maior distanciamento do valor referencial, com 81,5% do resultado da referência.

Analisando as argamassas com teor de 35%, o valor mais próximo da referência foi verificado na argamassa I35 com 5,8 MPa, representando cerca de 89,2% do valor referencial, em contrapartida no mesmo teor de substituição analisado

a argamassa V35 com 5,1 MPa obteve a menor porcentagem do valor da referência, resultando em 78,5% do valor de 6,5 MPa da REF.

Já nas argamassas com o teor de 50% de substituição de cimento Portland por vidro moído, a I50 com seus 4,7 MPa foi a que mais se aproximou do valor referencial, obtendo 72,3% da REF enquanto a argamassa C50, com 4,0 MPa, atingiu 61,5% do valor referencial.

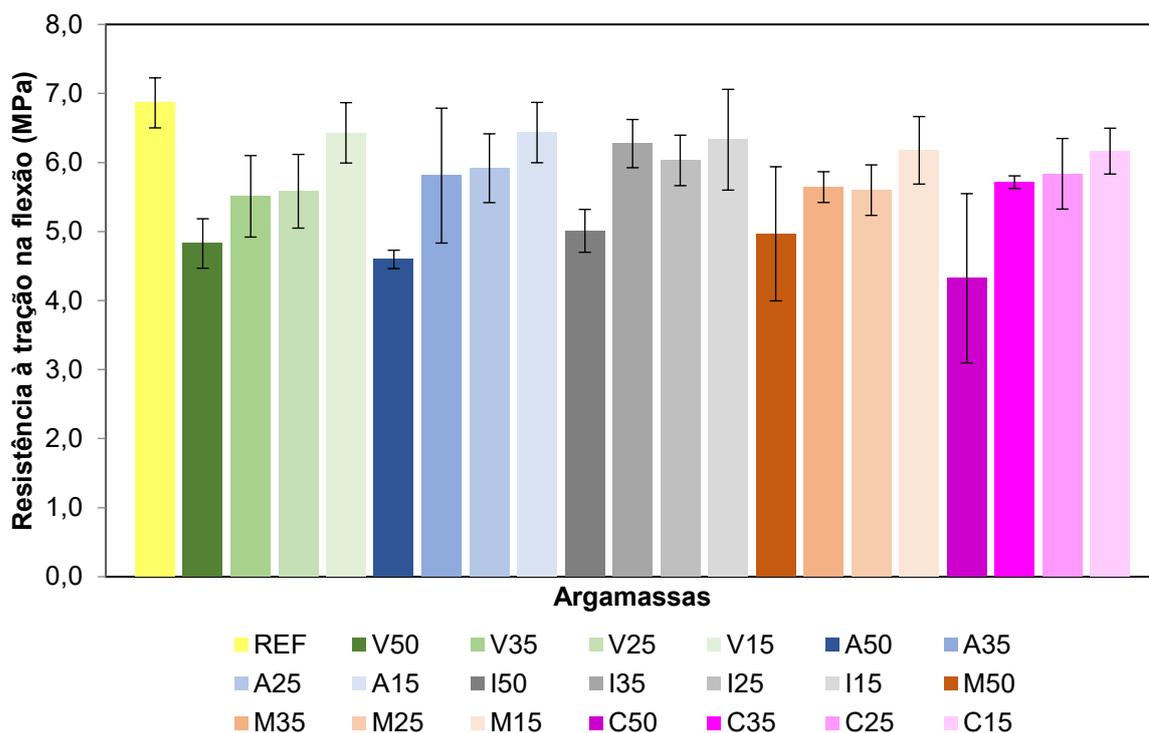
Na comparação dos resultados dos 90 dias frente aos valores obtidos com 28 dias, têm-se que a referência aos 90 dias com 6,5 MPa superou em 51,2% o resultado anterior de 4,3 MPa aos 28 dias. E nas argamassas com vidro moído os ganhos de resistência mecânica mais expressivos foram evidenciados nas amostras V50, I50, V15 e M50 com ganhos respectivos de 37,8%, 33,3%, 33,3% e 29,0%.

Os acréscimos com menor variação foram obtidos nas argamassas I15, C15 e M15, com respectivamente 3,9%, 2,8% e 2,6% de incremento no valor de resistência à tração na flexão comparando os 90 dias frente aos resultados de 28 dias.

Em relação aos valores de resistência à tração na flexão, Elaqa e Rustom (2018) evidenciaram que aos 90 dias os compostos com vidro moído apresentaram aumento na resistência sobre os resultados de 28 dias, assim como nesse trabalho foi evidenciada a mesma tendência. Matos e Sousa-Coutinho (2012) obtiveram resultados semelhantes com os dois casos, validando os resultados apresentados.

Na análise dos resultados de resistência à tração na flexão com maior tempo de hidratação estudado, 365 dias, pode-se observar de acordo com o Gráfico 10 a mesma tendência dos resultados obtidos aos 28 e 90 dias, onde as argamassas com os menores teores de substituição (15 e 25%) apresentaram resultados mais próximos ao referencial, enquanto os resultados das argamassas contendo os maiores teores (35 e 50%) obtiveram o maior distanciamento da referência.

Gráfico 10 - Resistência à tração na flexão aos 365 dias



Fonte: O Autor (2022)

Assim como os resultados alcançados aos 90 dias, com o maior tempo de hidratação analisado neste estudo, 365 dias, nenhuma argamassa com vidro moído teve resultado superior à argamassa referencial com 6,9 MPa.

Na idade de 365 foi observado que 7 das 20 argamassas com vidro moído alcançaram pelo menos 85% do valor da resistência à tração na flexão de 6,9 MPa, destacando-se novamente, assim como nas análises de 28 e 90 dias, as argamassas com teor de 15% de substituição do cimento Portland por vidro moído. A amostra V15 e A15 obtiveram 6,4 MPa que equivale a 92,8% do valor referencial. Outra amostra com resultado expressivo foi a I15 com 6,3 MPa, equivalendo a 91,3% da REF. E ainda, C15 e M15 obtiveram 6,2 MPa, sendo 89,9% do valor da referência representando a maior distância da REF no teor de 15%.

O resultado do teor de substituição de 25% na argamassa I25 obteve a maior proximidade do valor referencial entre as argamassas de mesmo teor de diferentes cores, resultando em 6,0 MPa que representa 86,9% do valor referencial. O maior distanciamento da REF foi evidenciado nas amostras V25 e M25 com 5,6 MPa que equivalem a 81,2% da referência.

Analisando as argamassas com teor de 35%, o valor mais próximo da REF foi obtido na argamassa I35 com 6,3 MPa (91,3% da REF), enquanto o mais distante da referência foi evidenciado na amostra V35 com 5,5 MPa (79,7% da referência).

Já nas argamassas com teor de 50% de substituição de cimento Portland por vidro moído, as amostras com valores resultantes mais próximos da referência são a I50 e a M50, ambas com 5,0 MPa, alcançando 72,5% do valor referencial e, em contrapartida, a amostra com 50% de teor de substituição que menos se aproximou da referência foi a C50 com 4,3 MPa, equivalendo a 62,3% da REF.

Na comparação dos resultados obtidos aos 365 dias com os de 90 dias, têm-se que a referência aos 365 dias com 6,9 MPa superou em 6,4% o resultado anterior de 6,5 MPa aos 90 dias. Nas argamassas com vidro moído os ganhos de resistência mecânica mais expressivos em relação à tração na flexão foram evidenciados nas amostras M50, A35 e C35 com ganhos respectivos de 16,8%, 12,2% e 10,9%.

Os acréscimos com menor variação foram obtidos nas argamassas C25, M35 e M25, com respectivamente 3,4%, 2,9% e 2,2% de incremento no valor de resistência mecânica comparando os valores de 365 dias com os de 90 dias.

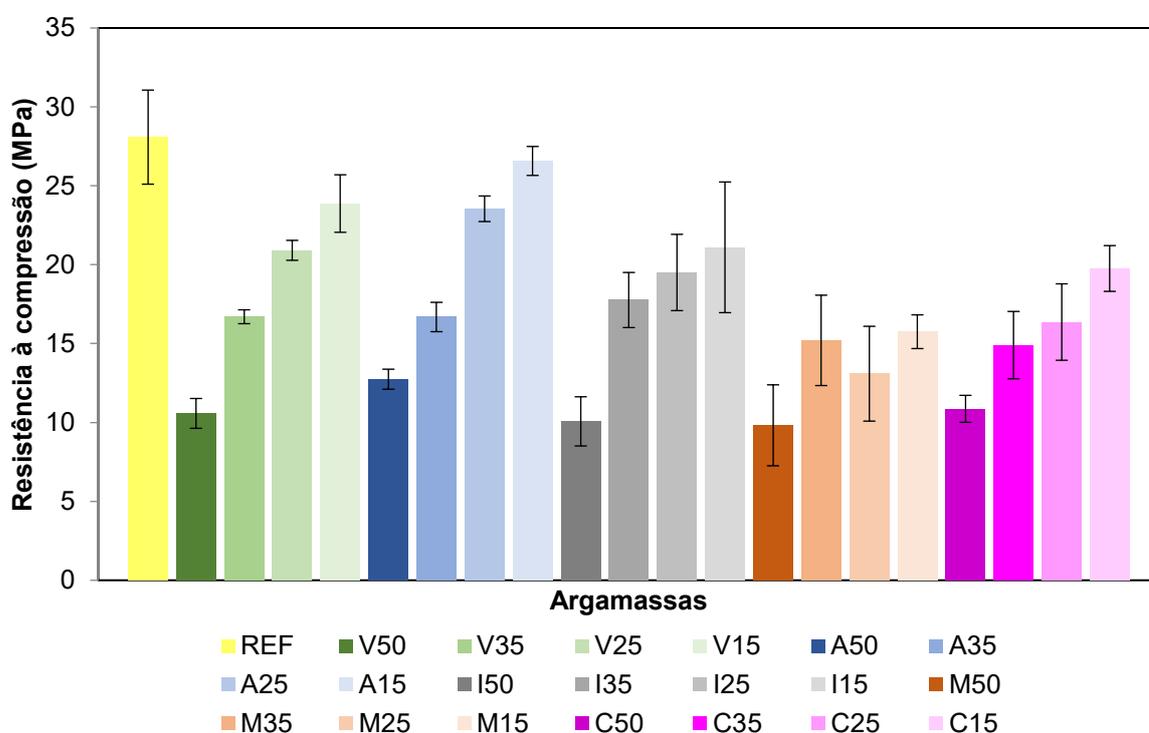
E em uma comparação direta da resistência à tração na flexão dos 365 dias com os 28 dias dos primeiros ensaios de resistência mecânica, pôde-se observar que a argamassa com maior diferença foi a referencial, saindo de 4,3 MPa aos 28 dias para 6,9 MPa aos 365 dias, representando um acréscimo de 60,9%. A segunda argamassa que obteve o maior acréscimo foi a V50 (+51,1%) e M50 (+50,7%) entre as mesmas idades analisadas. Os menores acréscimos foram identificados nas argamassas I25 (+9,0%) e C15 (+8,3%).

Esse trabalho visou analisar a resistência à tração na flexão ao invés da resistência à tração por compressão diametral, pois para efeito de comparação, resultados obtidos por Freitas (2019), na análise dos valores resultantes na resistência à tração na flexão contrapostos com os resultados de resistência à tração por compressão diametral evidenciam que os valores das resistências diametrais atingem apenas cerca de 50% do valor obtido nos ensaios de tração na flexão nos mesmos tipos de amostras comparadas, com as mesmas substituições de cimento por vidro moído e nas mesmas idades.

4.2.3 Resistência à compressão

No Gráfico 11 tem-se os resultados de resistência à compressão aos 28 dias. A análise evidencia que a argamassa de referência obteve 28,1 MPa nessa idade e na comparação com as argamassas com vidro moído em substituição parcial ao cimento Portland, 4 das 20 amostras apresentaram resultados de no mínimo 75% do valor obtido na argamassa referencial.

Gráfico 11 - Resistência à compressão aos 28 dias



Fonte: O Autor (2022)

Assim como foi observado na análise geral dos resultados da resistência à tração na flexão, na resistência à compressão os valores das argamassas que mais se aproximaram ao resultado da referência puderam ser identificados nas amostras com os teores 15 e 25% de substituição de cimento Portland por vidro moído, enquanto os resultados dos teores de 35 e 50% ficaram mais distantes da referência.

Na análise dos resultados de 28 dias, de acordo com o Gráfico 11, nas amostras com o teor de substituição de 15% as argamassas que atingiram pelo menos 75% do valor da argamassa referencial (28,1 MPa) foram: A15 com 26,6 MPa (94,7% da REF), V15 com 23,9 MPa (85,1% da REF), e I15 com 21,1 MPa (75,1% da REF).

A argamassa com teor de 15% mais distante da REF foi a M15 com 15,8 MPa, equivalendo a 56,2% do valor referencial.

No teor de 25% a única argamassa que obteve resultados superior a 75% do valor referência foi a A25 (83,6% da REF), enquanto no mesmo teor, a argamassa com menor porcentagem em relação à referência foi a M25 com 13,1 MPa, correspondendo a 46,6% da REF.

Ao contrário dos teores de 15 e 25%, nos resultados de 35 e 50% nenhuma argamassa obteve no mínimo 75% do valor referencial. Para as amostras de 35% de teor de substituição o valor mais próximo da referência foi obtido na argamassa I35 com 17,8 MPa, correspondendo a 63,3% do valor referencial, enquanto a mais distante foi a C35 com 14,9 MPa, sendo 53,0% da referência.

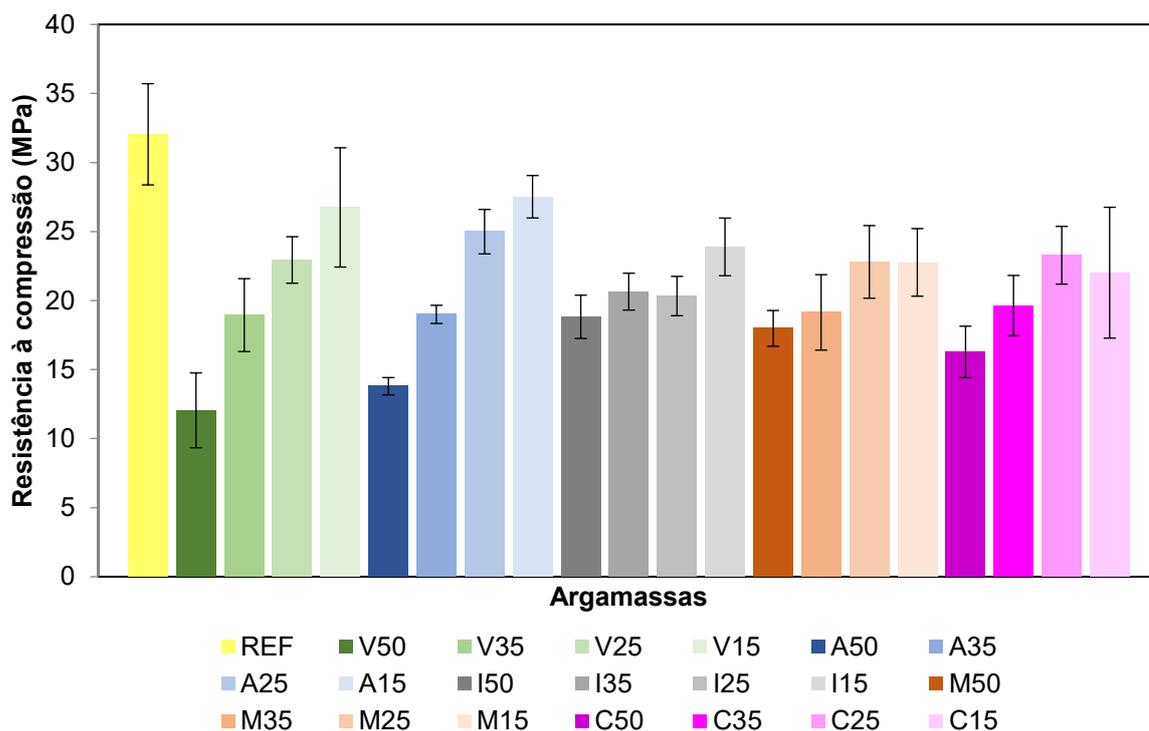
Já para o teor de 50% de substituição, a argamassa que mais se aproximou da referência foi a A50 com 12,7 MPa (45,2% da REF), enquanto no mesmo teor, a argamassa com menor porcentagem em relação à referência foi a M50 com 9,8 MPa, resultando em apenas 34,9% do valor da referência.

A resistência mecânica inferior à argamassa referencial também foi evidenciada por Matos e Sousa-Coutinho (2012) aos 28 dias, onde justificaram em seu estudo que a pozolanicidade do vidro moído causa retardo na hidratação. O mesmo resultado foi identificado na análise deste trabalho na mesma idade.

Consoante os resultados de Pan *et al.* (2017), aos 28 dias não foi observado valor que superasse a resistência da referência, apenas a média das amostras com 5% de substituição excedeu a REF, considerando que as partículas tinham tamanho mediano de 20 μm . Relacionando os resultados obtidos pelos autores com este trabalho, a conclusão foi a mesma visto que nenhuma amostra, independentemente da cor ou teor de substituição, teve resultado de resistência mecânica igual ou superior à argamassa referência aos 28 dias.

Os resultados apresentados no Gráfico 12, em relação à resistência à compressão aos 90 dias demonstram a mesma tendência dos resultados analisados no Gráfico 11 aos 28 dias, na qual as argamassas com os menores teores de substituição (15 e 25%) apresentaram resultados mais próximos à referência, enquanto os resultados das argamassas contendo os maiores teores de substituição de cimento Portland por vidro moído (35 e 50%) obtiveram o maior distanciamento do valor da argamassa referencial.

Gráfico 12 - Resistência à compressão aos 90 dias



Fonte: O Autor (2022)

A análise dos 90 dias evidencia que a argamassa de referência atingiu 32,0 MPa e na comparação com as argamassas com vidro moído em substituição parcial ao cimento Portland, 3 das 20 amostras apresentaram resultados de no mínimo 75% do valor obtido na referência.

No teor de 15%, duas argamassas atingiram pelo menos 75% do valor referencial sendo a A15 com 27,5 MPa (85,9% da REF) a que mais se aproximou do resultado referencial, seguida por V15 com 26,7 MPa (83,4% da REF). A amostra com teor de 15% que apresentou a maior distância do valor da referência foi a C15 com 22,0 MPa (68,8% da REF).

Para o teor de 25%, a única argamassa que obteve resultado de no mínimo 75% do valor referencial de 32,0 MPa foi a A25 com 25,0 MPa (78,1% da REF), enquanto a amostra de 25% de teor mais distante da referência pôde ser identificada como a I25 com 20,3 MPa (63,4% da REF).

Da mesma forma da análise dos resultados de 28 dias, nos teores de 35 e 50% de substituição aos 90 dias, nenhuma amostra alcançou o resultado de no mínimo 75% da resistência à compressão da argamassa referência. Para as amostras de 35% de teor de substituição o valor mais próximo da referência foi obtido na

argamassa I35 com 20,6 MPa, correspondendo a 64,4% do valor referencial, enquanto a mais distante foram as amostras V35 e A 35, ambas com 19,0 MPa, sendo 59,4% do valor total da argamassa referência na idade de 90 dias.

Na comparação dos resultados dos 90 dias em relação aos valores obtidos na resistência à compressão com 28 dias, têm-se que a referência aos 90 dias com 32,0 MPa superou em 14,1% o resultado anterior de 28,1 MPa aos 28 dias. E nas argamassas com vidro moído os incrementos de resistência mecânica mais expressivos foram observados nas amostras I50, M50 e M25 com acréscimos respectivos de 86,9%, 83,2% e 74,1%.

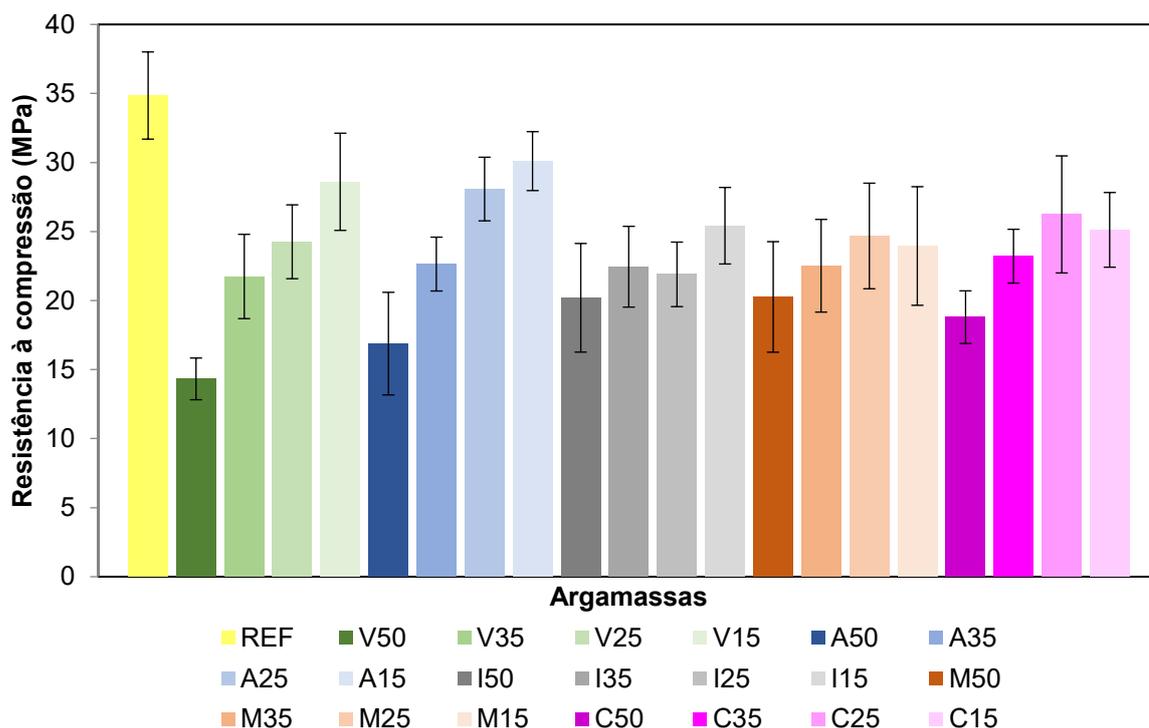
Os menores acréscimos registrados foram obtidos nas argamassas A25, I25 e A15, com respectivamente 6,1%, 4,2% e 3,6% de incremento no valor da resistência à compressão comparando os resultados dos 90 dias com os de 28 dias.

Ibrahim e Meawad (2018), em seus estudos, não tiveram resultados superiores à referência aos 91 dias. Neste estudo, também se verificou o mesmo resultado, visto que nenhuma das amostras, independentemente do teor de substituição, apresentou valor mais elevado do que a referência aos 90 dias.

Os autores Matos e Sousa-Coutinho (2012) obtiveram valores inferiores à REF aos 90 dias, validando a análise dos valores deste estudo, pois aos 90 dias nenhuma argamassa com vidro moído nos diferentes teores de substituição excedeu o valor da argamassa referência.

A verificação da resistência à compressão com a idade de 365 dias, pode ser observada no Gráfico 13, onde a mesma tendência dos resultados obtidos aos 28 e 90 dias foi encontrada. As argamassas com os menores teores de substituição (15 e 25%), como já era esperado devido à revisão bibliográfica, apresentaram resultados mais próximos ao referencial, enquanto os resultados das argamassas contendo os maiores teores de substituição de cimento Portland por vidro moído (35 e 50%) obtiveram a maior distância do valor referencial.

Gráfico 13 - Resistência à compressão aos 365 dias



Fonte: O Autor (2022)

As argamassas com vidro moído não alcançaram a equivalência com o valor de referência de 34,9 MPa aos 365 dias assim como foi observado nas idades de 28 e 90 dias em relação à resistência à compressão. Pôde-se analisar que 4 das 20 amostras contendo vidro moído atingiram pelo menos 75% do valor de argamassa referencial. No teor de 15% de substituição as argamassas que apresentaram maior proximidade com o valor da REF foram: A15 com 30,1 MPa (86,2% da REF) e V15 com 28,6 MPa (81,9% da REF). A amostra no teor de 15% com o maior distanciamento do valor referencial foi a M15 com 24,0 MPa (68,8% da REF).

Os resultados obtidos no teor de substituição de 25% com pelo menos 75% do valor referencial foram observados nas argamassas A25 com 28,1 MPa (80,5% da REF) e C25 com 26,2 MPa (75,1% da REF), enquanto a amostra I25 com 21,9 MPa (62,8% da REF) obteve a menor porcentagem comparada à referência no mesmo teor.

Na análise das argamassas com teor de 35%, o valor que mais se aproximou da referência foi obtido na argamassa C35 com 23,2 MPa, equivalente a 66,5% do resultado da argamassa referencial. E a amostra V35 com 21,7 MPa, equivalente a 62,2% da REF, exibiu a menor porcentagem comparada à REF no teor de 35%.

Já nas argamassas com teor de 50% de substituição de cimento Portland por vidro moído, a amostra com o valor resultante de maior proximidade à referência foi obtida na argamassa M50 com 20,3 MPa (58,2% da REF), enquanto a que menos se aproximou da referência foi a amostra V50 com 14,3 MPa (40,9% da REF).

Na comparação dos resultados alcançados aos 365 dias com os de 90 dias, têm-se que a referência aos 365 dias com 34,9 MPa superou em 8,8% o resultado obtido anteriormente de 32,0 MPa aos 90 dias. Nas argamassas com vidro moído os ganhos de resistência mecânica mais expressivos em relação à compressão foram evidenciados nas amostras A50, V50 e C35 com ganhos respectivos de 22,3%, 18,9% e 18,2% sobre os valores de 90 dias.

Os acréscimos com menor variação foram obtidos nas argamassas I15 com 6,4%, V25 com 5,7% e M15 com 5,2% de incremento no valor de resistência à compressão comparando os resultados de 365 dias com os de 90 dias.

E em uma comparação direta da resistência à compressão dos 365 dias com os resultados dos 28 dias dos primeiros ensaios de resistência mecânica, pôde-se observar que a argamassa com maior diferença foi a M50 saindo de 9,8 MPa aos 28 dias para 20,3 MPa aos 365 dias (+106,4%) seguido pela amostra I50 que saiu de 10,1 MPa aos 28 dias para 20,2 MPa aos 365 dias (+100,6%). Os menores acréscimos foram identificados nas argamassas A15 (+13,3%) e I25 (+12,3%) entre os resultados analisados nas mesmas idades.

Como era esperado, as argamassas com menor teor de vidro moído substituindo o CP V-ARI obtiveram resultados de resistência à compressão mais próximos ao valor de referência enquanto as argamassas com maior teor de vidro moído resultaram em valores mais distantes do referencial.

No trabalho de Nwaubani e Poutos (2013), os autores encontraram evidências de que a resistência à compressão tende a diminuir conforme quantias maiores de vidro moído são adicionadas nas argamassas com 5, 20 e 30% de substituição, assim como neste trabalho com outras porcentagens de substituição (15, 25, 35 e 50%) tanto na resistência à tração na flexão quanto na resistência à compressão.

Em um estudo de compósitos cimentícios de ultra alto desempenho, Soares (2021) obteve aumento na resistência aos 365 em comparação com a idade de 91 dias em 10,44%, enquanto neste estudo a média geral dos ganhos de resistência à compressão foi de 12,2% nas mesmas idades, sendo a amostra A50 a que obteve o maior acréscimo aos 365 em comparação com a idade de 91 no valor de 22,3%.

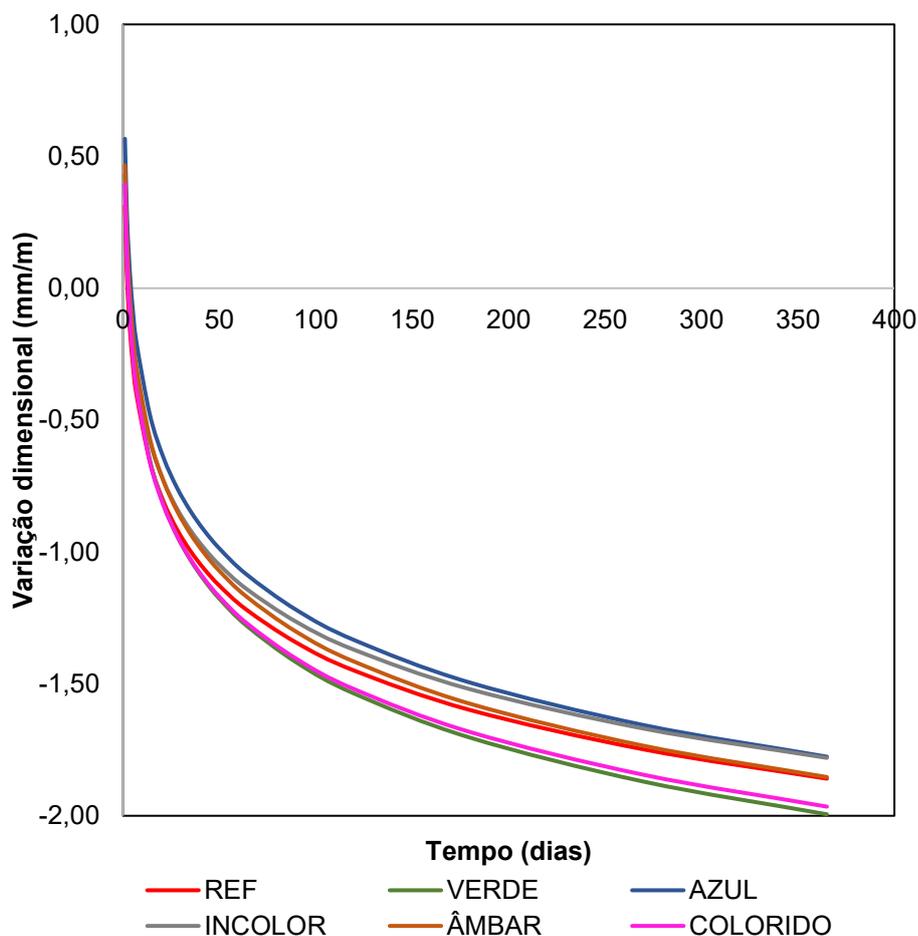
Ainda, para efeito de comparação, Du e Tan (2017) atingiram resultados superiores à referência na idade de 365 dias, porém no estudo desses autores o tamanho mediano das partículas foi de 10 μm , praticamente 4,5 vezes menor do que o utilizado neste estudo, excluindo a dimensão do vidro moído verde. Desta forma, aos 365 dias este estudo não identificou amostras com qualquer teor de substituição que excedesse o valor da referência.

Os resultados obtidos por Soliman e Tagnit-Hamou (2016), aos 28 dias, apontaram que nenhuma argamassa com vidro moído superou o valor da argamassa referencial, evidenciando que o efeito do vidro como pozolana é lento e gradual. Porém, com a idade de 90 dias, os autores verificaram que todos os valores de resistência à compressão dos compostos com vidro moído superaram o valor da referência, diferentemente dos resultados desse estudo que, apesar de terem aumentado a resistência de forma geral na idade de 90 dias, nenhum chegou a superar a argamassa REF, nem mesmo aos 365 dias. Isso pode ser explicado devido a diferença do tamanho das partículas de vidro moído que eles utilizaram no estudo, com partículas de tamanho mediano de 12 μm frente aos 44,87 μm desse estudo, excluindo-se o valor dimensional mediano do vidro verde que foi praticamente o dobro.

4.2.4 Reatividade álcali-sílica

A utilização do vidro moído em argamassas e compostos de cimento em geral deve ser acompanhada da averiguação da reatividade álcali-sílica (RAS), apresentada através da variação dimensional em milímetros por metro no Gráfico 14. De acordo com a NBR 15577-1 (ABNT, 2018), a reatividade do agregado aos 30 dias pode ser classificada em quatro graus: R0 (inócuo, expansão menor que 0,19%), R1 (reativo, expansão entre 0,19 e 0,40%), R2 (reativo, expansão entre 0,41 e 0,60%) e R3 (reativo, expansão maior que 0,60%).

Gráfico 14 - Variação dimensional em milímetros por metro

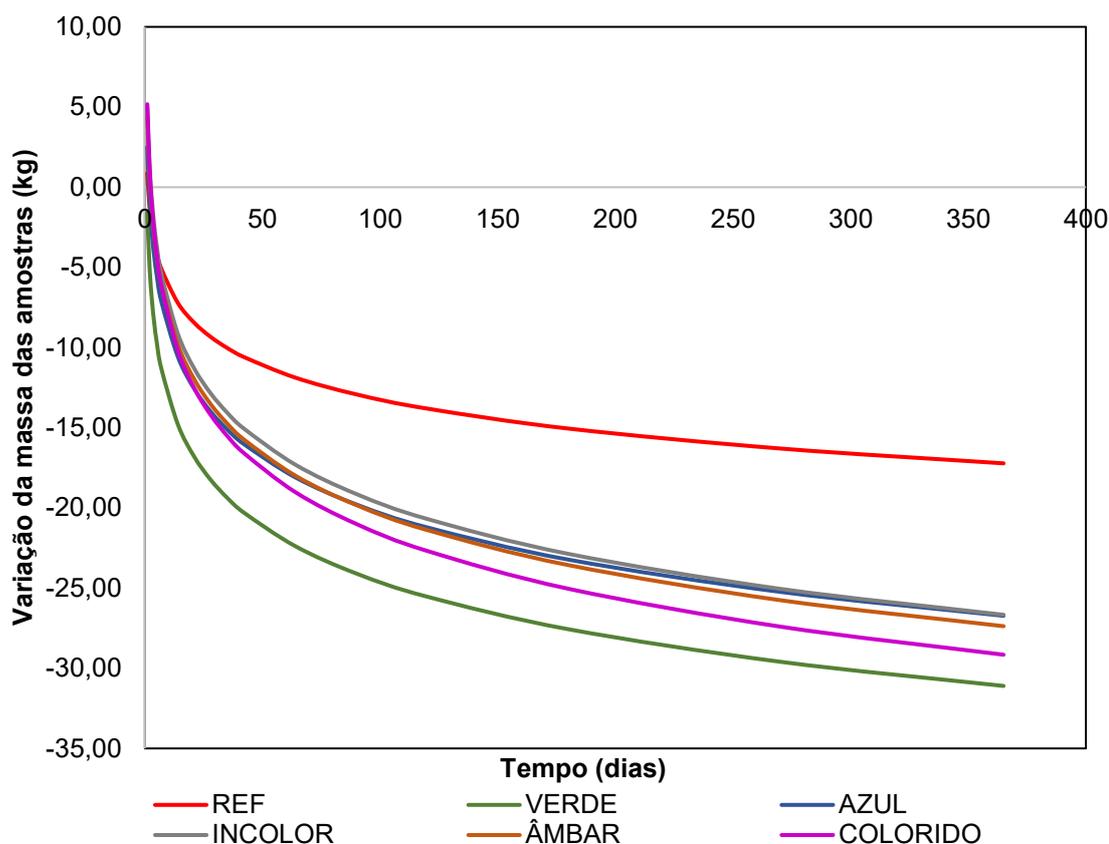


Fonte: O Autor (2022)

Relacionando os resultados obtidos, por meio da análise do Gráfico 14, têm-se que as argamassas de 50% de substituição do CP V-ARI por vidro moído não apresentaram reatividade álcali-sílica, visto que houve redução da dimensão dos corpos de prova analisados ao contrário da expansão que seria evidenciada caso houvesse a confirmação de RAS. A reatividade álcali-sílica não ocorreu pois, após a moagem, o diâmetro das partículas estava com granulometria pequena o suficiente para não influenciar na RAS. Desta forma, todas as argamassas foram classificadas no grau de reatividade R0, sem ocorrência da RAS.

O Gráfico 15 apresenta a variação da massa das argamassas de 50% de substituição de CP V-ARI por vidro moído e da referência.

Gráfico 15 - Variação da massa das amostras

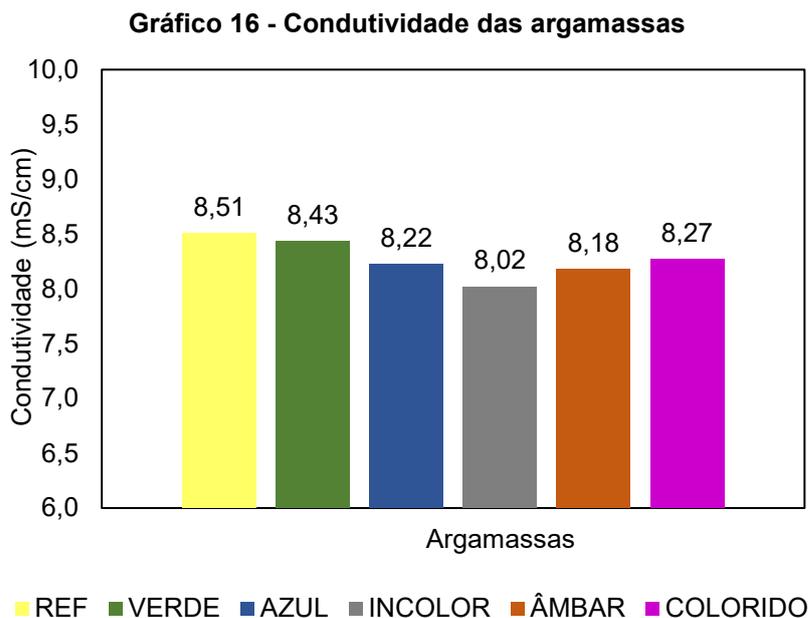


Fonte: O Autor (2022)

De acordo com o Gráfico 15, os resultados obtidos apontaram para redução da massa das amostras em todas as argamassas com vidro moído e na referência também ocorreu redução da massa ao longo das aferições em um ano.

4.2.5 Solubilidade

Analisando estatisticamente os resultados da condutividade do Gráfico 16, percebeu-se que independentemente da cor os resultados podem ser considerados estatisticamente iguais. A condutividade é um parâmetro para estipular o teor de sais presentes na água através do fluxo de elétrons pela presença de íons. A água destilada apresentou condutividade de 0,025 mS/cm. A média da solução das argamassas com vidro moído foi de 8,22 mS/cm e com 2 desvios ($8,22 \pm 0,3$) é possível afirmar com 95% de certeza que os resultados são estatisticamente iguais. Inclusive, a solução da argamassa referencial também fica dentro da faixa de sobreposição, demonstrando que se pode inferir a equidade estatística.

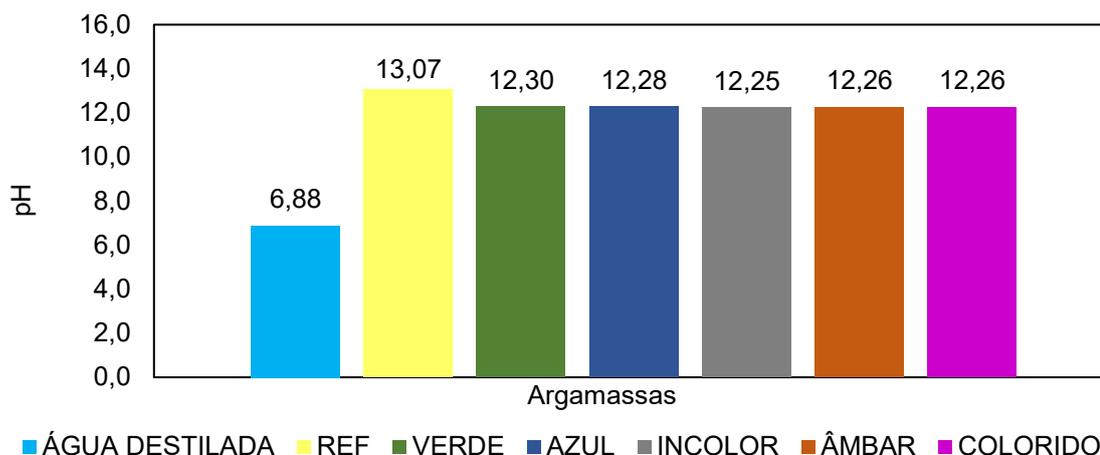


Fonte: O Autor (2022)

Inserindo a solução da argamassa referência no cálculo de uma nova média, obteve-se 8,27 mS/cm. E esse valor médio entre todas as soluções de argamassas feitas no estudo, demonstra que as soluções aquosas de argamassa apresentam a condutividade muito mais elevada do que a água destilada, pois a água destilada utilizada para método de comparação tem menos sais dispersos em seu meio, tornando-a com menor condutividade.

Outra análise possibilitada pelo ensaio de solubilidade é em relação ao pH presente no Gráfico 17, onde verifica-se que todas as soluções aquosas das argamassas de diferentes cores são estatisticamente iguais, a média de pH obtida entre as cinco com coloração de vidro moído foi de 12,27. O desvio padrão entre as amostras foi de 0,02 e com 2 desvios ($12,27 \pm 0,04$) é possível afirmar que são estatisticamente iguais entre si. Porém, diferentemente da condutividade, no caso do pH as soluções aquosas com vidro moído de diferentes cores não são iguais a argamassa referencial, mesmo estendendo a faixa de sobreposição para 3 desvios ($12,27 \pm 0,06$), a extensão de equidade estatística não abrange o resultado da referência.

Gráfico 17 - pH das argamassas e água destilada



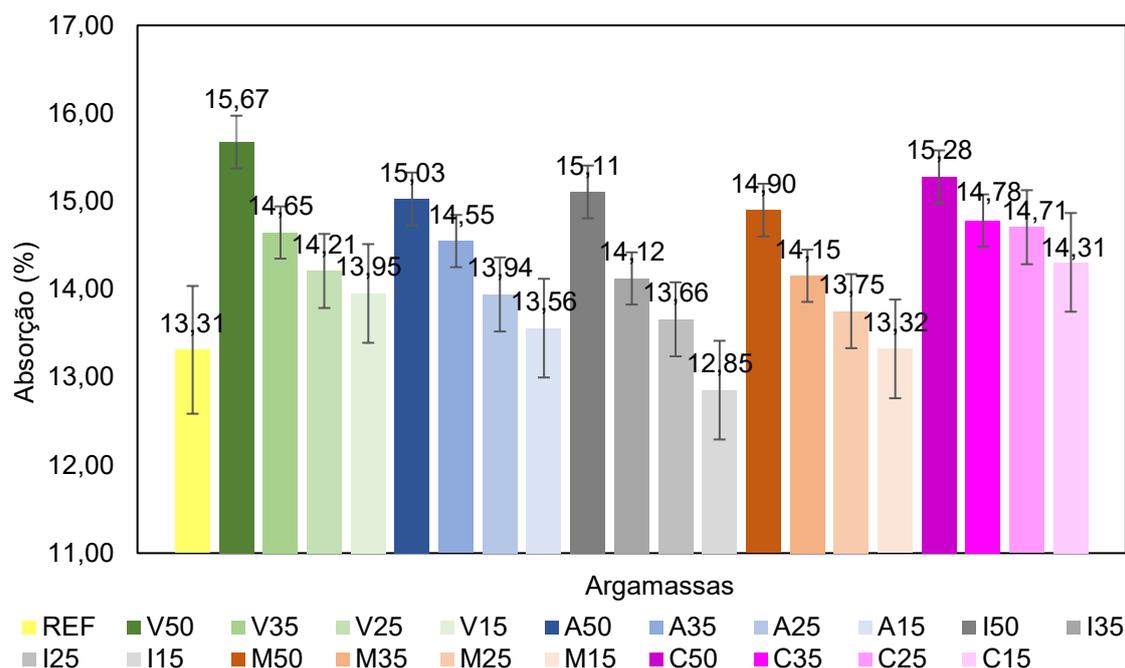
Fonte: O Autor (2022)

Ainda de acordo com o Gráfico 17, identificou-se que a água destilada ficou com o pH aproximado de 7,0, ou seja, neutro. Por outro lado, o pH resultante das soluções aquosas das argamassas com vidro moído (± 12) e da referência (± 13) indicaram altos valores de alcalinidade, resultantes da hidratação causada pelas reações químicas ao longo do tempo.

4.2.6 Absorção de água por imersão e porosidade aberta

Analisando a absorção de água por imersão e porosidade aberta, Gráfico 18, se identificou que quanto maior o teor de vidro moído substituindo parcialmente o CP V-ARI, maior é o índice de absorção em porcentagem. Para cada argamassa foram feitos 2 corpos de prova, totalizando 42 amostras. Nesse gráfico, pôde-se analisar o comportamento dos diferentes teores de substituição e sua relação com a absorção nas amostras no estado endurecido aos 28 dias. Os menores valores identificados foram o da argamassa I15, com um valor de absorção de 12,85% e M15 com 13,32%. Por outro lado, os maiores valores de absorção foram registrados nas argamassas V50 com 15,67% de absorção e C50 com 15,28%.

Gráfico 18 - Absorção de água por imersão e porosidade aberta



Fonte: O Autor (2022)

As argamassas com teor de 15% de substituição de CP V-ARI por vidro moído apresentaram média de 13,6% de absorção, englobando o valor referencial na sua faixa de domínio de 1 desvio padrão ($13,6 \pm 0,56$), portanto as amostras com 15% de vidro moído têm a probabilidade com 68% de certeza de serem estatisticamente iguais a argamassa referência (REF). E comparando o valor da média das argamassas de 15% diretamente com o valor REF (13,31%), a absorção aumentou em 2,2%.

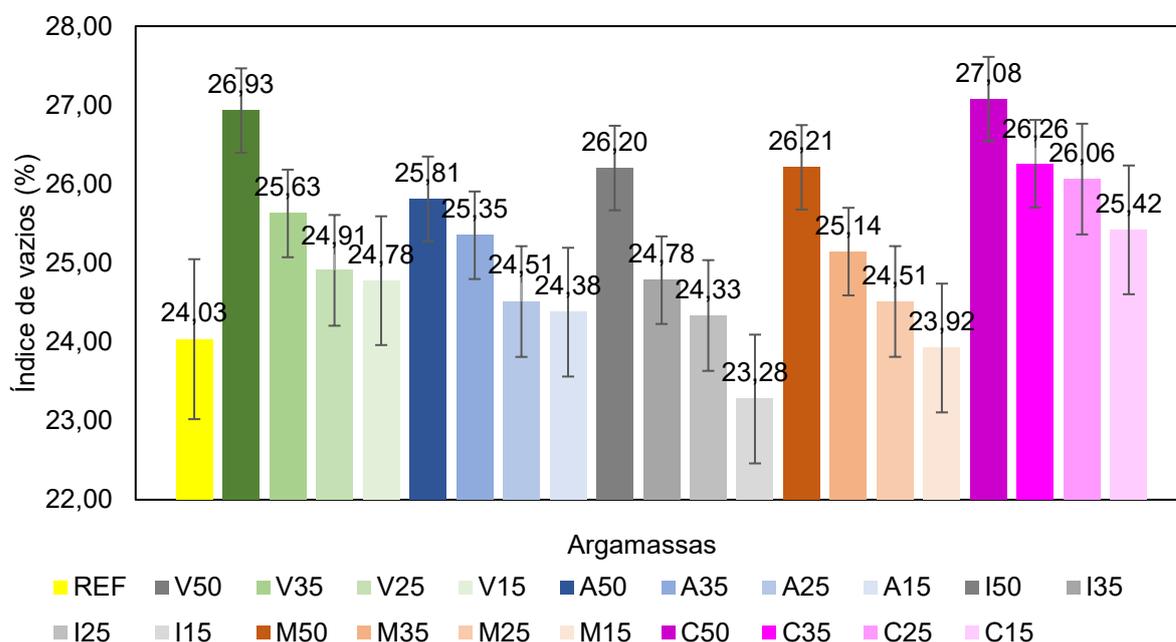
Com 25% de teor de substituição, a média de absorção obtida foi de 14,05%, atingindo com 2 desvios ($14,05 \pm 0,84$) a faixa de domínio que abrange a REF. Desta forma, com 95% de certeza é possível afirmar que as argamassas de 25% apresentam a taxa de absorção iguais à argamassa referência. Na comparação do valor das médias das argamassas de 25% com o valor REF (13,31%), tem-se que a absorção aumentou em 5,6%.

Para as argamassas com teor de 35% de substituição, a média resultante atingiu 14,45% de absorção, não englobando o valor referencial na sua faixa de domínio pois o desvio calculado foi de 0,3 e mesmo levando em consideração 3 desvios constata-se que as argamassas de 35% não são estatisticamente iguais à referência, tendo o valor médio aumentado 8,6% sobre o valor da REF.

Já para as argamassas com teor de 50% de substituição de CP V-ARI por vidro moído, a média obtida foi de 15,2%, e a faixa de domínio com 3 desvios ($15,2 \pm 0,9$) também não abrange o valor referencial, sendo estatisticamente divergente da argamassa REF. Na comparação do valor das médias das argamassas de 50% com o valor REF (13,31%), tem-se que a absorção aumentou em 14,2%.

No Gráfico 19, tem-se que o índice de vazios, onde denota-se que as amostras com maior teor de vidro moído em substituição ao CP V-ARI têm maior índice de vazios, ao passo que se diminui o teor de substituição, o índice de vazios também decai pelo motivo de que as argamassas com maior teor de vidro têm partículas maiores em sua granulometria, aumentando os espaços vazios e retendo mais água, como pôde ser visto no Gráfico 18 com a porcentagem de absorção no teste de imersão e porosidade aberta. Com maior teor de CP V-ARI, os espaços vazios são preenchidos e a absorção no ensaio realizado se torna menor.

Gráfico 19 - Índice de vazios



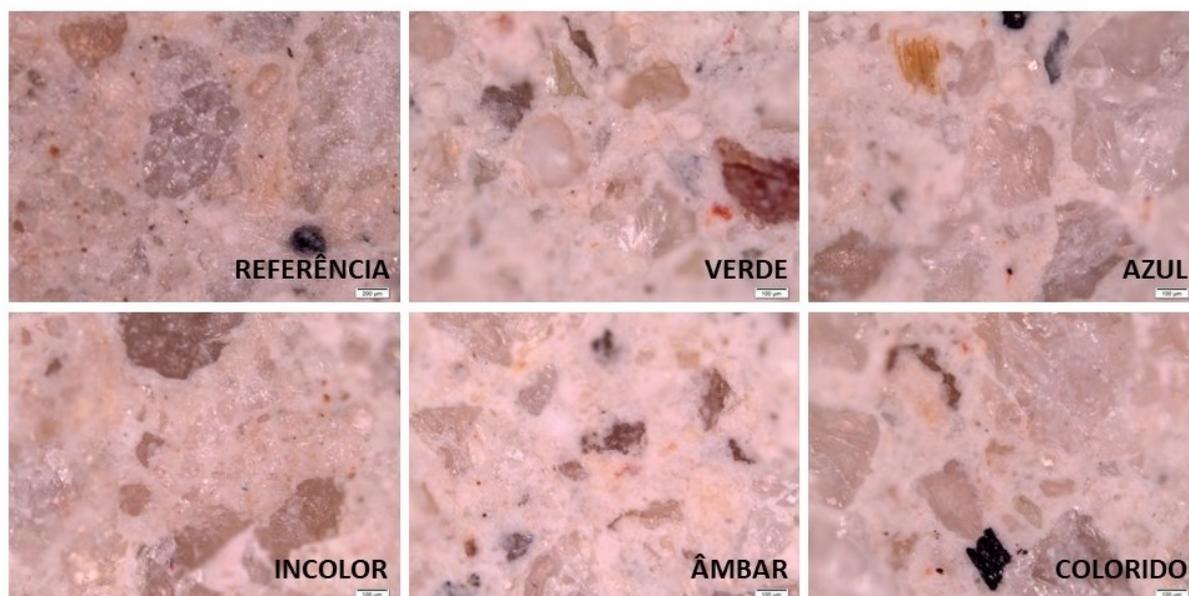
Fonte: O Autor (2022)

O valor percentual mais alto foi identificado nas argamassas C50 (27,08%) e V50 (26,93%), com 12,7% e 12,1% maiores do que a referência respectivamente.

4.2.7 Microscopia

A Figura 18 exibe as imagens da microscopia de uma amostra de cada argamassa feita com 50% de substituição de cimento Portland por vidro moído. O equipamento utilizado foi um microscópio do laboratório da universidade.

Figura 18 - Microscopia



Fonte: O Autor (2022)

A partir das imagens, com um aumento de 10 vezes (100 µm) analisou-se que as partículas de vidro moído não tiveram destaque na seção apresentada na microscopia quando comparadas com a seção da argamassa referência por causa da granulometria do vidro moído que foi adotada para esse estudo em consonância com o aumento especificado na microscopia. Também foi realizada a análise microscópica com aumentos de 5 e 20 vezes (200 µm e 50 µm, respectivamente), porém, o vidro moído integrado às argamassas, assim como no aumento de 10 vezes, não se distinguiu visualmente em comparação com a referência.

5 CONCLUSÃO

A partir do conjunto de dados obtidos com as diversas análises, conclui-se que as proporções mais adequadas para as análises evidenciadas nos resultados dos ensaios puderam ser identificadas nas substituições de 15 e 25% do CP V-ARI por vidro moído, pois apresentaram valores mais próximos à referência.

De modo geral, as argamassas com teor de substituição de 50 e 35% do CP V-ARI por vidro moído tiveram os maiores ganhos de resistência à compressão e à tração na flexão enquanto os teores de 25 e 15% foram mais estáveis com menor ganho da resistência entre as diferentes idades analisadas de 28, 90 e 365 dias.

A reatividade álcali-sílica (RAS) nas argamassas com 50% de substituição do CP V-ARI por vidro moído não ocorreu em nenhuma argamassa ensaiada pois o diâmetro das partículas moídas de vidro estava em tamanho reduzido, com granulometria baixa e, portanto, não resultando na RAS.

A análise de solubilidade mostrou que as cores de vidro moído não influenciam na análise de condutividade pois os valores não apresentam divergência considerável, assim como o pH das amostras.

Foi verificado ainda que à medida que diminui o teor de vidro moído, aumenta o consumo de cimento. Com o maior consumo de cimento, diminui a absorção de água por imersão e porosidade aberta.

Conclui-se que essa pesquisa auxiliie de alguma forma na reciclagem do vidro que geralmente acaba sendo disposto em local inapropriado e, com a sua utilização em matriz cimentícia, seja em pasta, argamassa ou concreto simples, tenha uma aplicação ambientalmente mais adequada.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Com o intuito de que outros trabalhos sejam realizados nessa mesma área de pesquisa de substituição parcial do cimento Portland por vidro moído, segue algumas as sugestões para servirem de norte para os próximos pesquisadores: analisar o efeito do teor de substituição do resíduo de vidro nas propriedades das argamassas com proporções variando de 5 a 30%; optar por vidro moído nas cores incolor ou âmbar

com granulometrias diferentes da apresentada nesse estudo; moer os resíduos de vidro por mais tempo, inferior a 15 μm , ou utilizar outra metodologia para diminuir a dimensão do resíduo; realizar análises de microscopia eletrônica de varredura; verificar a viabilidade do uso do vidro moído em concretos não estruturais.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211:2019. Agregados para concreto: Especificação.** Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215:2019. Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9778:2005. Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica.** Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10006:2004. Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos.** Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276:2016. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência.** Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13278:2005. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado.** Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279:2005. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão.** Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13280:2005. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido.** Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15577-1:2018. Agregados – Reatividade álcali-agregado Parte 1: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto.** Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15577-4:2018. Agregados – Reatividade álcali-agregado Parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado.** Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16697:2018. Cimento Portland – Requisitos**. Rio de Janeiro, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 16738:2019. Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova prismáticos**. Rio de Janeiro, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52:2009. Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente**. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248:2001. Agregados – Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO TÉCNICA BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS AUTOMÁTICAS DE VIDRO, **ABIVIDRO**. São Paulo, SP, 2018. Disponível em: < <https://abividro.org.br/>>. Acesso em: 24 out. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE VIDRO (ABIVIDRO). **Porque o vidro é a melhor opção para reciclar**, 2021. Disponível em: <https://abividro.org.br/wp-content/uploads/2021/08/E-book_Porque-o-vidro-e-a-melhor-opcao-para-reciclar-1.pdf>. Acesso em 17 nov. 2022.

BALSAMO, A. C. R; CABRAL, B. V; SANFELICE, R. C. **Estudo comparativo entre materiais a base de vidro e policarbonato em projetos de superfícies transparentes**. Revista Brasileira de Ciência, Tecnologia e Inovação, Uberaba-MG, v. 4, n. 3, p. 327-345, 2019.

BRASIL, Presidência da República. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências, 2010. Disponível em:<http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acesso em: 25 ago. 2020.

BORGES, A. L. **Efeitos fíler e pozolânico do pó de vidro em argamassas**. 144f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2021.

CASSA, J. C; CARNEIRO, A. P; BRUM, I. A. S. **Reciclagem de entulho para produção de materiais de construção: projeto entulho bom**. Editora da Universidade Federal da Bahia (EDUFBA), Salvador, Bahia. Caixa Econômica Federal, 2001.

CIRILO, F. **Redução na emissão de CO₂ é sinônimo de competitividade na indústria global do cimento**. Associação Brasileira de Cimento Portland, 2019. Disponível em: <<https://abcp.org.br/imprensa/reducao-na-emissao-de-co2-e->

[sinonimo-de-competitividade-na-industria-global-do-cimento/](#)>. Acesso em: 30 out 2020.

CLAISSE, P. A. **Materiais de construção civil**. Elsevier Editora, 2019.

DESCHENES, D. J. **ASR/DEF-Damaged bent caps: shear tests and field implications**. Master of Science in Engineering, The University of Texas, 2009.

DYER, T. D.; DHIR, R. K. **Chemical reactions of glass cullet used as cement component**. Journal of Materials in Civil Engineering, v. 13, n. 6, p. 412-417, 2001.

DU, H.; TAN, K. H. Properties of high-volume glass powder concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 75, p. 22–29, 2017.

ELAQRA, H.; RUSTOM, R. Effect of using glass powder as cement replacement on rheological and mechanical properties of cement paste. **Construction and Building Materials**, v. 179, p. 326–335, 2018.

FREITAS, TAÍS O. G. **Efeito do pó de vidro na mitigação da reação álcali-sílica de compósitos cimentícios de alto desempenho**. 151f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2019.

HASPARYK, N. P. **Reação álcali-agregado no concreto**. In: ISAIA, C. G. Concreto: ciência e tecnologia. IBRACON, pp. 933-1001, 2011.

IBRAHIM, S.; MEAWAD, A. Assessment of waste packaging glass bottles as supplementary cementitious materials. **Construction and Building Materials**, v. 182, p. 451–458, 2018.

Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA). **Estudo do Ipea traz dados sobre a reciclagem no Brasil e a forma de organização dos trabalhadores desse segmento**, 2017. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br/portal/index.php?option=com_content&view=article&id=29296>. Acesso em 26 ago. 2020.

KHMIRI, A.; SAMET, B.; CHAABOUNI, M. **A cross mixture design to optimise the formulation of a ground waste glass blended cement**. Construction and Building Materials, v. 28, n. 1, p. 680-686, 2012.

LEE, H.; HANIF, A.; USMAN, M.; SIM, J.; OH, H. **Performance evaluation of concrete incorporating glass powder and glass sludge wastes as supplementary cementing material**. Journal of Cleaner Production, v. 170, p. 683–693, 2018.

LING, P. C. H; YONG, E. L; TAN, C. S. **Utilization of glass waste as fine aggregate in construction materials**. n. January, p. 36-42, 2018.

LISBOA, E. S.; ALVES, E. S.; MELO, G. H. A. G; **Materiais de Construção: Concreto e Argamassa**. Grupo A, 2017. Disponível em: <<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788595020139/>>. Acesso em 23 out. 2020.

LORDELO, R. S. D. **Avaliação da utilização de resíduo de vidro de garrafas na produção de argamassa**. 102f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, 2018.

LU, J.-X.; POON, C. S. Recycling of waste glass in construction materials. *In: New Trends in Eco-Efficient and Recycled Concrete*, p. 153-167, Woodhead Publishing, 2019.

MATA, T. M. C. P. **Comparação de Processos de Reutilização/Reciclagem Usando a Metodologia de Análise de Ciclo-de-Vida**. FEUP, Porto, 1998.

MATOS, A. M.; SOUSA-COUTINHO, J. Durability of mortar using waste glass powder as cement replacement. **Construction and Building Materials**, v. 36, p. 205–215, 2012.

MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M., **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**, 2ª edição. São Paulo, Editora IBRACON, 2014.

MEYER, C.; BAXTER, S. **Use of recycled glass and fly ash for precast concrete**. Report, v. 98, p. 18, Oct. 1998.

NWAUBANI, S. O.; POUTOS, IK. I. The Influence of Waste Glass Powder Fineness on the Properties of Cement Mortars. **International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management (IJAIEM)**, v. 2, n. 2, p. 110–116, 2013.

OLIVEIRA JR, A. **Propriedades residuais de compósitos cimentícios de alto desempenho com pó de vidro submetidos a altas temperaturas**. 168 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2020.

ONU. Organização das Nações Unidas. **Objetivos de desenvolvimento sustentável**. Assembleia Geral das Nações Unidas, 2015. Disponível em: <http://www.itamaraty.gov.br/images/ed_desenvsust/20160119-ODS.pdf>. Acesso em 30 out. 2020.

PAIVA, O. A. **Resíduo Industrial de vidro moído em argamassa de cimento Portland**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2009.

PAN, Z.; TAO, Z.; MURPHY, T.; WUHRER, R. High temperature performance of mortars containing fine glass powders. **Journal of Cleaner Production**, v. 162, p. 16–26, 2017.

PATEL, D.; TIWARI, R. P.; SHRIVASTAVA, R.; YADAV, R. K. Effective utilization of waste glass powder as the substitution of cement in making paste and mortar. **Construction and Building Materials**, v. 199, p. 406–415, 2019.

PINTO, J. L. A; MASUERO, A. B; HASPARYK, N. P. **Aproveitamento de resíduo de vidro em compósitos de cimento e a preservação do meio ambiente**. Congresso Brasileiro do Concreto- IBRACON, Salvador, 2008.

SALES, F. A. **Estudo da atividade pozolânica de micropartículas de vidro soda-cal, incolor e âmbar, e sua influência no desempenho de compostos de cimento Portland**; Tese de doutorado em Engenharia das estruturas; Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

SHARIFI, Y.; AFSHOON, I.; FIROOZJAIE, Z. Fresh Properties of Self-Compacting Concrete Containing Ground Waste Glass Microparticles as Cementing Material. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 13, n. 2, p. 50–66, 2015.

SHI, C.; ZHENG, K. **A review on the use of waste glasses in the production of cement and concrete**. Resources, Conservation and Recycling, v. 52, p. 234-247, 2007.

SILVA, H. R. T; SANTOS, W. R. S; WESTERLON, A. A; ORTIZ, P. E; ZANCO, J. J. **Resíduo de lapidação de vidro: caracterização e efeito de sua incorporação na resistência mecânica de uma argamassa**. Brazilian Journals of Business. Braz. J. of Bus., Curitiba, v. 2, n. 2, p. 1504-1517, abr./jun. 2020. Curitiba, Paraná, 2020.

SOARES, S. M. **Durabilidade de compósitos cimentícios de ultra alto desempenho com incorporação de pó de vidro frente à ação de cloretos**. 2021. 256 f. Tese (doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2021.

SOBOLEV, K; TÜRKER, P; SOBOLEVA, S; ISCIOGLU, G. **Utilization of waste glass in ECOcement: strength properties and microstructural observations**. Waste Manage, v. 27, p. 971-6, 2007.

SOLIMAN, N. A.; TAGNIT-HAMOU, A. Development of ultra-high-performance concrete using glass powder – Towards ecofriendly concrete. **Construction and Building Materials**, v. 125, p. 600-612, 2016.

SOUSA NETO, L. M. **Utilização de resíduo de vidro moído como adição mineral para a produção de concreto autoadensável e de alto desempenho**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Faculdade de Tecnologia, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2014.

TORRES, A. F. R.; GONÇALVES-DIAS, S. L. F. **Entendo a Estrutura da Cadeia Reversa das Garrafas de Vidro em São Paulo**. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ADVANCES IN CLEANER PRODUCTION, 7^{a.}, 2018, Barranquilla. Disponível em: <

http://www.advancesincleanerproduction.net/7th/files/sessoes/6A/6/torres_and_goncalves-dias_academic.pdf>. Acesso em 17 nov. 2022.

TRENTIN, P. O; MANICA, J; VANZETTO, S. C; MARANGONI, B; ZALESKI, A. **Substituição parcial de agregado miúdo por resíduo de vidro moído na produção de argamassa**. Revista Matéria, ISSN 1517-7076 artigos e-12576, 2020.

XI, Y; LI, Y; XIE, Z. LEE, J. S. **Utilization of solid wastes (waste glass and rubber particles) as aggregates in concrete**. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON SUSTAINABLE DEVELOPMENT AND CONCRETE TECHNOLOGY. 2004.