

Substituição parcial de agregado miúdo por resíduo de vidro moído na produção de argamassa

Partial replacement of small aggregate by ground glass residue in the production of mortar

Priscila Ongaratto Trentin¹, Jocasta Manica²,
Suelen Cristina Vanzetto², Bruno Marangoni²,
Alessandra Zaleski²

¹ Universidade Tecnológica Federal do Paraná – PPGEC/UTFPR, Pato Branco, PR, Brasil.
e-mail: priscila-trentin@hotmail.com

² Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões – URI, Departamento de Engenharias e Ciência da Computação, Erechim, RS, Brasil. e-mail:
jocastamanica@hotmail.com, suelen.van@hotmail.com, b-marangoni@outlook.com, alessandra_zaleski@hotmail.com

RESUMO

Uma das consequências do processo de expansão industrial é a geração de grande quantidade de resíduos. Entre todos os resíduos gerados destacam-se as embalagens de vidro, que são um dos materiais com maior tempo de decomposição presentes em aterros sanitários e outros depósitos. Dentre os diferentes tipos de embalagens de vidro que são utilizadas têm-se as garrafas *long neck*, que são hoje um grande problema devido ao seu descarte após a utilização. Nesse contexto, visando minimizar este problema ambiental, destaca-se o setor da construção civil, que é um excelente meio para incorporar resíduos. O objetivo deste trabalho é estudar a viabilidade de utilização de garrafas *long neck* moídas em substituição parcial a areia na produção de argamassa. Para tanto, foram realizados ensaios de consistência no estado fresco e de resistência à tração na flexão, resistência à compressão e absorção de água por capilaridade no estado endurecido. Os percentuais de substituição de agregado miúdo por resíduo de vidro moído foram de 10, 15, 25 e 50 % nos tempos de 7, 28, 63 e 91 dias. Como resultados, nos ensaios de resistência mecânica, obtiveram-se resistências estatisticamente iguais ou superiores ao traço referência, sendo as maiores resistências obtidas com o teor de 50 % de resíduo de vidro moído. Já no ensaio de absorção de água por capilaridade, todos os traços de argamassa apresentaram elevado coeficiente de capilaridade, sendo considerados inadequados para utilização em argamassas de revestimento.

Palavras-chave: Vidro. Garrafas *long neck*. Areia. Argamassa.

ABSTRACT

One of the consequences of the industrial expansion process is the generation of large amounts of waste. Among all the waste generated stand out the glass packaging, which is one of the materials with the longest decomposition present in landfills and other deposits. Among the different types of glass packaging that are used are the long neck bottles, which are today a major problem due to their disposal after use. In this context, in order to minimize this environmental problem, we highlight the construction sector, which is an excellent way to incorporate waste. The objective of this work is to study the viability of using long neck bottles to partially replace sand in the production of mortar. For this purpose, fresh consistency and flexural tensile strength, compressive strength and hardened capillary water absorption tests were performed. The percentages of replacement of fine aggregate by ground glass residue were 10, 15, 25 and 50 % at 7, 28, 63 and 91 days. As a result, in the mechanical strength tests, resistances were obtained statistically equal to or higher than the reference trait, and the highest strengths were obtained with the 50 % residue of ground glass. In the capillary water absorption test, all traces of mortar presented high coefficient of capillarity, being considered unsuitable for use in coating mortars.

Keywords: Glass. Long neck bottles. Sand. Mortar.

1. INTRODUÇÃO

O crescimento industrial vem acompanhado de avanços tecnológicos e científicos que visam melhorar a qualidade de vida da população em geral. Uma das consequências desse processo é a geração de grande quantidade de resíduos, danosos ou não ao meio ambiente e à vida da população [1].

Nas últimas décadas, a consciência ecológica dos consumidores vem crescendo e fazendo com que as autoridades e os setores produtivos busquem cada vez mais informações sobre os impactos ambientais associados aos processos produtivos, uso e descarte final dos produtos [2].

O Brasil produz em média 980 mil toneladas de embalagens de vidro por ano, ocupando cerca de 45 % de matéria-prima reciclada na forma de cacos. Em 2010, apenas 47 % do total de embalagens utilizadas no Brasil foram recicladas, ou seja, mais da metade dessas embalagens tem um destino inadequado [3].

Devido principalmente ao elevado custo do transporte até a reciclagem, impurezas e mistura de sucatas de cores diferentes que são difíceis de serem separadas, a maior parte do vidro é descartada, fazendo com que este seja um dos materiais de maior tempo de decomposição presente em aterros sanitários e outros depósitos [4].

Apesar de utilizar grandes quantidades de recursos naturais, a construção civil pode absorver resíduos sólidos, reduzindo impactos ambientais advindos da disposição final desses resíduos e, além disso, evitando a retirada de matérias primas naturais [5]. De acordo com OLIVEIRA *et al.* [6], o setor da construção civil pode incorporar grande quantidade de resíduos, sendo a técnica de encapsulamento de resíduos em artefatos de construção civil uma das mais promissoras.

Vários trabalhos têm sido desenvolvidos com o objetivo de avaliar a viabilidade de incorporação dos mais diversos resíduos na construção civil. Entre eles destaca-se o vidro, que apresenta elevada durabilidade química, o que o torna capaz de compor materiais cimentícios como argamassas e concretos [7].

FÁVERO [8] estudou a viabilidade da utilização da sucata de vidro comum transparente como adição mineral em substituição ao cimento e como agregado miúdo artificial (areia) na produção de materiais à base de cimento. Os resultados obtidos demonstram que o vidro, quando usado como areia artificial, confere à argamassa ganhos de resistência superiores à argamassa convencional, sem sofrer expansões decorrentes da reação álcali-agregado (RAA). Quando utilizado como adição mineral, o material não se mostrou adequado, uma vez que participa da RAA e os ganhos de resistência se equiparam aos do traço de referência.

Em outro estudo, quando utilizado vidro triturado em substituição a areia na produção de argamassas com percentuais de substituição e tempos de cura variáveis, concluiu-se que os resíduos de vidro podem ser aplicados em formulação de argamassa, pois apresentaram ação benéfica no aspecto da resistência à compressão, e sua implantação no processo da construção civil traz vantagem ao meio ambiente [7].

Em outro projeto, onde foi avaliado o desempenho do resíduo de vidros planos moídos em pastas e argamassas a base de cimento Portland, os resultados indicaram que as resistências mecânicas das pastas com resíduo de vidro moído alcançaram o valor da resistência de referência a partir dos 28 dias. Já nas argamassas foram obtidos resultados satisfatórios de resistência mecânica a partir dos 7 dias, iniciado pelo efeito de preenchimento e, posteriormente, pelo efeito pozolânico, que superou os resultados de referência após os 28 dias [9].

São inúmeras as vantagens advindas da utilização de resíduos como substituição às matérias-primas naturais. FÁVERO [8] destaca que a extração da areia causa grande impacto ambiental e sua disponibilidade diminui com o passar do tempo. Dessa forma, segundo o autor, a substituição da areia por resíduos diminuiria a poluição do solo, da água e do ar.

O presente trabalho busca analisar soluções técnicas que permitam a utilização do resíduo de vidro moído como substituto parcial ao agregado miúdo na argamassa, aliando formas de crescimento sustentável à construção civil, tendo como objetivo analisar a influência da substituição parcial de agregado miúdo por resíduo de vidro moído na produção de argamassa.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O detalhamento do programa experimental encontra-se na Figura 1 a seguir relacionada.

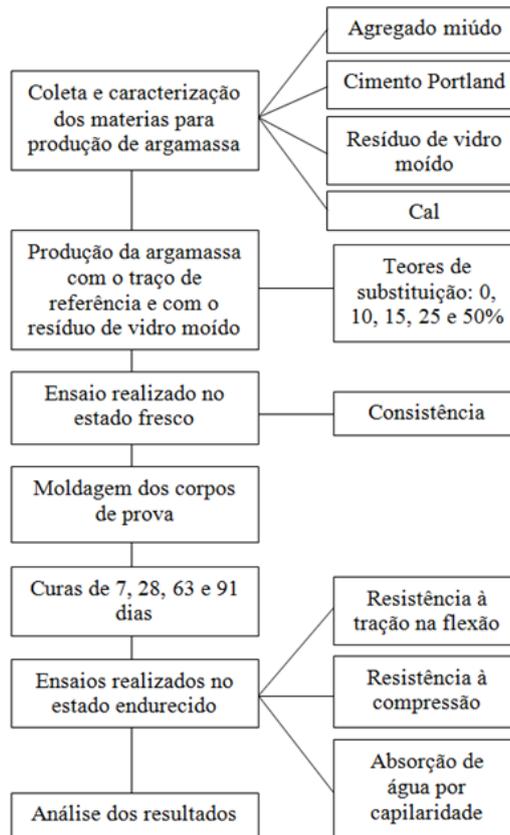


Figura 1: Detalhamento do programa experimental.

2.1 Materiais utilizados

Os materiais utilizados neste trabalho, para a produção dos corpos de prova de argamassa, foram:

- Cimento Portland pozolânico resistente a sulfatos (CP IV-32 RS), que é bastante utilizado quando da presença de agregados reativos e tem ótima resistência a meios agressivos.
- Cal hidratada do tipo CH III.
- Areia média natural de origem quartzosa, conhecida comercialmente por areia média, cuja dimensão máxima característica era 2,36 mm, massa específica de 2,59 g/cm³ e módulo de finura de 1,98.
- Resíduo de vidro moído proveniente da moagem de garrafas *long neck*. O processo de moagem inicial foi feito de forma manual por meio de martelo e soquete metálico. Em seguida, os pedaços das garrafas foram moídos por cerca de 2 horas em Moinho de Bolas e, posteriormente, o material foi peneirado na peneira 2,36 mm, sendo o resíduo de vidro retido nessa peneira encaminhado novamente para o Moinho de Bolas. Como o resíduo de vidro obtido com esse processo continha grande quantidade de material fino quando comparado com a areia média, o resíduo foi peneirado na peneira 0,15 mm, sendo descartado o material passante nessa peneira. Para o resíduo de vidro moído, a dimensão máxima característica também foi de 2,36 mm, massa específica de 2,41 g/cm³ e módulo de finura de 2,28.

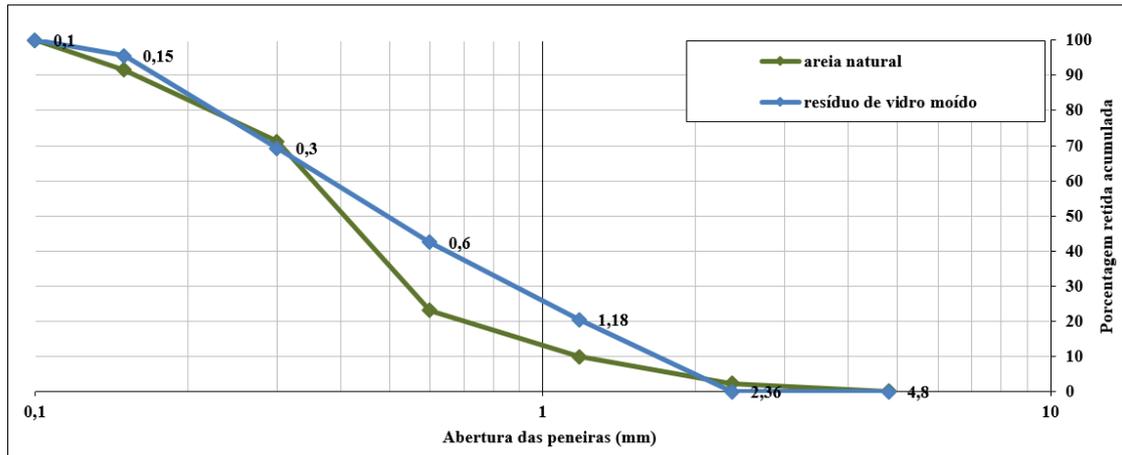


Figura 2: Curvas de distribuição granulométrica da areia média e do resíduo de vidro moído

Como pode ser observado na Figura 2, o resíduo de vidro moído apresentou melhor distribuição granulométrica do que a areia média utilizada.

Além da caracterização granulométrica, o resíduo de vidro moído passou por análises de MEV (microscopia eletrônica de varredura) e DRX (Difratometria de raios-X) onde o equipamento operou na geometria convencional de 2 theta e o ângulo de análise estendeu-se entre 1,35 a 70 graus.

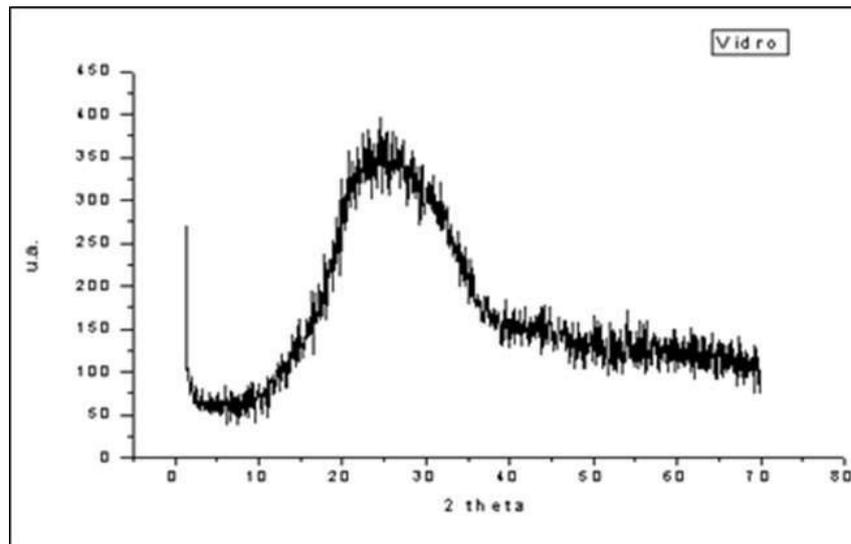


Figura 3: DRX do resíduo de vidro moído.

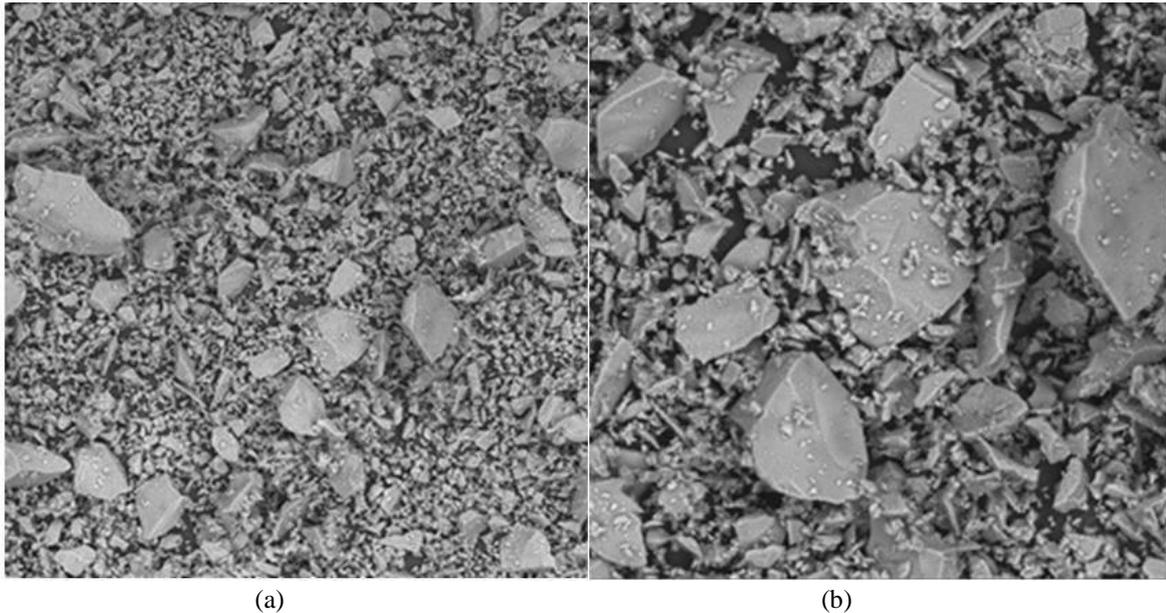


Figura 4: MEV do resíduo de vidro moído: (a) aumento de 400 x, (b) aumento de 1000 x.

Analisando o difratograma apresentado na Figura 3, pode-se perceber que o resíduo de vidro moído é um material de estrutura predominantemente amorfa, o que acorda com o trabalho de PAIVA [9], que, ao analisar esse material, encontrou um halo característico bastante largo, entre os ângulos de 18 e 35 graus, e nenhum pico de difração definido. Observando as imagens de MEV, apresentadas na Figura 4, pode-se perceber a grande disparidade de formas apresentada pelo resíduo de vidro moído, com partículas de tamanho irregular. Devido à estrutura desordenada e sem forma definida, o resíduo de vidro moído é um material propício às combinações e transformações com outros elementos.

2.2 Dosagem, preparação e moldagem das argamassas

Com o objetivo de uniformizar melhor a mistura, as argamassas foram produzidas manualmente. O traço utilizado foi 1:1:6 (cimento: cal: areia média) em volume, sendo convertido em massa para correto proporcionamento dos materiais. Além do traço de referência, com uso apenas da areia natural, foram substituídos os teores de 10, 15, 25 e 50 % do agregado miúdo natural por resíduo de vidro moído.

O processo de preparo das argamassas foi feito de forma manual e consistiu na pesagem dos materiais, mistura dos mesmos e adição de água até que se atingisse a consistência de 260 ± 5 mm, conforme a NBR 13276: 2016 [10]. Na Tabela 1 encontram-se os parâmetros de dosagem utilizados.

Tabela 1: Parâmetros de dosagem.

TRAÇO	CONSUMO CIMEN-TO (kg/m ³)	TEOR DE SUBSTI-TUIÇÃO DE AREIA	RELAÇÃO ÁGUA/AGLOMERANTE	CONSISTÊNCIA MÉDIA (mm)
1:1:6	160	0 %	0,73	258
		10 %	0,72	260
		15 %	0,69	259
		25 %	0,73	262
		50 %	0,71	261

Os corpos de prova foram moldados em duas camadas de argamassa, sendo que cada camada recebeu 25 golpes na mesa de consistência para adensamento da argamassa. Após 48 ± 24 horas, foi feita a desmoldagem dos corpos de prova e os mesmos foram colocados em câmara climatizada para o processo de cura, ficando a temperatura de 23 °C e umidade constante de 80 % até atingidas as idades de ensaio.

2.3 Ensaios realizados

No estado fresco foi determinado o índice de consistência conforme a NBR 13276: 2016 [10].

Já no estado endurecido foram realizados os ensaios de resistência à tração na flexão e à compressão, conforme a NBR 13279: 2005 [11] e o ensaio de absorção de água por capilaridade, cuja norma regulamentadora é a NBR 15259: 2005 [12].

3. RESULTADOS

3.1 Resistência à compressão

A avaliação da resistência à compressão é um dos principais requisitos para argamassas e concretos. Segundo KOLLER *et al.* [13], a resistência à compressão está diretamente relacionada com a durabilidade e a segurança, pois mede a capacidade de carga dos materiais.

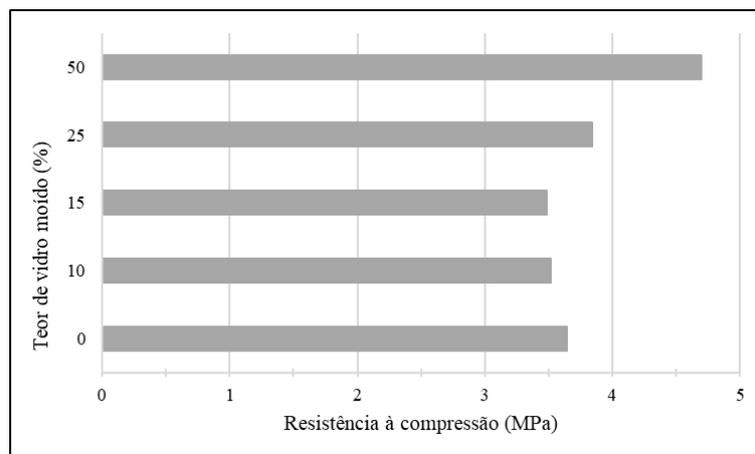


Figura 5: Influência do teor de substituição sobre a resistência à compressão.

Analisando a Figura 5, que apresenta o efeito isolado do teor de substituição na resistência à compressão, pode-se observar que o traço de referência e os teores de substituição de 10, 15 e 25 % são estatisticamente iguais, de acordo com o teste Tukey. Destaca-se apenas o teor de substituição de 50 %, que apresentou o melhor resultado de resistência à compressão das argamassas, sendo 27,38 % superior ao traço de referência.

Segundo MEHTA e MONTEIRO [14], existe uma relação inversa entre porosidade e resistência dos sólidos e a resistência à compressão das argamassas está diretamente ligada à porosidade da mistura. Dessa forma, como o resíduo de vidro moído apresentou melhor distribuição granulométrica em comparação com o agregado miúdo natural utilizado, o aumento do teor de substituição melhorou o empacotamento da mistura e reduziu os vazios e a quantidade de água utilizada, o que justifica o aumento da resistência à compressão nos teores de 25 e 50 %.

De acordo com LÓPEZ *et al.* [15], existe uma curva granulométrica ideal para o agregado miúdo, que leva a uma diminuição dos vazios da mistura. No caso dos teores de 10 e 15 %, essa curva granulométrica ideal pode não ter sido atingida em virtude da quantidade insuficiente de finos, que não preencheram completamente os vazios da mistura, o que justifica a leve queda na resistência à compressão em relação ao traço de referência.

O efeito isolado do tempo de cura pode ser observado na Figura 6, onde foram utilizadas as médias de resistências à compressão de todos os traços de argamassa.

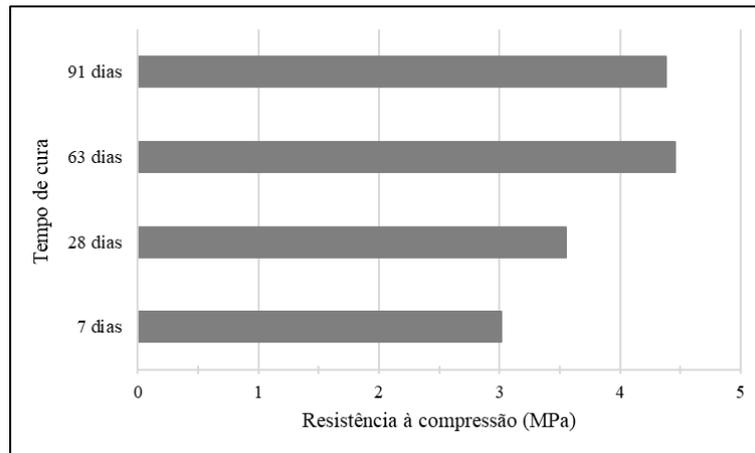


Figura 6: Influência do tempo de cura sobre a resistência à compressão.

Analisando a Figura 6 pode-se observar o aumento da resistência das argamassas ao longo do tempo. Em relação ao tempo de cura de 28 dias, que é o usualmente medido, a resistência à compressão aos 7 dias era 18,11 % menor. Já aos 63 dias a resistência à compressão aumentou 26,18 % e, aos 91 dias, 21,45 %.

De acordo com o Teste Tukey realizado, os valores de resistência à compressão nos tempos de cura de 63 e 91 dias são estatisticamente iguais, o que significa uma estabilização da resistência à compressão após os 63 dias.

Segundo FÁVERO [8], a sílica ativa é uma excelente pozolana, altamente reativa e que confere ótimos ganhos de resistência mecânica e, de acordo com SANTOS [16], o principal componente de fabricação do vidro é a sílica. Dessa forma, o aumento de resistência à compressão ao longo do tempo pode estar relacionado ao efeito pozolânico gerado pelo resíduo de vidro. Além disso, o efeito fíller, de preenchimento, reduziu a porosidade da matriz, aumentando assim sua resistência mecânica.

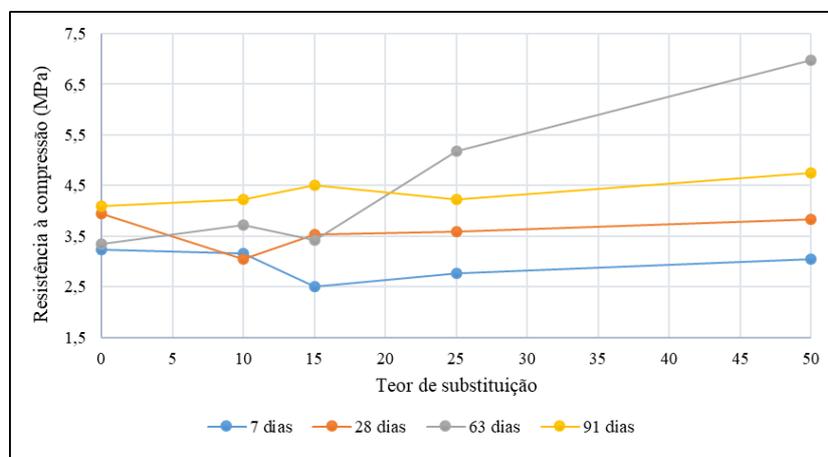


Figura 7: Efeito combinado do teor de substituição e do tempo de cura sobre a resistência à compressão.

Analisando a Figura 7, que mostra a influência combinada do tempo de cura e do teor de substituição na resistência à compressão, pode-se perceber que a resistência aumenta com o aumento do tempo de cura. Porém, a tendência é que a resistência à compressão estabilize entre 63 e 91 dias de cura; ocorre uma queda de resistência à compressão, aos 91 dias, para os traços de argamassa com 25 e 50 % de resíduo de vidro moído. Nota-se também que, nas primeiras idades (7 e 28 dias), a substituição de agregado miúdo pelo resíduo de vidro moído não apresentou resultados satisfatórios, havendo uma pequena diminuição da resistência à compressão. É apenas a partir dos 63 dias de cura que o vidro traz benefícios para a matriz da argamassa, aumentando sua resistência à compressão.

NASSAR e SOROUSHIAN [17] atribuem a melhora na resistência à compressão dos concretos com resíduo de vidro a formação de uma estrutura mais densa, consequência do preenchimento dos poros por sili-

cato de cálcio hidratado (C-S-H) adicional, formado através das reações pozolânicas causadas pela incorporação do resíduo de vidro no concreto.

Segundo METHA e MONTEIRO [14], a resistência à compressão está relacionada com a porosidade dos agregados. Como o vidro não absorve água, quanto maior a quantidade de substituição, maior a resistência à compressão. Além disso, em função da curva de distribuição granulométrica do resíduo de vidro ser contínua e bem graduada, o empacotamento da mistura melhorou conforme o aumento do percentual de substituição, justificando o aumento da resistência à compressão.

Considerando a média dos resultados ao longo dos 91 dias de cura e a classificação de resistência à compressão da norma NBR 13281:2005 [18], o traço de referência enquadra-se na classe P2 e os teores de 10, 15, 25 e 50 % de substituição enquadram-se na classe P3. Portanto, o teor de 0 % corresponde a uma argamassa de revestimento interno e os demais teores a uma argamassa de revestimento externo ou interno.

3.2 Resistência à tração na flexão

Segundo MEHTA e MONTEIRO [14] a resistência de um material é definida como a capacidade para resistir à tensão sem se romper. Segundo GOMES [19], em certas situações a resistência à tração pode influenciar positivamente no controle da fissuração, onde o movimento de retração por secagem está restringido. Entretanto, executar revestimentos com maior rigidez e com alta resistência à tração, também pode causar fissuração, já que a diminuição da capacidade de alívio das tensões poderá superar facilmente a resistência à tração.

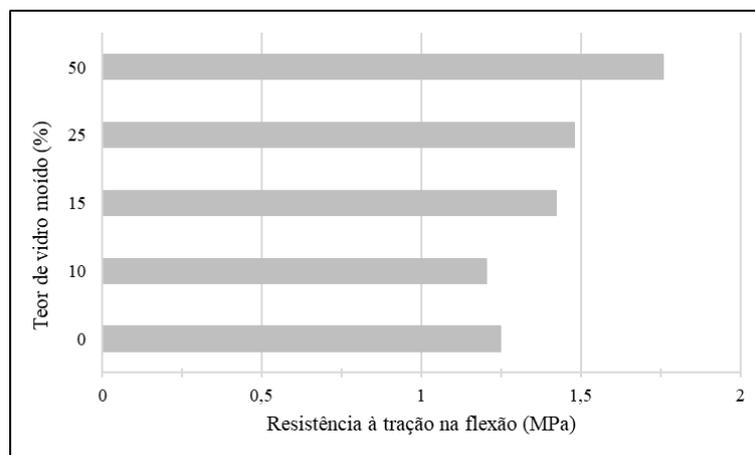


Figura 8: Influência do teor de substituição sobre a resistência à tração na flexão.

Com o Teste Tukey e através da análise do gráfico da influência do teor de substituição na resistência à tração na flexão, pode-se perceber que os teores de 0 e 10 % de substituição possuem valores de resistência à tração na flexão estatisticamente iguais. Além desses, os teores de substituição de 15 e 25 % também apresentam a mesma resistência estatisticamente, destacando-se apenas o percentual de 50 %.

Da mesma forma que ocorreu no ensaio de resistência à compressão, a resistência à tração na flexão das argamassas, de forma geral, aumentou conforme aumentou o percentual de substituição de agregado miúdo natural pelo resíduo de vidro moído. Obteve-se uma diminuição de 3,2 % na resistência à tração na flexão para o teor de 10 % de substituição em relação ao traço de referência. Já para os teores de 15, 25 e 50 %, em relação ao traço de referência, as resistências à tração na flexão aumentaram nos percentuais de 15,6 %, 21,4 % e 40,4 %, respectivamente.

CORINALDESI *et al.* [20], ao analisar imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura, concluíram que a substituição do agregado miúdo por resíduo de vidro nas argamassas tornou a estrutura destas mais densa. Dessa forma, justifica-se o aumento da resistência à tração na flexão conforme aumenta o teor de substituição.

Na Figura 9 a seguir relacionada pode ser observado o efeito isolado do tempo de cura sobre a resistência à tração na flexão. Nesse caso, foram utilizadas as médias de resistências à tração na flexão de todos os traços de argamassa.

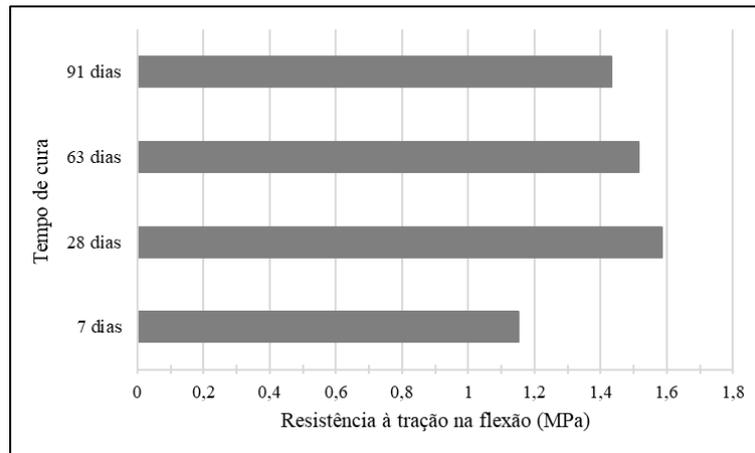


Figura 9: Influência do tempo de cura sobre a resistência à tração na flexão.

Neste caso da influência do tempo de cura sobre a resistência à tração na flexão, diferentemente do que ocorreu com a resistência à compressão, o tempo de cura de 28 dias foi o que apresentou maior resistência das argamassas. Apesar disso, todos os tempos de cura apresentaram significativo aumento de resistência à tração na flexão em relação ao tempo de cura de 7 dias, sendo os valores de 37,91 % para o tempo de 28 dias, 30,02 % para o tempo de 63 dias e 24,53 % para o tempo de cura de 91 dias.

Pode-se observar que a resistência nos tempos de 28 e 63 dias é estatisticamente igual, assim como os teores de 63 e 91 dias possuem estatisticamente os mesmos valores de resistência à tração na flexão.

De acordo com METHA e MONTEIRO [14], pozolanas são substâncias constituídas de sílica e alumina que, em presença de água, combinam-se com o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) e com os diferentes componentes do cimento, sendo capazes de formar compostos estáveis com propriedades aglomerantes e que contribuem para o aumento da trabalhabilidade da mistura, da resistência e da impermeabilidade. Dessa forma, ao se tornar menos permeável, a durabilidade do material tende a aumentar. Apesar disso, de acordo com PAIVA [9], a presença de sílica amorfa torna o vidro potencialmente pozolânico apenas quando utilizado com alto grau de finura.

Pode-se perceber que a resistência à tração na flexão das argamassas aumenta gradativamente até atingir os 28 dias de cura devido ao preenchimento da matriz, proporcionado pelo resíduo de vidro. Após esse período de cura, a resistência à tração na flexão tem uma pequena diminuição e tende a se estabilizar.

Depois de cerca de um mês de cura, segundo MEHTA e MONTEIRO [14], a resistência à tração do concreto aumenta mais lentamente do que a resistência à compressão; isto é, a razão resistência à tração/compressão diminui com a idade de cura.

Essa relação pode justificar também o que ocorreu nos corpos de prova de argamassa, cuja resistência à tração na flexão não aumentou após o período de cura de 28 dias.

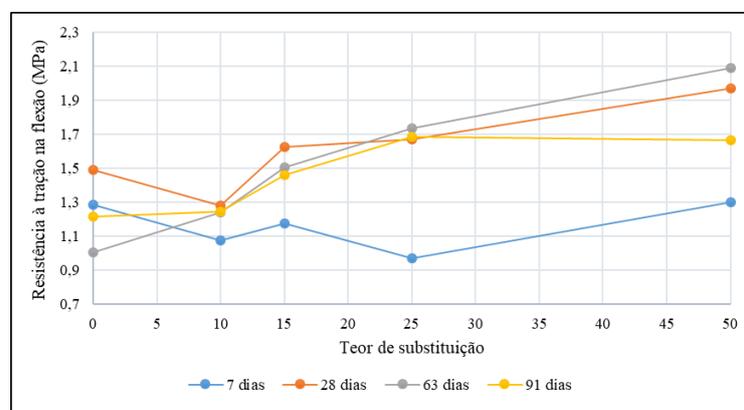


Figura 10: Efeito combinado do teor de substituição e do tempo de cura sobre a resistência à tração na flexão.

Como pode ser observado na Figura 10, o efeito combinado entre o teor de substituição e o tempo de cura mostra que a resistência à tração na flexão cresce ao longo do tempo, mas é entre os tempos de cura de 28 e 63 dias que se chega aos melhores resultados.

Considerando o tempo de cura de 7 dias, pode-se perceber que, embora varie ao longo do tempo, a resistência à tração na flexão será a mesma para os teores de substituição de 0 e 50 %. Já nos tempos de cura de 28 e 63 dias, notam-se os efeitos de preenchimento do vidro, que proporcionam aumento da resistência à tração na flexão ao longo do tempo e conforme aumenta o teor de substituição. Considerando o tempo de cura de 91 dias, a resistência à tração na flexão cresce com o aumento do teor de substituição, mas se estabiliza a partir dos 25 %; nesse caso, os teores de substituição de 25 % e 50 %, aos 91 dias, são estatisticamente iguais.

A ligeira diminuição da resistência à tração na flexão que ocorre aos 91 dias, em relação aos valores obtidos aos 28 e 63 dias, ocorre em função da estabilização da resistência. Já o aumento da resistência à tração na flexão que ocorre com o aumento do teor de substituição deve-se ao preenchimento dos vazios. Segundo MEHTA e MONTEIRO [14], a capacidade de uma adição mineral reagir às temperaturas normais com o hidróxido de cálcio (presente na pasta de cimento Portland hidratada) e de formar silicato de cálcio hidratado adicional pode levar a uma redução significativa da porosidade da matriz e da zona de transição da interface.

Utilizando a média dos resultados ao longo dos 91 dias de cura e a classificação de resistência à tração na flexão da norma NBR 13281:2005 [18], todos os teores de substituição enquadram-se na classe R2 de resistência à tração na flexão das argamassas. Portanto, todos os traços podem ser utilizados como argamassa de revestimento externo, argamassa de uso geral ou como argamassa de reboco, não podendo ser utilizada para revestimento externo devido à baixa resistência à tração na flexão atingida.

3.3 Absorção de água por capilaridade

De acordo com MEHTA e MONTEIRO [14], o tamanho e a continuidade dos poros capilares determinam a permeabilidade de uma matriz cimentícia. Essa propriedade está diretamente ligada à durabilidade das argamassas, pois a água, juntamente com íons agressivos, é responsável por alguns processos de deterioração da matriz. A permeabilidade de uma argamassa pode ser determinada através do ensaio de absorção de água por capilaridade.

Segundo GOMES [19], nesse ensaio é determinada a quantidade de água absorvida pelo corpo de prova por meio da ascensão capilar e essa propriedade pode classificar a argamassa quanto à sua capacidade de absorver a água do substrato.

A Tabela 2 a seguir relacionada apresenta as médias de absorção nos tempos 10 e 90 min e o coeficiente de capilaridade determinados no tempo de cura de 28 dias. Para a realização desse ensaio foram utilizados três corpos de prova prismáticos com dimensões de 4x4x16 cm para cada uma das misturas, conforme determinado pela NBR 15259: 2005 [12].

Tabela 2: Valores médios da absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade aos 28 dias.

SUBSTITUIÇÃO	ABSORÇÃO (g/cm ²)	10MIN	ABSORÇÃO (g/cm ²)	90MIN	COEFICIENTE DE CAPILARIDADE (g/dm ² .min ^{1/2})
0 %	0,36		1,11		11,93
10 %	0,44		1,32		14,07
15 %	0,40		1,12		11,48
25 %	0,54		1,46		14,68
50 %	0,53		1,43		14,37

Analisando a Tabela 2, nota-se que o teor de 0 % de substituição apresentou o melhor resultado. Após este, o melhor teor foi o 15 % de substituição, seguido pelo teor 10 %. Os teores 25 e 50 % são praticamente iguais, e representam os piores resultados, apresentando um aumento médio de 21,75 % em relação ao traço de referência.

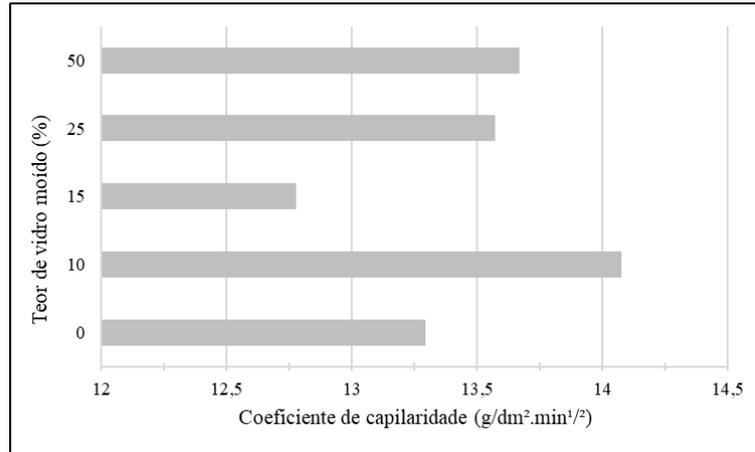


Figura 11: Influência do teor de substituição sobre o coeficiente de absorção de água por capilaridade.

Na Figura 11, que apresenta a influência do teor de substituição no coeficiente de absorção de água por capilaridade, pode-se observar que o coeficiente aumentou com o teor de substituição de 10 %, diminuiu no teor de 15 % e voltou a aumentar nos teores de 25 e 50 % de substituição.

Com relação ao traço de referência, os teores de 10, 25 e 50 % apresentaram aumento do coeficiente de capilaridade na ordem de 5,94 %, 1,05 % e 2,78 %, respectivamente. Já o teor de substituição de 15 % apresentou queda no coeficiente de capilaridade na ordem de 3,84 %, representando o melhor resultado.

Com o auxílio do Teste Tukey sabe-se que o teor de 0 % é estatisticamente igual aos teores de 15, 25 e 50 % de substituição. Dessa forma, pode-se perceber que a substituição de agregado miúdo pelo resíduo de vidro não alterou significativamente o coeficiente de capilaridade, que é um indicador da durabilidade do produto final.

O efeito isolado do tempo de cura no coeficiente de capilaridade pode ser observado na Figura 12, onde foram utilizadas as médias de dos coeficientes de capilaridade de todos os traços de argamassa.

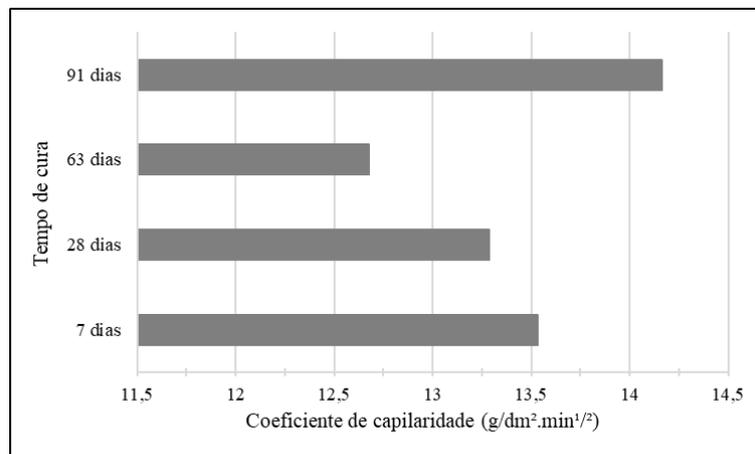


Figura 12: Influência do tempo de cura sobre o coeficiente de absorção de água por capilaridade.

Como pode ser observado na Figura 12, em relação ao tempo de cura de 28 dias, o coeficiente de absorção de água era 1,73 % maior aos 7 dias, mas diminuiu 4,73 % aos 63 dias, o que indica um bom resultado. Já aos 91 dias, o coeficiente de absorção de água volta a aumentar, tornando-se 7,37 % maior do que aos 28 dias.

Com o Teste Tukey observa-se que os tempos de cura de 7 e 28 dias são estatisticamente iguais, pois possuem coeficientes de capilaridade semelhantes. Os demais tempos diferem entre si, sendo que, aos 91 dias, tem-se o maior coeficiente de capilaridade.

A Figura 13 a seguir relacionada mostra o efeito combinado da interação entre teor de substituição e

tempo de cura sobre o coeficiente de capilaridade, a partir da análise estatística (ANOVA).

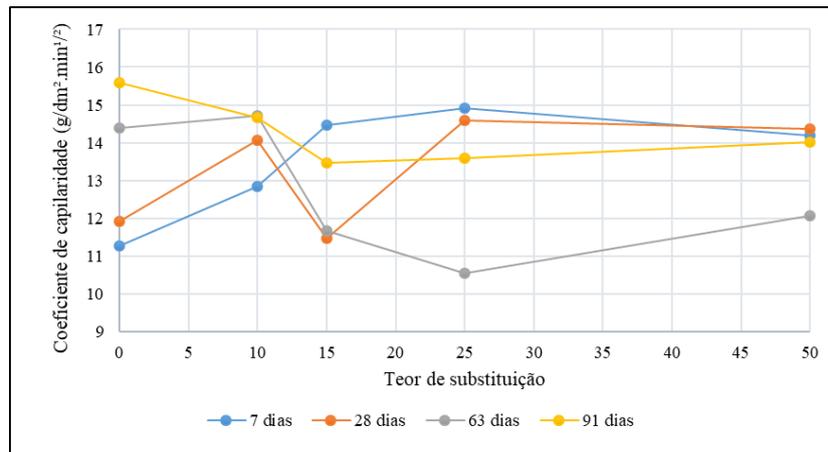


Figura 13: Efeito combinado do teor de substituição e do tempo de cura sobre o coeficiente de absorção de água por capilaridade

De acordo com CARASEK [21], a permeabilidade à água é a propriedade que está relacionada com a função de estanqueidade da parede, muito importante quando se trata de revestimentos de fachada. Segundo a autora, esse atributo é primordial quando o edifício está situado em região de alto índice de precipitação pluviométrica, pois é o revestimento que protege a edificação da infiltração de água. A infiltração de água pela parede compromete tanto a higiene e a saúde dos usuários, como a estética do edifício, além de estar associada às manifestações patológicas como eflorescências, descolamentos e manchas de bolor e mofo. No entanto, de nada adianta uma argamassa de baixa permeabilidade à água, se o revestimento estiver todo fissurado, permitindo a penetração da água pelas aberturas.

Analisando os resultados, todos os traços de argamassa pertencem a classe C6 da norma NBR 13281:2005 [18], cujo coeficiente de capilaridade é superior a $10 \text{ g/dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$. Para uma argamassa de revestimento externo, por exemplo, é necessário que o coeficiente de capilaridade seja igual ou inferior a classe C3 ($2,0$ a $4,0 \text{ g/dm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$).

Quanto maior a relação água/aglomerante, maior é o índice de absorção. Segundo SCANDOLARA [22], o aumento da relação água/aglomerante aumenta a absorção de água dos materiais cimentícios. Devido ao excesso de água presente na mistura, aquela que não reagiu para a formação dos hidratos será expelida, formando vazios na matriz de cimento endurecida.

KURZ *et al.* [23] estudaram o comportamento físico e mecânico de argamassas com diferentes teores de resíduo de borracha de pneu substituindo o agregado miúdo. Quanto a absorção de água por capilaridade, o teor de substituição de 10 % apresentou o melhor desempenho, sendo superior ao traço referência. Nesse trabalho, a utilização de 10 % de resíduo de vidro moído apresentou o pior comportamento entre todos os teores utilizados; os menores coeficientes de capilaridade foram obtidos utilizando o teor de 15 % de substituição de agregado miúdo.

As relações água/aglomerante para os traços de 0, 10, 15, 25 e 50 % foram, respectivamente, 0,73, 0,72, 0,69, 0,73 e 0,71. Dessa forma, justifica-se o menor coeficiente de capilaridade atingido pelo teor de substituição de 15 %.

4. CONCLUSÕES

Ao apresentar uma solução econômica e ambientalmente correta para o descarte das garrafas *long neck*, avaliou-se a substituição parcial de agregado miúdo por resíduo de vidro moído na produção de argamassa nos teores de 0, 10, 15, 25 e 50 % e nos tempos de cura de 7, 28, 63 e 91 dias. As principais conclusões deste trabalho são:

Com relação à resistência à compressão, considerando todos os teores de substituição de agregado miúdo por resíduo de vidro moído, o melhor resultado foi obtido com o teor de 50 % de substituição, que é 27,38 % maior do que o traço de referência. Os demais teores de substituição são estatisticamente iguais ao teor 0 %.

Quanto ao tempo de cura, a resistência à compressão das argamassas aumentou ao longo do tempo e atingiu o maior valor aos 63 dias. Aos 91 dias de cura ocorreu uma leve diminuição da resistência, o que indica a estabilização da resistência à compressão.

Com relação à resistência à tração na flexão, os teores de 0 e 10 % de substituição de agregado miúdo por resíduo de vidro são estatisticamente iguais. Considerando apenas o efeito isolado dos teores de substituição, a tendência é termos, novamente, um aumento da resistência à tração na flexão conforme aumenta o teor de substituição, com destaque para o teor de 50 %, que foi 40,4 % superior ao traço de referência

Quando considerado o efeito isolado do tempo de cura, a resistência à tração na flexão das argamassas aumentou gradativamente e atingiu o melhor valor aos 28 dias de cura. Após isso, a resistência à tração na flexão teve uma pequena diminuição, o que indicou sua estabilização.

Já para o ensaio de absorção de água por capilaridade, considerando todos os percentuais e tempos de cura analisados, nenhum deles apresentou resultados satisfatórios quanto ao coeficiente de capilaridade, nem mesmo o traço de referência.

Entre todos os teores de substituição analisados, o teor de 15 % foi o melhor resultado, pois, quanto menor o coeficiente de capilaridade, melhor a qualidade da argamassa. Os teores de 25 e 50 %, por apresentarem maior quantidade de finos, acabaram absorvendo mais água, ao contrário do teor de 15 %, que apresentou menor absorção em função da melhor distribuição granulométrica da mistura.

Quando considerado os tempos de cura, o melhor resultado foi atingido no tempo de cura de 63 dias, assim como na resistência à compressão.

4.1 Considerações finais

Considerando todos os teores de substituição analisados, o mais indicado é o teor de 50 %, pois, além de melhorar significativamente a resistência mecânica da argamassa, é o teor que utiliza maior quantidade de resíduo de vidro, o que é ambientalmente recomendável.

Quanto aos diferentes tempos de cura ensaiados, os melhores resultados foram apresentados pelo tempo de 63 dias nos ensaios de resistência à compressão e de absorção de água por capilaridade. Já para o ensaio de resistência à tração na flexão, a maior resistência foi encontrada no tempo de cura de 28 dias. Dessa forma, indica-se que seja utilizado o tempo de cura das argamassas de 63 dias.

Considerando o ensaio de absorção de água por capilaridade, pode-se perceber que o traço utilizado não foi adequado para utilização como argamassa de revestimento devido ao alto coeficiente de capilaridade. Dessa forma, poder-se-ia testar outros traços, visando um melhor desempenho da argamassa no quesito absorção de água.

Ao final deste trabalho, pode-se concluir que a utilização de resíduo de vidro moído das garrafas *long neck* em substituição ao agregado miúdo na produção de argamassa é viável do ponto de vista das propriedades mecânicas, pois, melhora significativamente a resistência mecânica das argamassas em relação ao traço de referência. Além disso, a utilização das garrafas de vidro é ambientalmente vantajosa, pois evita a deposição desses resíduos em aterros sanitários e reduz a retirada de novas matérias primas do ambiente. De acordo com OKADA *et al.* [24], tem-se atualmente a necessidade de reduzir resíduos industriais sem impedir o progresso tecnológico, diminuindo assim, o impacto ambiental promovido pelo descarte de materiais e reduzindo os custos de produção de argamassas para a crescente demanda da construção civil.

Como trabalhos futuros, sugere-se que sejam feitos estudos de durabilidade, para verificar se a utilização do resíduo de vidro moído de garrafas *long neck* é viável à longo prazo.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] BARDINI, I.S., MARCHIORO, T.B. “Um estudo exploratório de uso de vidro reciclado como agregado de concreto”, Trabalho de Conclusão de Curso, UNISUL, Tubarão, SC, Brasil, 2007.
- [2] PRADO, M.R. “Análise do inventário do ciclo de vida de embalagens de vidro, alumínio e pet utilizadas em uma indústria de refrigerantes no Brasil”, Tese de D.Sc., UFPR, Curitiba, PR, Brasil, 2007.
- [3] CEMPRE, Compromisso Empresarial para Reciclagem, <http://www.cempre.org.br>. Acessado em março de 2017.
- [4] 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”, In: *Congresso Brasileiro do Concreto- IBRACON*, Salvador, 2008.

- [5] LUCAS, D., BENATTI, C.T., “Utilização de resíduos industriais para a produção de artefatos cimentícios e argilosos empregados na construção civil”, *Revista em Agronegócios e Meio Ambiente*, v. 1, 2008.
- [6] OLIVEIRA, L.T., SILVA, J.B., IDE, C.N., “Avaliação das Propriedades Físicas de Corpos de Prova com a Adição de Lodo de Reciclo de Cromo”, In: Congresso Brasileiro de Cerâmica, Salvador, 2007.
- [7] SOUZA, T.M. “Análise das propriedades mecânicas de argamassas com adição de vidro triturado”, Trabalho de Conclusão de Curso, UEPB, Araruna, PB, Brasil, 2016.
- [8] FÁVERO, R.B. “Avaliação da utilização de sucata de vidro como adição mineral frente à sílica ativa e como agregado miúdo artificial na produção de materiais à base de cimento”, Trabalho de conclusão de curso, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil, 2009.
- [9] PAIVA, O.A. “Resíduo Industrial de vidro moído em argamassa de cimento Portland”, Dissertação de Mestrado, UFAM, Manaus, AM, Brasil, 2009.
- [10] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência. NBR 13276. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- [11] _____. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. NBR 13279. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.
- [12] _____. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade. NBR 15259. Rio de Janeiro: ANBT, 2005.
- [13] KOLLER, D.R.P., PILECCO, D.S., BOHRER, D., *et al.*, “Avaliação da resistência à compressão de argamassas produzidas com vidro moído”, *Disc. Scientia. Série: Ciências Naturais e Tecnológicas*, Santa Maria, v. 8, n. 1, 2007.
- [14] MEHTA, P.K., MONTEIRO, P.J.M. *Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais*, 3 ed., São Paulo, Instituto Brasileiro do Concreto - IBRACON, 2014.
- [15] LÓPEZ, D.A.R., AZEVEDO, C.A.P., BARBOSA NETO, E., “Avaliação das propriedades físicas e mecânicas de concretos produzidos com vidro moído como agregado fino”, *Revista Cerâmica*, v. 51, 2005.
- [16] SANTOS, A. R., “Vidro - Ficha Técnica”, *Programa de Iniciação Científica, Departamento de Construção Civil, Escola Politécnica da USP*, São Paulo, 2003.
- [17] NASSAR R., SOROUSHIAN, P., “Strength and durability of recycled aggregate concrete containing milled glass as partial replacement for cement”, *Construction and Building Materials*, v. 29, 2012.
- [18] _____. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos. NBR 13281. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.
- [19] GOMES, L.V.R. “Estudo de Métodos de Ensaio e Comportamento Físico e Mecânico de Argamassas”, Dissertação de Mestrado, UFES, Vitória, ES, Brasil, 2008.
- [20] CORINALDESI, V., GNAPPI, G., MORICONI, G., *et al.*, “Reuse of ground waste glass as aggregate for mortars”, *Waste Management*, v. 25, 2005.
- [21] CARASEK, H. *Argamassas, Materiais de construção civil e princípio de ciência e engenharia dos materiais*, Editor Geraldo C. Isaia, v.2, São Paulo, 2010.
- [22] SCANDOLARA, J. P. “Propriedades de argamassas obtidas pela substituição parcial de cimento Portland por rejeitos particulados de tijolo”, Dissertação de Mestrado, UDESC, Joinville, SC, Brasil, 2010.
- [23] KURZ, M.N., BRANDELLI, T.M., PALIGA, C.M., *et al.*, “A potencialidade do uso de resíduo de borracha de pneu em argamassa: análise das propriedades físicas e mecânicas”, *Revista Matéria*, v. 23, 2018.
- [24] OKADA, E.M., CHIBLI P.A., BASTOS, L.A.C., *et al.*, “Produção de argamassa aditivada com resíduo de fibra de vidro pós-processada”, In: *X Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas*, Fortaleza, 2013.

ORCID

Priscila Ongaratto Trentin	https://orcid.org/0000-0002-4993-300X
Jocasta Mânica	https://orcid.org/0000-0002-8350-5420
Suelen Cristina Vanzetto	https://orcid.org/0000-0003-0430-6130
Bruno Marangoni	https://orcid.org/0000-0002-0551-2297
Alessandra Zaleski	https://orcid.org/0000-0002-4005-9950