

TÉCNICA

REVISTA TÉCNICA DE CERÂMICA E VIDRO

2021 // #12 | novembro/dezembro | Bimestral

€6,00



CAMINHOS PARA A DESCARBONIZAÇÃO



CENTRO TECNOLÓGICO DA CERÂMICA E DO VIDRO



CURSO DE TECNOLOGIA CERÂMICA

4ª EDIÇÃO | SETEMBRO 2022

- Matérias-primas e Formulações
- Conformação de Produtos Cerâmicos
- Tratamentos Térmicos
- Vidrados e Decoração
- Controlo de Qualidade de Produto
- Inovação e Tendências Tecnológicas
- Processos Cerâmicos por Subsetor

Saiba mais aqui!



www.ctcv.pt



Uma parceria CTCV e DEMaC – UA



universidade
de aveiro

03 Editorial

04 A crise Energética em Contexto de Descarbonização

- 04 A crise energética e o setor da cerâmica
- 06 Desafios da Indústria Cerâmica e a Descarbonização

10 Transição Verde

- 10 Descarbonização para a New European Bauhaus?
- 14 Caminhos para descarbonizar a indústria cerâmica e o CELE 2021-2025
- 19 Avaliação de Ciclo de Vida: uma ferramenta para a Descarbonização da Economia
- 22 Tecnologia SACMI para a sustentabilidade do processo cerâmico

26 Descarbonização da Indústria: Futuro

- 26 O desafio do FIT 55 em 2030
- 30 A descarbonização como oportunidade para a indústria cerâmica
- 32 Captura de dióxido de carbono: opções tecnológicas e principais desafios

38 Tecnologia Cerâmica

- 38 Tecnologia digital
- 40 Substituição de areia por resíduo de vidro em argamassa para assentamento: uma alternativa para mitigar os recursos naturais

51 Eventos

4ª Edição das Jornadas Técnicas da Cerâmica

FICHA TÉCNICA 2021 // #12 | novembro/dezembro | Bimestral

Propriedade, Edição e Redação
CTCV - Centro Tecnológico da Cerâmica e do Vidro
Rua Coronel Veiga Simão, 3025-307 Coimbra
(T) 239 499 200 (E) comunicacao@ctcv.pt (W) www.ctcv.pt
NIF: 501632174

Diretor Diretor Adjunto
António Baio Dias Sofia David

Subdiretor Editor
Sandra Carvalho Jorge Marques dos Santos

Colaborações
António Baio Dias, Ana Carvalho, Claudio Ricci, Daniele Baldini, Erika Peterson Gonçalves, Isabel Maia e Silva, Ivone Regina de Oliveira, José Carlos B. Lopes, José João Campos Rodrigues, Kátia Bittencourt Botelho, Luís Mira Amaral, Manuel Costeira da Rocha, Mariana G. Domingos, Marisa Almeida, Paulo Almeida, Pedro Ferreira, Pedro Frade, Sandra Carvalho, Victor Francisco

Design e Arte Final
José Luís Fernandes

Capa
Projetada usando recursos do Freepik.com

Impressão
Gráfica Almondina - Progresso e Vida; Empresa Tipográfica e Jornalística, Lda
Rua da Gráfica Almondina, Zona Industrial de Torres Novas, Apartado 29,
2350-909 Torres Novas
(T) 249 830 130 (E) geral@grafica-almondina.com (W) www.grafica-almondina.com

Tiragem
250 exemplares

Publicação Periódica inscrita na ERC (Entidade para a Comunicação Social) com o nº 127420
Estatuto Editorial disponível em <https://www.ctcv.pt/estatuto-editorial.pdf>

É proibida a reprodução total ou parcial de textos sem citar a fonte. Os artigos assinados veiculam as posições dos seus autores.



Substituição de areia por resíduo de vidro em argamassa para assentamento: uma alternativa para mitigar os recursos naturais

Kátia Bittencourt Botelho¹, Erika Peterson Gonçalves^{2*}, Ivone Regina de Oliveira³

¹Mestre em Processamento de Materiais pela Universidade do Vale do Paraíba, Brasil

²Doutora em Engenharia Aeronáutica e Mecânica pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Professora da Universidade do Vale do Paraíba, Brasil.

(*autor correspondente: erika@univap.br)

³Doutora em Ciência e Engenharia de Materiais pela Universidade Federal de São Carlos, Professora da Universidade do Vale do Paraíba, Brasil.

Resumo

Este trabalho estudou o efeito da substituição de agregado miúdo (areia) em argamassa para assentamento de alvenaria de vedação por resíduo de vidro. Argamassas foram preparadas com teores de 0, 25, 50 e 75% de vidro âmbar moído, mantendo-se a relação água/cimento em 0,5 sendo avaliadas quanto à retração volumétrica, porosidade aparente, resistência a compressão axial e diametral (tração indireta), absorção de água e avaliação microestrutural, aos 7 e 28 dias.

As argamassas apresentaram aumento de porosidade em todas as formulações sendo que para substituições de 50% observou-se o menor efeito para ambas as idades. As retrações volumétricas relativas, não sofreram o mesmo comportamento devido a influência da distribuição granulométrica dos agregados miúdos adicionados, sendo que as maiores retrações foram encontradas nas formulações com substituição de 75% do agregado. A absorção de água relativa mostrou-se superior nas amostras com adição de vidro moído quando comparadas às amostras de referência. As resistências mecânicas, tanto em compressão quanto em tração indireta, encontradas nas amostras com substituição de 25% apresentaram valores superiores às encontradas nas amostras de referência aos 28 dias de cura.

Os resultados deste trabalho mostram a viabilidade da utilização de 25% de resíduo em relação à massa de areia, para a produção de argamassas de assentamento de alvenaria de vedação, apresentando as qualidades adequadas de resistência a compressão, e viabilidade sustentável, contribuindo assim com o meio ambiente e consequentemente reduzindo os impactos ambientais.

Palavras chave: Argamassa assentamento, Vidro âmbar, Propriedades, Reação álcali-silica.

Replacement of sand with glass residue in mortar for settlement: an alternative to mitigate natural resources

Abstract

This work studied the effect of replacing fine aggregate (sand) in mortar for laying sealing masonry with glass residue. Mortars were prepared with contents of 0, 25, 50 and 75% of ground amber glass, keeping the water/cement ratio at 0.5, being evaluated for volumetric shrinkage, apparent porosity, resistance to axial and diametrical compression (indirect traction), water absorption and microstructural evaluation, at 7 and 28 days.

Mortars showed an increase in porosity in all formulations, and for 50% substitutions, the least effect was observed for both ages. The relative volumetric retractions did not suffer the same behavior due to the influence of the granulometric distribution of the added aggregates, with the greatest retractions being found in formulations with 75% substitution of the aggregate. The relative water absorption was higher in the samples with the addition of ground glass when compared to the reference samples. The mechanical strengths, both in compression and in indirect traction, found in the samples with 25% substitution presented values higher than those found in the reference samples after 28 days of cure.

The results of this work show the feasibility of using 25% of residue in relation to the sand mass, for the production of sealing masonry mortars, presenting the appropriate qualities of resistance to compression, and sustainable viability, thus contributing with the environment and consequently reducing environmental impacts.

Keywords: Mortar settlement, Amber glass, Properties, ASR.

1. Introdução

A construção civil é de suma importância à formação do produto nacional, posicionando-se em quarto lugar no ranking de contribuição total da economia, podendo subir para a segunda colocação quando se considera tanto a geração econômica direta quanto a indireta, neste caso, a participação da construção civil na produção nacional é de 13,69%. Para cada 231 novos postos de trabalho criados diretamente pelo setor, 475 novos empregos indiretos são gerados, pois a extensa e complexa cadeia produtiva da construção civil exerce forte alavancagem econômica nos setores que lhe servem de fornecedores de insumos.

Desta maneira, a construção civil impulsiona o crescimento econômico dos setores que lhe servem como produtores de bens e serviços (TEIXEIRA E CARVALHO, 2005; BRASILEIRO E MATOS, 2015).

Entretanto, a construção civil representa o setor da economia que mais consome recursos naturais. No Brasil, esta atividade apropriou-se de 75% do que é extraído do meio ambiente sendo que destes, apenas entre 20% e 50% das matérias-primas naturais são realmente consumidas na execução de produtos da construção civil.

No caso de agregados para fabricação de argamassas e concreto, o consumo estimado no ano 2017, foi de aproximadamente 497 milhões de toneladas, aumentando aproximadamente para 540 milhões de toneladas no ano de 2019 (ANEPAC, 2019). Com relação ao consumo de água, pode chegar até a 25% do volume mundial de água doce. A estimativa de consumo de água na construção civil varia entre 0,20 e 0,25 metros cúbicos de água por metro quadrado de área construída, sendo que para confecção de 1 m³ de concreto se gasta em média 211 litros de água (SILVA; VIOLIN, 2013).

Além disso, essa atividade é também, entre todas as atividades produtivas, a maior geradora de resíduos, chegando a ser duas vezes maior que o volume de lixo sólido urbano (TEIXEIRA E CARVALHO, 2005; BRASILEIRO E MATOS, 2015).

Assim sendo, a construção civil apresenta extrema importância ao desenvolvimento do país, o que demanda pesquisas na área da sustentabilidade para tornar a produção civil menos impactante ao ambiente, tanto na produção direta, quanto na produção de seus insumos. Pesquisas vêm avaliando a substituição do agregado miúdo natural (areia) devido ao impacto ambiental que ocorre na sua extração e o aumento do custo da mesma.

Estudos demonstram que o resíduo de vidro pode ser utilizado como agregado miúdo na construção civil, considerando que a sua utilização no desenvolvimento de argamassas produziu resultados melhores quando comparado aos traços de referência (OLIVEIRA, 2012;

LUNAS; SILVA; QUEIROZ, 2016). As resistências mecânicas à flexão e à compressão axial de argamassas com substituição da areia pelo resíduo de vidro moído quando comparado ao traço padrão é em geral superior, observando também uma melhora do comportamento mecânico com a idade de cura e com o aumento da substituição da areia pelo resíduo de vidro moído. Estudos demonstram que o maior benefício da utilização da substituição da areia pelo resíduo de vidro moído fica na faixa de 25% a 50% de substituição em massa, principalmente aos 28 dias de cura (LUNAS; SILVA; QUEIROZ, 2016).

Foi notado também uma melhor compatibilidade física com a alvenaria, tendo um aumento no teor de aderência, sendo esse aumento proporcionalmente maior, quanto maior a substituição da areia pelo resíduo de vidro moído (PENACHO; BRITO; VEIGA, 2012).

O vidro apresenta características similares a areia utilizada normalmente na produção de argamassa de assentamento podendo substituir essa matéria-prima na produção da argamassa sustentável, visando manter e/ou melhorar as propriedades e as características químicas, mecânicas e físicas adequadas a essa aplicação. Deste modo, contribui para a minimização dos problemas ambientais, promovendo a reutilização de materiais e o desenvolvimento de produtos sustentáveis.

Dentro deste contexto, o objetivo desse trabalho consiste no desenvolvimento e avaliação das propriedades de argamassas de assentamento de alvenarias em geral (tijolo cerâmico, tijolo maciços artesanais, blocos cimentícios, entre outros) empregando como matéria-prima resíduo de garrafa de vidro âmbar proveniente de bares e restaurantes.

2. Materiais e Métodos

2.1. Materiais

O aglomerante hidráulico utilizado nesta pesquisa foi o cimento Portland, CII-E-32 da Votoran. Esse cimento hidráulico é constituído de 66% a 94% de clínquer e gesso e de 6% a 34% de escória granulada de alto forno. A classe de resistência utilizada foi de 32 MPa (NBR 16697:2018)

A areia utilizada como agregado miúdo natural foi proveniente de cavas no município de Caçapava – SP/ Brasil (NBR 16697:2018).

O resíduo de vidro foi de garrafa de coloração âmbar, do tipo sódico-cálcico, composto de óxido de cálcio (8 a 12% em peso) e óxido de sódio (12 a 17% em peso), além de óxidos de carbono e compostos de enxofre que conferem a garrafa esta coloração característica (SANTOS, 2009).

2.2. Preparação e caracterização dos materiais e argamassa

As garrafas de vidro obtidas em bares e restaurantes foram limpas e removidos os rótulos, posteriormente foram quebradas e moídas por um moinho de martelos até uma granulometria 100% abaixo de 2,5 mm e separadas em diferentes faixas granulométricas com peneiras nº 4, 8, 16, 30, 50, 100 e 200 mesh.

O ensaio granulométrico foi realizado conforme a NM 248:2003, onde foram obtidos a curva granulométrica, o módulo de finura e o diâmetro máximo característico do resíduo de vidro. A areia também foi caracterizada como descrito para o resíduo de vidro. O módulo de finura é calculado a partir da soma da percentagem retida acumulada nas peneiras da série normal dividida por 100 e o diâmetro máximo característico é definido como a malha da peneira na qual fica retido o percentual acumulado igual ou imediatamente inferior a 5%, desde que essa percentagem seja superior a 5% na peneira imediatamente abaixo.

As argamassas foram produzidas com o traço de 1:2 e preparada conforme a NBR 16541:2016, substituindo a areia pelo resíduo de vidro nas porcentagens de 25, 50 e 75% em relação a massa de areia, mantendo-se a relação água/cimento em 0,5. Argamassa sem adição de resíduo de vidro (0 %) foi usada como referência, como apresentado na Tabela 1.

A areia foi misturada ao resíduo de vidro a seco, em seguida foi acrescentado o cimento, e após a homogeneização foi acrescentada a água, movimentando de forma lenta para a formação da argamassa a qual permaneceu em descanso por 75 segundos e em seguida misturada por mais 60 segundos.

As argamassas foram usadas na confecção dos corpos de prova por meio de preenchimento de moldes cilíndricos (1,6 cm diâmetro x 3,2 cm de altura) dispostos sobre mesa vibratória.

Tabela 1 - Quantidade dos materiais e relação água/cimento usados para confecção de cada corpo de prova. Fonte: Os autores

Composição	Cimento (g)	Areia (g)	Vidro (g)	Água/cimento
Referência	5,79	11,58	0	0,50
25% vidro	5,79	8,69	2,89	0,50
50% vidro	5,79	5,79	5,79	0,50
75% vidro	5,79	2,89	8,69	0,50

2.3. Métodos

Os corpos de prova moldados a partir das composições (0, 25, 50 e 75%) foram mantidos à temperatura ambiente por 48 horas, quando foram desmoldados, pesados e submetidos a medidas de diâmetro e altura com um paquímetro digital DIGIMESS-100-170, com precisão de 0,03 mm. As medidas foram repetidas após 7 e 28 dias de cura. Tais medidas foram usadas para determinar a retração volumétrica das argamassas, segundo a equação 1.

$$\%RV = \frac{V_a - V_m}{V_m} \cdot 100 \quad (\text{equação 1})$$

onde V representa os volumes das peças, enquanto os índices “a” e “m” designam respectivamente, amostra e molde.

Um conjunto de dez corpos de prova preparados a partir das composições (0, 25, 50 e 75%) para cada tempo de cura (7 e 28 dias) foi usado nos ensaios de porosidade aparente (PA) pelo método de imersão de Arquimedes. Os corpos de prova foram secos em estufa à 60 °C por 24 horas aferiu-se a massa (m_s), os mesmos foram mantidos em água potável sob a fervura por 2 horas. Após o período de saturação aferiu-se as massas submersas (m_{sub}) e massa úmida (m_u). A porosidade aparente é calculada segundo a equação 2.

$$\%PA = \frac{m_u - m_s}{m_u - m_{sub}} \cdot 100 \quad (\text{equação 2})$$

Onde m representa a massa dos corpos de prova, os índices “u” e “s” estão relacionados respectivamente às amostras úmidas e secas.

Um conjunto de dez corpos de prova preparados a partir das composições (0, 25, 50 e 75%) para cada tempo de cura (7 e 28 dias) foram usados nos ensaios de resistência à compressão axial e compressão diametral de acordo com a norma NBR 13279:2018 utilizando uma máquina de ensaios mecânicos INSTRON 5900R 5584. O ensaio de compressão diametral foi realizado para determinação da resistência à tração de corpos de prova cilíndricos pelo ensaio conhecido como “ensaio brasileiro” conforme a NBR 7222:2011.

Para a aquisição destes resultados, utilizou-se o fator de conversão descritos na equação 3.

$$\sigma_{ti} = 0,9 \cdot \sigma_{cd} \quad (\text{equação 3})$$

Onde σ_{ti} é a tensão em tração indireta e σ_{cd} é a tensão obtida em ensaio de compressão diametral.

O ensaio de absorção de água (AA) por capilaridade foi realizado segundo a NBR9779:1994, deste modo as amostras foram deixadas em estufa, por 24 horas, à temperatura de 110 °C, resfriadas em dessecador até atingir a temperatura ambiente. Os corpos de provas

foram pesados e instalados sob suporte em um recipiente à temperatura ambiente com lâmina de água constante, de modo que houvesse contato do líquido somente com a face inferior do corpo de prova. Aferiu-se a massa dos corpos de prova nos tempos de 3h, 6h, 24h, 48h, 72h de exposição à água. Após a última pesagem os corpos de prova foram rompidos por compressão diametral segundo a NBR7222:2011 para avaliar a distribuição de água interna. O resultado do ensaio é obtido a partir da equação 4.

$$AA = \frac{m_u - m_s}{S_t} \quad (\text{equação 4})$$

Onde m representa a massa dos corpos de prova, os índices “u” e “s” estão relacionados respectivamente às amostras úmidas e secas, enquanto S_t representa a área da seção transversal em contato com água.

Para a caracterização microestrutural das composições foram coletadas amostras dos corpos de prova preparados a partir das composições (0, 25, 50 e 75%) para o tempo de 7 dias, representando de forma reduzida a argamassa desenvolvida e as interações do cimento com os agregados (areia e vidro). Os corpos de prova foram cortados com uma serra de corte com disco diamantado e um fragmento da parte central foi lixado para obtenção de uma peça retangular com dimensões aproximadas de 1cm x 1cm x 1cm. Essas peças foram secas em estufa a 40 °C por 24 horas e analisadas em microscópio eletrônico de varredura (MEV) modelo EVO MA10 da ZEISS.

3. Resultados e Discussão

Neste estudo a argamassa produzida é de uso apenas para o assentamento em alvenaria de vedação, que é indicada para ligação de componentes de vedação (como blocos e tijolos) no assentamento em alvenaria, com função de vedação (NBR 13281:2005). Apesar de representar apenas 2% da composição final da parede de vedação, a argamassa altera consideravelmente o comportamento da alvenaria, principalmente no seu mecanismo de ruptura.

A areia tem enorme importância na qualidade de argamassa, assim, a argamassa produzida substituindo parte da areia por resíduo de vidro deve atender às exigências de uso da mesma maneira que a argamassa produzida somente com areia. A granulometria do agregado pode influenciar na quantidade do aglomerante hidráulico utilizado e na quantidade de água de amassamento, pois quando há deficiências na granulometria ou excesso de finos, ocorre um maior consumo de água de amassamento, alterando as propriedades mecânicas e causando maior retração volumétrica por secagem.

A areia usada neste trabalho apresentou módulo de finura (MF) de 3,3, sendo caracterizada como agregado miúdo de granulometria

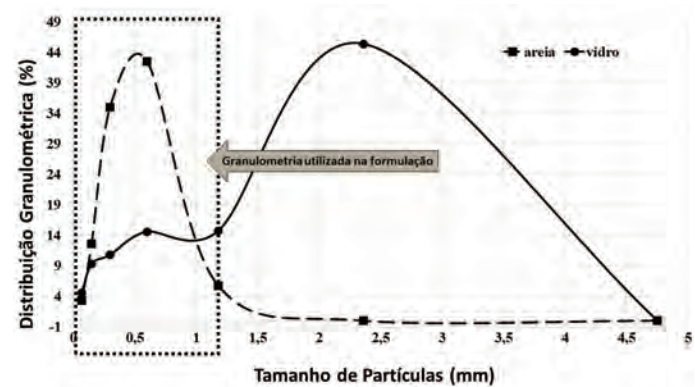


Figura 1 - Distribuição granulométrica dos agregados estudados. O quadro pontilhado indica a faixa de granulometria utilizada para a formulação das argamassas. Fonte: Os autores

média, seguindo a classificação apresentada na NM 248:2003 e diâmetro máximo característico de 1,19 mm. O MF do resíduo de vidro foi de 4,6, sendo classificado como agregado miúdo de granulometria muito grossa, com diâmetro máximo característico do resíduo de vidro de 2,38 mm. Assim, neste estudo foi utilizado apenas a granulometria passante na peneira de número 16 (1,19 mm), Figura 1, para uma melhor adequação dos agregados miúdos dentro da argamassa de assentamento de alvenaria, transformando assim o módulo de finura para 3,5, mais próximo do apresentado pela areia. Dessa forma, o resíduo do vidro utilizado apresenta granulometria próxima a granulometria da areia.

Observa-se que o agregado obtido a partir da moagem de vidro âmbar apresenta distribuição de partículas mais ampla e bimodal quando comparado à areia natural. Esta característica do agregado reciclado favorece o preenchimento de vazios nas peças conformadas.

3.1. Retração volumétrica

A Figura 2 apresenta os resultados de retração volumétrica para as composições (0, 25, 50 e 75%) correspondentes à percentagem de substituição da areia pelo resíduo de vidro, mantendo a relação água/cimento em 0,5, após 7 e 28 dias de cura.

A fissuração causada pela retração é um dos fenômenos que pode comprometer a durabilidade do sistema, sendo que esta retração está diretamente ligada a perda de água dos poros capilares. Devido a isso, a análise da retração volumétrica é de suma importância em argamassas de assentamento, visando o bom funcionamento da estrutura “parede”. Nesse estudo foi verificado que, em geral, a retração volumétrica aumenta com o aumento da substituição, obtendo retração para a composição com 75% de substituição 39% maior em comparação à referência (sem substituição por resíduo de vidro)

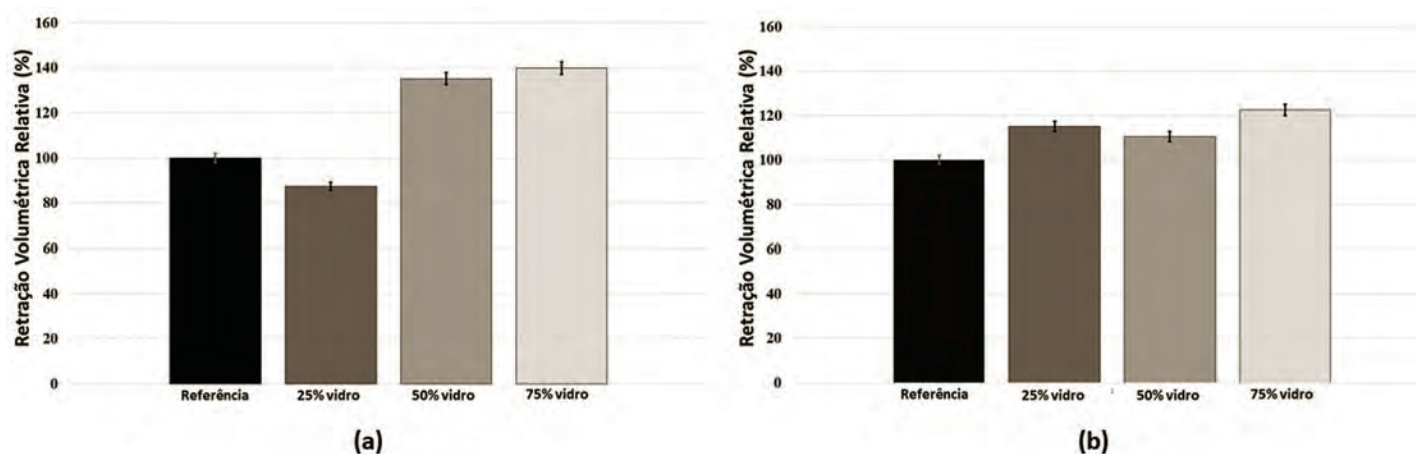


Figura 2 - Retração volumétrica para as composições (0, 25, 50 e 75%) correspondentes à porcentagem de substituição da areia pelo resíduo de vidro, mantendo a relação água/cimento em 0,5, após (a) 7 e (b) 28 dias de cura. Fonte: Os autores

aos 7 dias, quando o processo de hidratação do aglomerante não está concluído. Já aos 28 dias para esta composição (75%), a retração volumétrica é menor sendo encontrado valor 22% superior quando comparado às amostras referência, podendo estar ligado a perda de água por exsudação durante o processo de cura e ao rearranjo dos produtos das reações de hidratação do aglomerante. O mesmo foi encontrado por (PENACHO; BRITO; VEIGA, 2012) sendo obtidos superior retração volumétrica para argamassas produzidas com valores superiores a 50% de substituição da areia pelo resíduo de vidro, chegando a aumento de 19% em relação a referência.

3.2. POROSIDADE APARENTE

A Figura 3 apresenta os resultados de porosidade aparente para as composições (0, 25, 50 e 75%) correspondentes à porcentagem

de substituição da areia pelo resíduo de vidro, mantendo a relação água/cimento em 0,5, após 7 e 28 dias de cura.

A porosidade influencia diretamente a resistência mecânica, permeabilidade a líquidos e durabilidade da argamassa. Se a porosidade for alta e interconectada, esses poros contribuem para o fluxo de fluidos, aumentando, assim, a permeabilidade do material e diminuindo sua resistência e durabilidade.

Neste trabalho foi verificado que a distribuição granulométrica do agregado de vidro influencia na porosidade residual do material curado, onde pode-se observar que nas amostras com substituição de 25% do agregado natural por vidro ocorreu aumento significativo na porosidade do material aos 7 dias de cura atingindo 289% de aumento na porosidade, porém aos 28 dias este valor decaiu atingindo 10% de aumento na porosidade quando comparados às amostras de

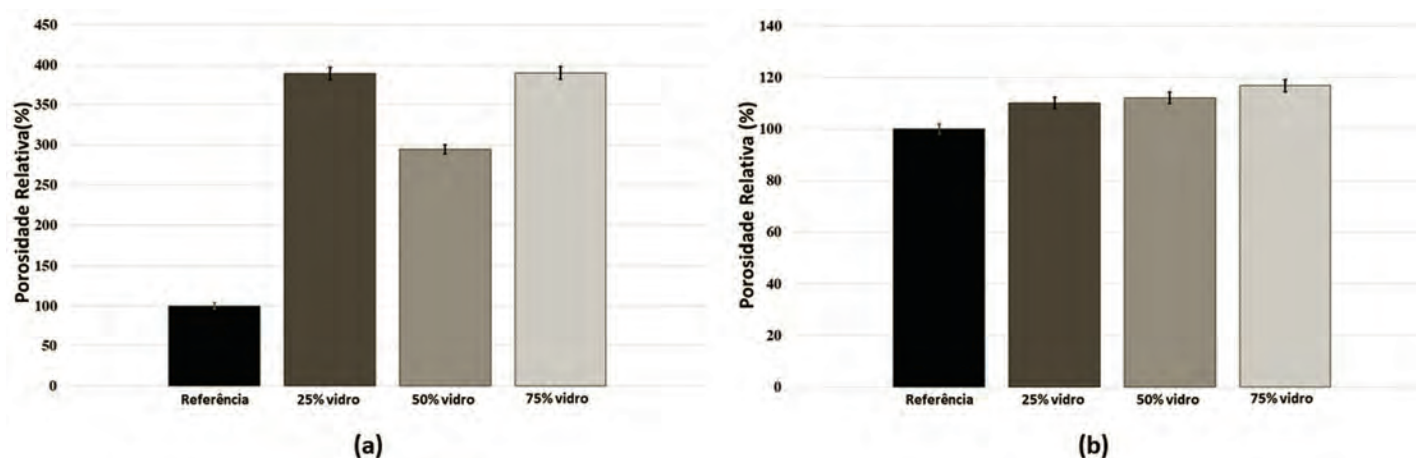


Figura 3 - Porosidade aparente para as composições (0, 25, 50 e 75%) correspondentes à porcentagem de substituição da areia pelo resíduo de vidro, mantendo a relação água/cimento em 0,5, após (a) 7 e (b) 28 dias de cura. Fonte: Os autores

referência. Comportamento similar foi encontrado para as amostras com substituição de 75% do agregado, que aos 7 dias de cura apresentou 289% de aumento e aos 28 dias observou-se o decaimento para 17%. Já nas amostras as quais a substituição foi de 50%, observou-se 195% de aumento na porosidade aos 7 dias e 12,1% aos 28 dias de cura.

Este comportamento pode ser explicado pela distribuição de tamanho de partículas na mistura de agregados. Com a substituição de 25% do agregado natural por agregado de vidro moído há maior quantidade de partículas com tamanhos médios de 0,5 mm, sendo este o tamanho aproximado de 44% das partículas de areia, visto sua distribuição monomodal. Este fato dificulta o empacotamento destas partículas ao serem moldadas. Similarmente, ao haver a substituição de 75% do agregado, existe na mistura de agregados uma distribuição mais ampla de tamanho de partículas, sendo esta rica em partículas finas que do mesmo modo dificultam o empacotamento durante a moldagem. Já nas amostras com substituição de 50% do agregado, obtém-se maior regularidade na quantidade de partículas refinadas e grosseiras, o que implica em um melhor empacotamento durante a moldagem, resultando em menores porosidades residuais.

3.3. RESISTÊNCIA MECÂNICA

Os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão axial para as composições (0, 25, 50 e 75%) correspondentes à percentagem de substituição da areia pelo resíduo de vidro, mantendo a relação água/cimento em 0,5, após 7 e 28 dias de cura são apresentados na Figura 4.

Os resultados obtidos para as amostras com 25% de substituição do agregado são promissores, visto que mesmo que haja uma redução

de 2% da resistência à compressão aos 7 dias de cura, explicado pelo alto índice de vazios verificado pelo ensaio de porosidade aparente, ao atingir 28 dias de cura, esta formulação apresentou 20% de acréscimo em sua resistência à compressão quando comparado à referência.

Mesmo que a porosidade aparente apresentada nas amostras com a substituição de 25% de agregado por vidro moído tenha sido superior à apresentada pelas amostras de referência, a presença do partículas de vidro tiveram fator importante para a melhoria das propriedades mecânicas, visto que a existência da sílica provê características pozolânicas a este agregado o que leva a uma melhor adesão interfacial entre os agregados e o aglomerante hidráulico.

Porém existe um limite de concentração destes compostos, visto que estes, em grande quantidade podem reagir em meio alcalino resultando na fase etringita, que inicialmente é formada em forma de gel, que provê separação entre as partículas e prejudica a adesividade interfacial do compósito. Este efeito começa a ser observado nas amostras com substituição de 50% e 75%, o que acarreta na queda da resistência mecânica aos 28 dias e aumento da porosidade aparente destes materiais. Após a formação da etringita em forma de gel, esta perde sua água para a hidratação do aglomerante apresentando-se em forma de um cristal acicular disperso no interior da amostra.

Apesar destas divergências nos resultados encontrados, os mesmos se encontram dentro do preconizado pela NBR 13281:2005, no que compete a resistência à compressão axial.

Aumentos na resistência à compressão axial também foram verificados em estudos correlatos com substituições de até 25% (Oliveira *et al*, 2012, Koller *et al*, 2007, López *et al*, 2005, Lunas *et al*, 2016). De acordo com López *et al* (2005), este aumento pode estar relaciona-

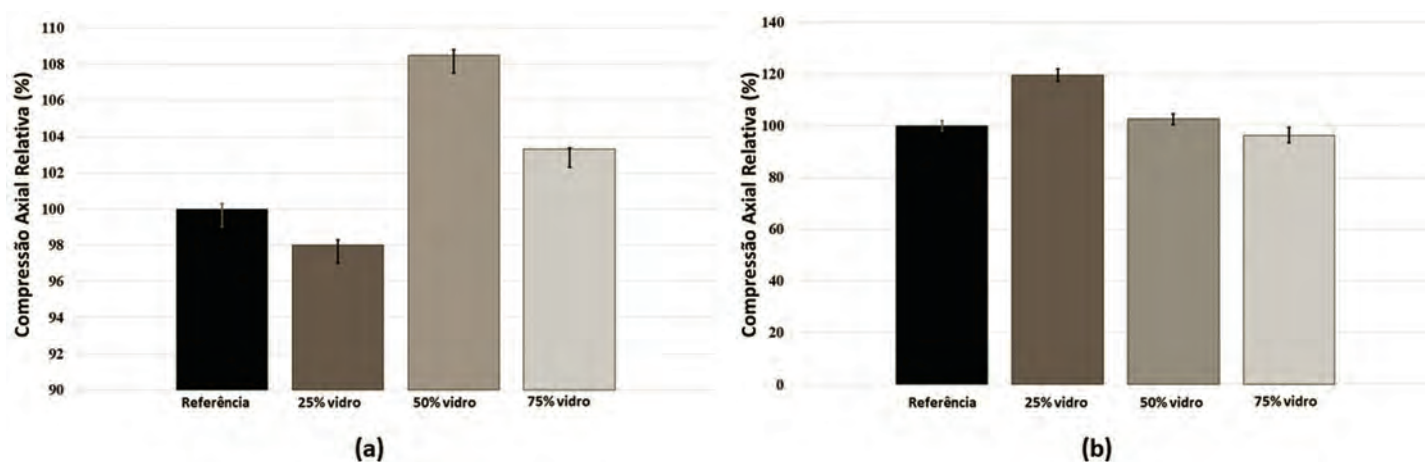


Figura 4 - Resistência à compressão para as composições (0, 25, 50 e 75%) correspondentes à percentagem de substituição da areia pelo resíduo de vidro, mantendo a relação água/cimento em 0,5, após 7 e 28 dias de cura. Fonte: Os autores

do à ação pozolânica do vidro disperso na matriz cimentícia. Ainda, devido aos finos de vidro encontrados na distribuição granulométrica poderem ocupar espaço entre o agregado miúdo natural (areia) e o aglomerante hidráulico, tornando o material mais resistente à compressão. Para os autores Shao *et al* (2000) existe uma interação química maior entre o vidro e o cimento, do que a areia, o que resulta num aumento da resistência à compressão. Lunas *et al* (2016) e Penacho *et al* (2012) também encontrou resultados promissores nas substituições de 50% concluindo que houve aderência suficiente do vidro, não enfraquecendo a zona de transição na interface da pasta de cimento com o agregado miúdo e devido a um possível potencial pozolânico.

Os resultados de resistência à compressão diametral (tração indireta) para as composições (0, 25, 50 e 75%) correspondentes à percentagem de substituição da areia pelo resíduo de vidro, mantendo a relação água/cimento em 0,5, após 7 e 28 dias de cura são apresentados na Figura 5. Observa-se, que para todas as composições após 7 dias de cura houve redução na propriedade quando comparado à referência, porém ao atingir 28 dias de cura, as amostras com 25% de substituição apresentaram resistência 7% superior à referência enquanto que as amostras com 50% de substituição apresentaram redução da mesma ordem. Estes comportamentos podem ser explicados pela ação pozolânica do agregado de vidro nas amostras com 25% de substituição e nas amostras com substituição acima de 50% a redução na propriedade pode ser explicada pela existência da reação álcali-silica devido à abundância de sílica ativa disponível no composto. Isto corrobora com o resultado encontrado para as amostras com substituição de 75% do agregado, que sofreram redução relativa de 20% nesta propriedade.

Esta diminuição na resistência a tração encontrada neste estudo, está preconizado pela NBR 13281:2005 a qual trata da resistência à

tração na flexão. Baseando-se nos trabalhos de Farias *et al* (2019) e Balbo (2013) é possível utilizar essa norma uma vez que a principal diferença entre a tração por compressão diametral (tração indireta) e a tração na flexão está na reprodução do estado de tensões reais nos casos de estruturas solicitadas à flexão, no entanto, essa diferença produz no ensaio de tração indireta valores abaixo dos encontrados no ensaio de tração por flexão.

3.4. ABSORÇÃO DE ÁGUA

Os resultados dos ensaios de absorção de água por capilaridade, Figura 6, identificaram que as amostras após 7 dias de cura apresentaram maior absorção de água, valores superiores a 200%, quando comparado às amostras de referência, porém, após passados os 28 dias de cura, as amostras apresentaram redução significativa nesta absorção, sendo ainda superior às apresentadas pelas amostras de referência da ordem de 16%, 17% e 11% respectivamente para as substituições de 25%, 50% e 75%.

O aumento na taxa de absorção de água nas amostras era esperado, visto que a porosidade aparente avaliada é superior à referência, por outro lado o comportamento apresentado não se mostrou diretamente proporcional à porosidade. Para as amostras com substituição de 25% e 50% o aumento da porosidade implicou no aumento da absorção de água, porém para as amostras onde foram substituídos 75% de agregado a absorção de água mostrou-se menor, mesmo sendo essa a formulação com maior quantidade de poros aparentes. Isto pode ser explicado pela característica do agregado de vidro, que por possuir larga distribuição granulométrica pode promover no material poros interconectados com menores diâmetros levando à saturação dos poros não permitindo a permeação de água para o interior da peça.

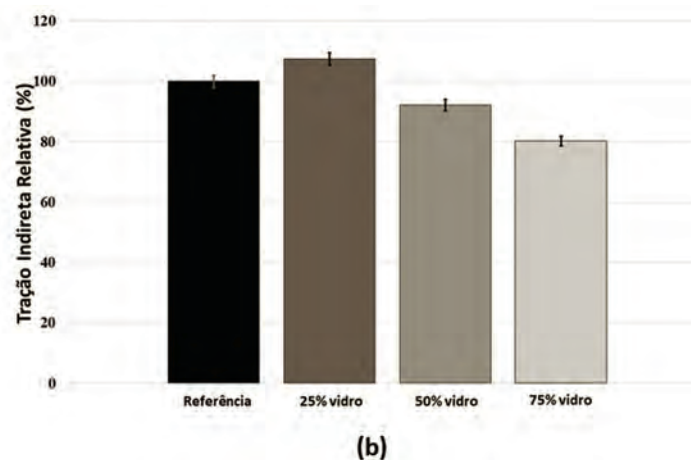
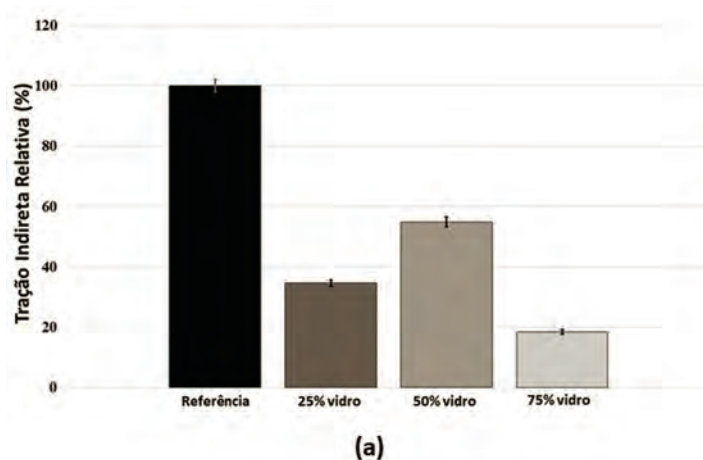


Figura 5 - Resistência à compressão diametral para as composições (0, 25, 50 e 75) correspondentes à percentagem de substituição da areia pelo resíduo de vidro, mantendo a relação água/cimento em 0,5, após 7 e 28 dias de cura. Fonte: Os autores

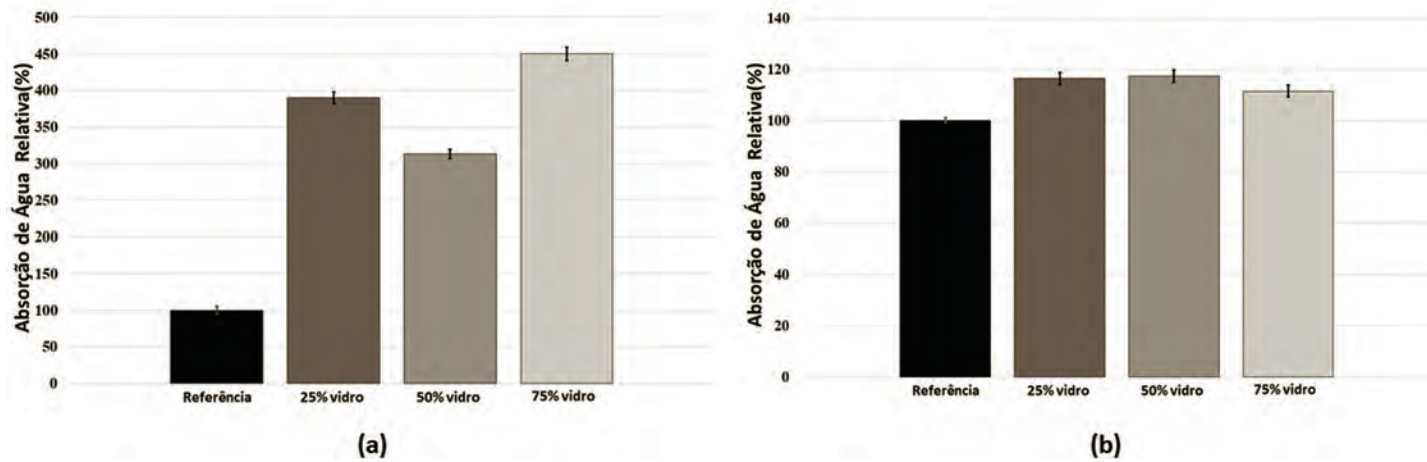


Figura 6 - Absorção de água por capilaridade para as composições (0, 25, 50 e 75%) correspondentes à porcentagem de substituição da areia pelo resíduo de vidro, mantendo a relação água/cimento em 0,5, após (a) 7 e (b) 28 dias de cura. Fonte: Os autores

3.5. AVALIAÇÃO MICROESTRUTURAL

A observação quanto à microestrutura da argamassa permite avaliar as interações entre o aglomerante hidráulico e os agregados miúdos e a influência sobre as suas propriedades mecânicas, porosidade e durabilidade. Podem ser identificadas diferentes fases relacionadas ao aglomerante hidráulico como silicato de cálcio hidratado (C-S-H) que constitui de 50% a 60% do volume de sólidos de uma pasta de cimento Portland completamente hidratado, e apresenta morfologia variando de fibras pouco cristalinas a um reticulado cristalino, hidróxido de cálcio, chamado de portlandita, que constitui de 20% a 25% do volume de sólidos na pasta hidratada, com morfologia em formato de cristais grandes, com forma de prismas hexagonais, além do sulfoaluminato de cálcio que ocupa de 15% a 20% do volume de sólidos na pasta endurecida. Podem ainda ser encontrados grãos de clínquer não hidratado, mesmo após longo período de hidratação (SILVA, 2002; POLITO, 2010).

A zona de transição que corresponde a região de contato entre o aglomerante hidráulico e os agregados miúdos, é a região mais frágil presente na microestrutura das argamassas, devido à alta porosidade, composta de poros relativamente grandes e, muitas vezes, contendo grandes cristais de hidróxido de cálcio.

A microestrutura nesta região apresenta maior quantidade de cristais de hidróxido de cálcio e de etringita primária, produto normal da hidratação inicial do cimento, um composto químico mineral de sulfato de cálcio e alumínio hidratado que cristaliza no sistema trigonal (SILVA, 2002; POLITO, 2010; VIEIRA, 2010).

As micrografias (MEV) obtidas para as composições de 25, 50 e 75% de substituição da areia pelo resíduo de vidro, mantendo a relação água/cimento em 0,5, após 28 dias de cura são apresentados na Figura 7.

Para a composição sem adição de resíduo de vidro (referência) pode-se observar a interação das partículas de areia com a pasta de cimento endurecida, verificando que a areia apresenta uma superfície mais rugosa que o resíduo de vidro, o que permite uma melhor ligação do aglomerante hidráulico com a superfície do agregado.

De acordo com a literatura, isso aumenta a camada de pasta de cimento que envolve as partículas de areia, o que contribui para o aumento da compactação na zona de transição (SILVA, 2002; POLITO, 2010).

Nas composições com substituição de 25% de areia por resíduo de vidro, pode-se observar a interação do aglomerante hidráulico com as partículas de agregado e a presença de pequenos poros, não foi possível identificar a presença de cristais etringita o que corrobora com o acréscimo na resistência mecânica desta formulação.

Os vazios observados na interface agregado/matriz cimentícia pode ser atribuído ao fato do agregado vítreo se apresentar menos rugoso, e, portanto, com uma menor zona de penetração da pasta de cimento no agregado miúdo (SILVA, 2002; POLITO, 2010). Nas composições com maiores teores de substituição (50% e 75%) observa-se um aumento de etringita ao redor do resíduo de vidro. Nas amostras com 50% de substituição esta fase danosa às propriedades mecânicas se forma no interior da massa cimentícia, onde inicia-se a formação da etringita, devido à alta alcalinidade da matriz. A presença desta fase no aglomerando é menos efetiva no empobrecimento da adesão entre agregado e matriz o que resulta em redução dos danos às propriedades mecânicas. Esta fase é resultado da reação álcali-silica que é ativada pela maior disponibilidade de água no interior da argamassa que provê a maior mobilidade dos íons hidroxila favorecendo estas reações. Já nas amostras com 75% de substituição do agregado natural, esta fase pode ser observada na superfície do

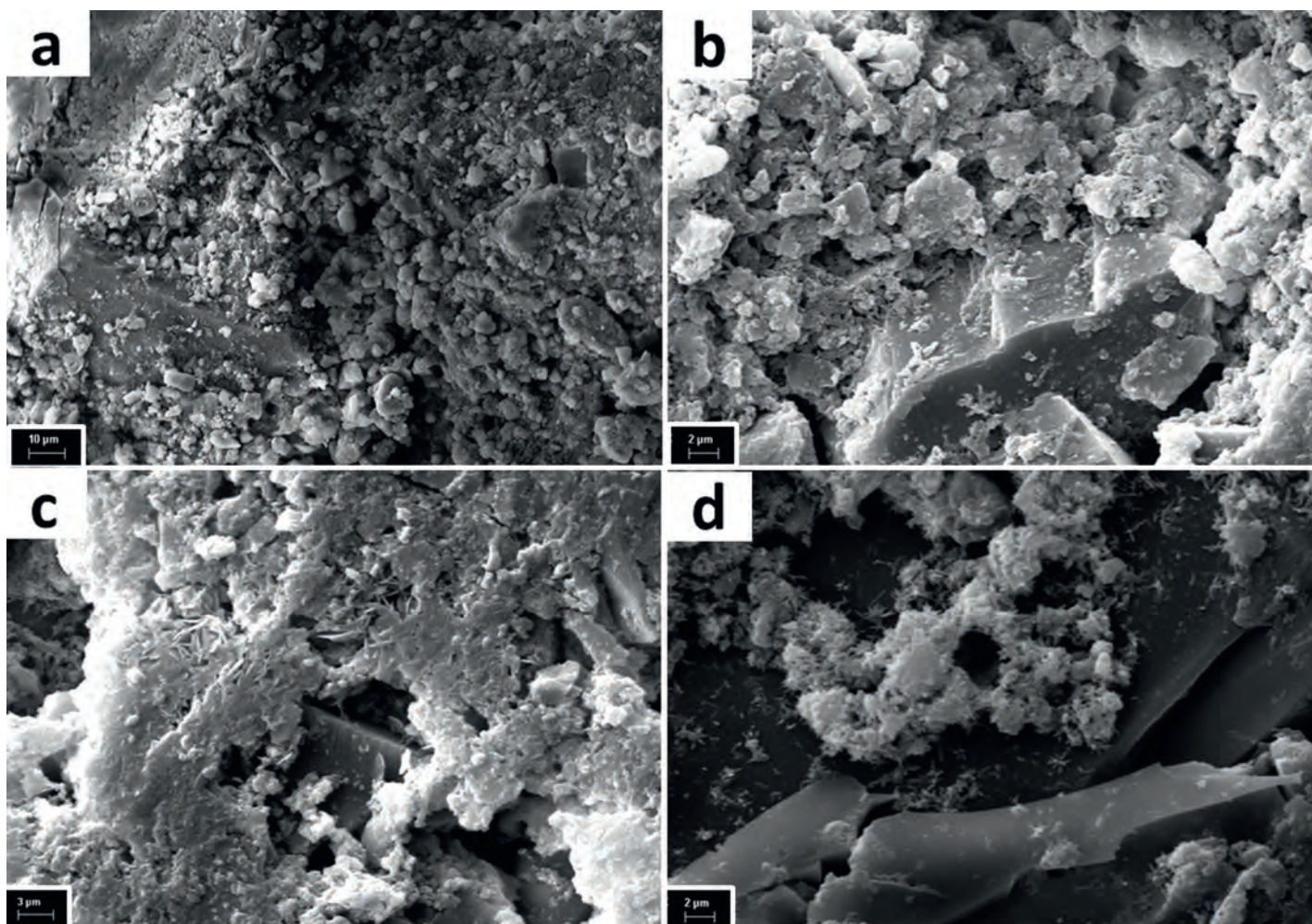


Figura 7 - Micrografias eletrônica de varredura para as composições substituição da areia pelo resíduo de vidro, mantendo a relação água/cimento em 0,5, após 28 dias de cura. (a) referência (b) 25%, (c) 50%, (d) 75%. Fonte: Os autores

agregado, sendo isto resultado do progresso da reação álcali-sílica.

Esta progressão é explicada devido a abundância de sílica disponível para a ativação destas reações, visto que este óxido é o limitante das reações formadoras da etringita.

A reação álcalis-agregado que causa preocupação quando se trata da utilização de novos agregados miúdos na produção de argamassas e concretos, mostrou-se não ser um problema na produção de argamassas com substituição da areia pelo resíduo de vidro moído, desde que se controle a formulação de substituição e a granulometria do agregado, que quando se utiliza granulometrias próximas a da areia, não compromete à referida reação (PENACHO; BRITO; VEIGA, 2012).

Além disso, a substituição dos agregados naturais por agregados com superfície de contato menos rugosa apresenta maior dificul-

dade em formar argamassas coesas, devido a uma menor zona de penetração da pasta de cimento para o interior do agregado miúdo, o que diminui a aderência desta pasta na zona de transição (SILVA, 2002; POLITO, 2010).

A utilização do resíduo de vidro como agregado miúdo, apesar de sua textura e superfície ser distinta ao da areia, também não apresentou alteração no comportamento interfacial com cimento Portland, havendo aderência suficiente entre o resíduo de vidro e a pasta de cimento Portland, não produzindo enfraquecimento na interface “cimento/agregado” (LUNAS; SILVA; QUEIROZ, 2016).

A Figura 8, mostra em detalhe os cristais de etringita formados na superfície do agregado vítreo para a substituição de 75%.

Como reportado na literatura os cristais de etringita têm formato aci-

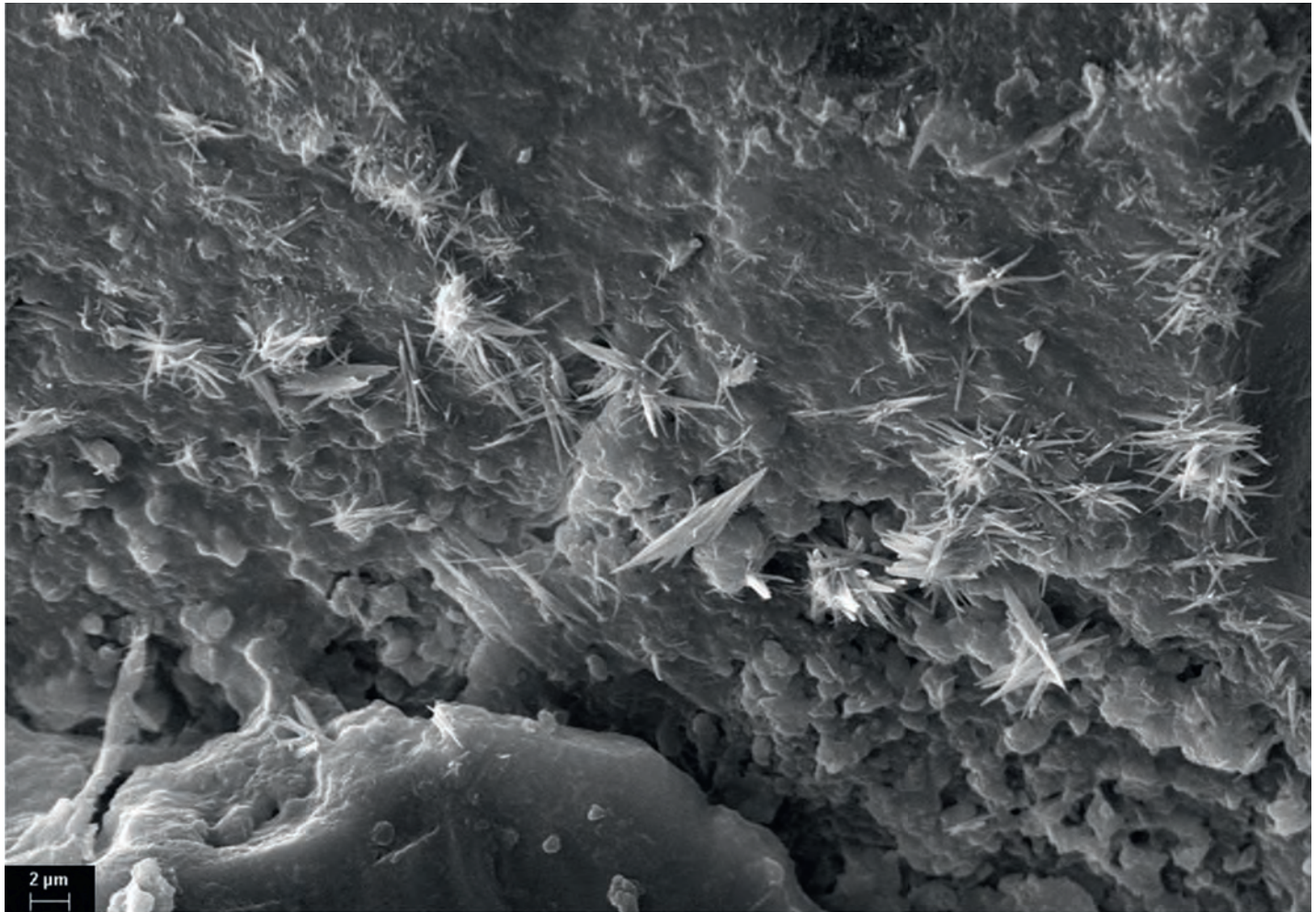


Figura 8 - Micrografias eletrônica de varredura com detalhe dos cristais de etringita formados como resultado da reação álcali-silica para substituições de 75% de agregado. Fonte: Os autores

culares com estrutura trigonal com crescimento preferencial perpendicular ao substrato. (POLITO, 2010).

4. Conclusão

Em se tratando de economia de material natural e valorização da utilização de resíduos no setor da construção civil, os resultados deste trabalho mostram a viabilidade da utilização de 25% de resíduo em relação à massa de areia, para a produção de argamassas de assentamento de alvenaria de vedação.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem o suporte financeiro da empresa Villa Engenharia.

6. Referências

ANEPAC. Associação Nacional das Entidades de Produtores de Agregados para Construção, 2019. Disponível em: < <https://www.anepac.org.br/>>. Acesso em: 26 abril 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, p. 9. 2018

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13281: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Requisitos. Rio de Janeiro, p. 7. 2005

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16541: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Requisitos.

massa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura para a realização de ensaios. Rio de Janeiro, p. 2. 2016

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16697: Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, p. 12. 2018

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7222: Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, p. 5. 2011

BALBO, J.T. Relações entre resistências à tração indireta e à tração na flexão em concretos secos e plásticos. **Revista Ibracon de estruturas e materiais**, v.6, n.6, p.854 - 874, 2013.

BRASILEIRO, L.L.; MATOS, J.M.E. Revisão bibliográfica: reutilização de resíduos da construção e demolição na indústria da construção civil. **Cerâmica**, v.1, n. 61, p.178 - 189, 2015.

FARIAS, L.A et al. Ensaio de Tração Direta em Corpos de Prova de Concreto, Disponível em: < <http://www.mfap.com.br/pesquisa/arquivos/20081127104112-209.pdf>. >. Acesso em: 19 outubro 2019.

KOLLER, D.R.P. et al. Avaliação da resistência a compressão de argamassas produzidas com vidro moído. **Disc. Scientia. Série: Ciências Naturais e Tecnológicas**, v.8, n. 1, p.17- 23, 2007.

LÓPEZ, D.A.R. et al. Avaliação das propriedades físicas e mecânicas de concretos produzidos com vidro cominuído como agregado fino. **Cerâmica**, v.1, n. 51, p.318 - 324, 2005.

LUNAS, F.R.; SILVA, J.C.G.; QUEIROZ, T.L.M. Síntese e Análise da Resistência Mecânica da Incorporação de Vidro Moído em Argamassa. **Fórum ambiental da alta paulista**, v.12, n. 2, p.132 - 144, 2016.

OLIVEIRA, M.C.R. et al. Argamassa produzida com resíduo de vidro substituindo o agregado miúdo. **Congresso Norte Nordeste de Pes-**

quisa e Inovação, 2012. **Anais...**, Palmas: [s.n.], 2012. p. 1-7.

PENACHO, P.; BRITO, J.; VEIGA, M.R. Desempenho de argamassas com incorporação de agregados finos de vidro – reciclagem de agregados. Congresso Construção, 2012. **Anais...**, Coimbra: [s.n.], 2012. p. 1-13.

POLITO, G; JUNIOR, A; BRANDÃO, P. Caracterização microestrutural da interface argamassa mista/Bloco cerâmico. **Revista Construindo**, v.2, p.11 - 17, 2010.

POLLER, B.C.; CRAMER, S.M.; DE LA CRUZ, R.V. Potential For Using Waste Glass In Portland Cement Concrete. **J. Mater. Civ. Eng.**, v.1, n. 10, p.210 - 219, 1998.


SANTOS, W.J. Caracterização de vidros planos transparentes comerciais. **Scientia Plena**, v.5, n.2, p.1 - 5, 2009.

SHAO, Y. et al. Studies on concrete containing ground waste glass. **Cement and Concrete Research**, v.1, n. 30, p.91 - 100, 2000.

SILVA, R.R.; VIOLIN, R.Y.T. Gestão da água em canteiros de obras de construção civil. Encontro Internacional de Produção Científica Cesumar, 2013. **Anais Eletrônico**, Paraná: [s.n.], 2013. p. 1-9.

SILVA, V; LIBORIO, J. Estudo da microestrutura da interface argamassa/substrato de concreto através da microscopia eletrônica de varredura (MEV). **Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**, 2002. p. 101-107.

TEIXEIRA, L.P.; CARVALHO, F.M.A. A construção civil como instrumento do desenvolvimento da economia brasileira. **Revista Paranaense de desenvolvimento**, v.1, n. 109, p.9 - 26, 2005.

VIEIRA, S. R. S. Interface de Agregado Comum com Pasta Hidratada de Cimento Concreto Usual Sem Adições. 2010. Disponível em: < <http://aquarius.ime.eb.br/>>. Acesso em: 26 dezembro 2019. 



CTCV
O Parceiro Tecnológico de Confiança das empresas do Setor Cerâmico

Inovação • Investigação e Desenvolvimento Tecnológico • Consultoria Especializada
• Conformidade Legal • Engenharia • Medição e Ensaio • Formação Profissional