

Análise da influência da incorporação parcial de resíduos de placas cerâmicas com aditivo cristalizante em argamassas

Maria Eduarda Gonçalves Silveira ¹, Rafael de Paula Gurkewicz ^{1,2,3*}, Jorge Henrique Piva ^{1,2}, Aline Eying Savi ^{1,2}, Elaine Guglielmi Pavei Antunes ^{1,2}

¹ Curso de Engenharia Civil, Universidade do Extremo Sul Catarinense, Av Universitária 1105, Criciúma, 88806-000, Santa Catarina

² Grupo de Pesquisa em Desempenho de Estruturas e Construção Civil, Universidade do Extremo Sul Catarinense, Av Universitária 1105, Criciúma, 88806-000, Santa Catarina

³ Programa de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais, Universidade do Extremo Sul Catarinense, Av Universitária 1105, Criciúma, 88806-000, Santa Catarina

*e-mail: rafaelpgurkewicz@unesoc.net

Resumo

A região sul catarinense é reconhecida mundialmente como polo cerâmico, e como toda indústria, é grande geradora de resíduos. A construção civil também afeta o meio ambiente, em função da atividade de mineração e o enorme consumo de recursos naturais. Para diminuir o impacto ambiental, uma alternativa é inserir os resíduos de placas cerâmicas (RPC) na construção civil. No entanto o RPC possui uma alta absorção de água, prejudicando o desempenho das argamassas. Mas é possível amenizar a absorção de água com o uso de aditivos cristalizantes. Desse modo, o presente artigo tem objetivo de analisar as propriedades físico-mecânicas das argamassas, com substituição parcial da areia por RPC tratado com aditivo cristalizante. Para isso, foi elaborado um traço de referência e quatro traços com tratamentos distintos. O tratamento consiste na pré-molhagem do RPC em soluções com porcentagens diferentes de aditivo + água, deixando-os em tratamento durante 6 e 24 h. É possível verificar que a porosidade do RPC influenciou nos resultados obtidos. O traço com maior tempo de tratamento e com aditivo em sua composição mostrou melhores resultados em comparação aos demais traços, confirmando o tratamento com aditivo cristalizante. As propriedades mecânicas da argamassa tiveram resultados adequados.

Palavras-chave: Sustentabilidade; resíduo; placa cerâmica; construção civil; saturação.

1. INTRODUÇÃO:

De acordo com a Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica para Revestimentos, Louças Sanitárias e Congêneres, ANFACER [1], o Brasil é o terceiro maior produtor de revestimentos cerâmicos, perdendo somente para a Índia e a China, com uma produção no ano de 2022 de 927 milhões de m², e o segundo maior colocado no ranking de consumo.

As placas cerâmicas mais usuais no mercado brasileiro são as do tipo BIIIb [2], que pertencem ao grupo II, classificadas como placas de média absorção de água, entre 6 e 10%, segundo a ABNT NBR ISO 13006:2020 [3]. Nesse aspecto, cabe mencionar que a absorção de água das placas cerâmicas influencia diretamente nas suas propriedades mecânicas, pois quanto maior absorção de água, maior a porosidade e menor será sua resistência mecânica [4].

O Centro Cerâmico do Brasil, CCB [5], relata que aproximadamente 10% da produção total das placas cerâmicas são consideradas não conformes e, dessa forma, essas placas acabam se tornando resíduos sólidos. O resíduo sólido de placa cerâmica é classificado como resíduo industrial e conforme a Lei 12305:2010 [6] são os resíduos “gerados nos processos produtivos e instalações industriais”. A produção de resíduos industriais gera um forte impacto ambiental, tornando-se necessária a reutilização destes de maneira sustentável. Segundo o Relatório Brundtland “o desenvolvimento sustentável é aquele que atende às necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de atenderem as suas próprias necessidades” [7].

Além das indústrias ceramistas serem grandes agentes geradores de resíduos, a construção civil também afeta o meio ambiente, em função da atividade de mineração e o enorme consumo de recursos naturais. Estima-se que de toda a matéria prima produzida no mundo, de 40 a 75% é consumida pelo setor da construção [8]. No ano de 2016 a produção brasileira de agregado miúdo para a construção civil foi de 312 milhões de toneladas, sendo na confecção das argamassas o maior emprego [9]. Em 2019 a produção de agregados no Brasil foi de 740 milhões de toneladas com um consumo per capita de 2,5 t, com média mundial de 6 t/hab/ano [10]. De acordo com Agopyan e John [11] os materiais mais utilizados pela indústria da construção civil são o cimento Portland, juntamente com a água e com os agregados, para a fabricação de concretos e argamassas.

A prática sustentável na construção está presente há dois milênios, e nas ruínas romanas de Conímbriga e Troia, em Portugal, foi observada a utilização de resíduos cerâmicos na composição das argamassas e concretos. Após a moagem dos resíduos eles eram aplicados como agregados miúdos e os de maior granulometria como agregados graúdos [4]. Seguindo essa prática, para diminuir o impacto ambiental, uma alternativa é usar os resíduos de placas cerâmicas (RPC) na construção civil. Segundo Ledesma et al. [12] as argamassas podem conter até 50% de agregado natural substituído por agregado reciclado. Carasek et al. [13] e Torres et al. [14] verificaram que os agregados reciclados possuem alta absorção de água, podendo variar entre 10 e 15% [15], característica que limita o uso da argamassa com RPC, pois aumenta a relação água/cimento diminuindo a resistência mecânica, tornando necessário o tratamento dos resíduos. Todavia, com novas tecnologias e produtos inovadores busca-se solucionar tais efeitos desses resíduos, podendo-se citar os aditivos incorporados nas misturas de argamassas e concretos.

O uso de aditivos como forma de melhorar as características das pastas cimentícias vem sendo cada vez mais empregado. A ABNT NBR 11768-1:2019 [16] define o aditivo como um produto que, quando adicionado ao concreto em porcentagem definida, altera suas propriedades. Ferreira [17] e Azarsaf [18] concluem que o aditivo cristalizante, por ser um material hidrofílico, facilmente absorve líquidos, formando cristais por reações químicas, e assim, há um aumento da densidade do silicato de cálcio hidratado (C-S-H), principal componente da hidratação do cimento. Conforme os autores, preenche os poros, bloqueando a umidade e, assim, tornam-se menos permeáveis. Esse processo em que estrutura cristalina fecha ou reduz os poros é denominado ‘self-healing’, ou capacidade de autocura [19]. Em relação à argamassa comum pode haver uma diminuição da absorção de água de até 80% em idades superiores [20], uma vez que o aditivo cristalizante é autocurante e seu processo de cristalização dá-se no decorrer do tempo gradativamente [17].

Desta forma, o presente artigo tem como objetivo analisar as características físico-mecânicas das argamassas com substituição de 20% do agregado natural por agregado reciclado de placas cerâmicas (RPC) tratados com aditivo cristalizante, anteriormente ao processo de mistura, em diferentes processos de saturação.

2. MATERIAIS E MÉTODOS:

Com intuito de avaliar o desempenho das argamassas com substituição parcial do agregado miúdo natural (areia) por agregado reciclado de placas cerâmicas (RPC), foi necessário primeiramente caracterizá-los e realizar diferentes tratamentos do RPC quanto a sua absorção de água para inseri-los na argamassa. Em seguida, verificou-se o comportamento mecânico das argamassas com RPC tratado. As etapas do estudo estão descritas no fluxograma da Fig.1.

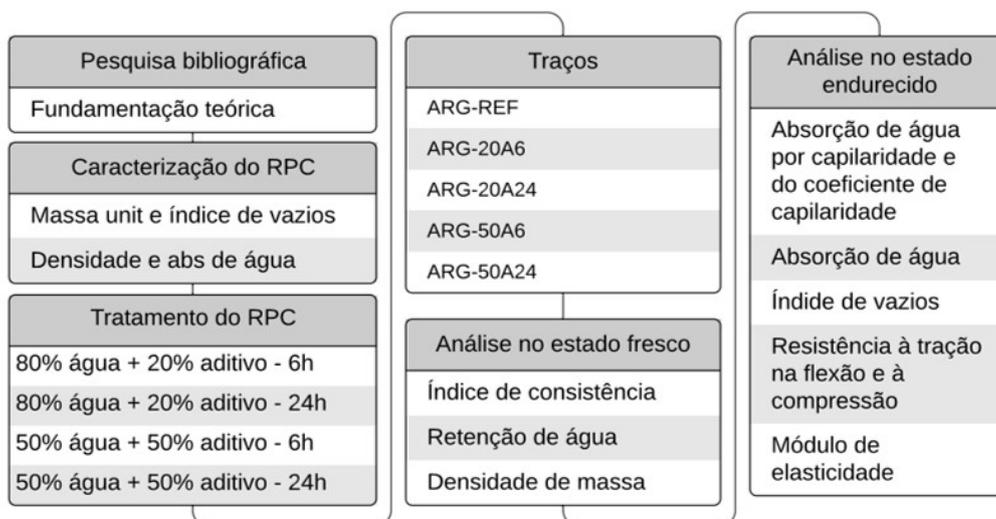


Figura 1. Etapas do estudo

A ABNT NBR 15116:2021 [21] recomenda a pré-molhagem dos agregados miúdos reciclados antes de inseri-los na mistura, para o ajuste das suas propriedades e diminuição da absorção de água. Conforme a ABNT NBR 16916:2021 [22], o resíduo utilizado tem uma absorção de água de 6,91%, pois foi obtido de placas do tipo BIIb. Sendo assim, foram feitos dois tratamentos para a absorção de água nos traços com incorporação do RPC. Para um método de tratamento, foi feita a pré-molhagem com uma solução líquida com 80% de água e 20% de aditivo cristalizante, e para o outro tratamento, com 50% de água e 50% de aditivo cristalizante. A pré-molhagem para as duas metodologias teve duração de 6 e 24 h de tratamento. A nomenclatura, dosagens e métodos de saturação podem ser vistas na Tab.1.

Tabela 1. Especificações das misturas

Nome	Tipo de tratamento	Tempo de tratamento	Tipo de mistura	Traço em massa (cimento: cal: areia: resíduo: a/c)
ARG-REF	-	-	100% areia	1: 0,25: 5,5: 0: 0,88
ARG-20A6	80% água + 20% AC	6 h	80% areia + 20% resíduo	1: 0,25: 4,4: 1,1: 0,88
ARG-20A24	80% água + 20% AC	24 h		
ARG-50A6	50% água + 50% AC	6 h		
ARG-50A24	50% água + 50% AC	24 h		

AC= aditivo cristalizante

Para as dosagens das misturas, foi utilizado cimento CPIV-32, cal hidratada CH-III, areia média (com finura de 1,85 mm), resíduo de placa cerâmica do tipo BIIb, originário de uma fábrica da região sul catarinense e aditivo cristalizante líquido. O aditivo líquido aplicado no estudo, de acordo com o fabricante, é capaz de bloquear a umidade e impedir a absorção de água, pela ação de silicatos ativos que entram em contato com o cimento formando cristais. A Tab.2 contém as características do aditivo.

Tabela 2. Característica do aditivo cristalizante líquido (Bautech Brasil)

Densidade	1200 kg/m ³
Dosagem	200 ml para cada 50 kg de cimento ou 1,2 L para cada m ³
Aparência	Líquido amarelo
pH	11
Viscosidade (Ford 4 a 25 °C)	12 s

A composição do agregado miúdo reciclado deve atender à ABNT NBR 15116:2021 [21] e sua granulometria, preferencialmente deve estar dentro das zonas definidas pela ABNT NBR 7211:2019 [23]. Portanto, após a coleta das placas não conformes e processo de moagem em moinho de bolas (Furlan MM Manchester), com trituração manual anterior à moagem, os resíduos foram peneirados até obter a porcentagem passante na peneira metálica com abertura de malha de 4,8 mm e retida na peneira metálica com abertura de malha 2,4 mm [21]. Para tal, seguiu-se os procedimentos de peneiramento da ABNT NBR 17054:2022 [24].

Para a caracterização do agregado reciclado foi realizado o ensaio de densidade e de absorção de água seguindo os critérios da ABNT NBR 16916:2021 [22], e da ABNT NBR 16972:2021 [25] para definição da massa unitária e do índice de vazios.

Em seguida, para o estudo, foram realizadas cinco misturas, uma de referência, sem substituição do agregado miúdo natural, com traço 1: 0,25: 5,5, (cimento: cal: areia), e as demais com substituição de 20% da areia por RPC com distintos tratamentos quanto à absorção de água. Pelo ensaio de índice de consistência regido pela ABNT NBR 13276:2016 [26], a relação água/cimento (a/c) foi fixada em 0,88 para todos os traços.

Para o preparo do traço ARG-REF, foi seguido o critério de mistura da ABNT NBR 16541:2016 [27]. Para o traço ARG-20A6 e ARG-50A6, conforme dosagens já indicadas na Tab.1, primeiramente foi realizada a homogeneização da solução com a água e o aditivo cristalizante líquido, como mostra a Fig.2(a). Em seguida, foram incorporados ao RPC de cada mistura, deixando-os em tratamento por 6 h. Após o tempo do tratamento, foram colocados na argamassadeira juntamente com os outros componentes, para a produção da mistura argamassada conforme a mesma normativa. Os traços ARG-20A24 e ARG-50A24 seguiram o mesmo mecanismo, no entanto, o tempo do processo de tratamento foi de 24 h. A Fig.2(b) mostra o resíduo seco antes do tratamento e a Fig.2(c) o resíduo tratado, onde é possível verificar visualmente a coloração de tom avermelhada do resíduo após o processo de tratamento, justamente por absorver a solução após o tempo especificado para cada processo de saturação.

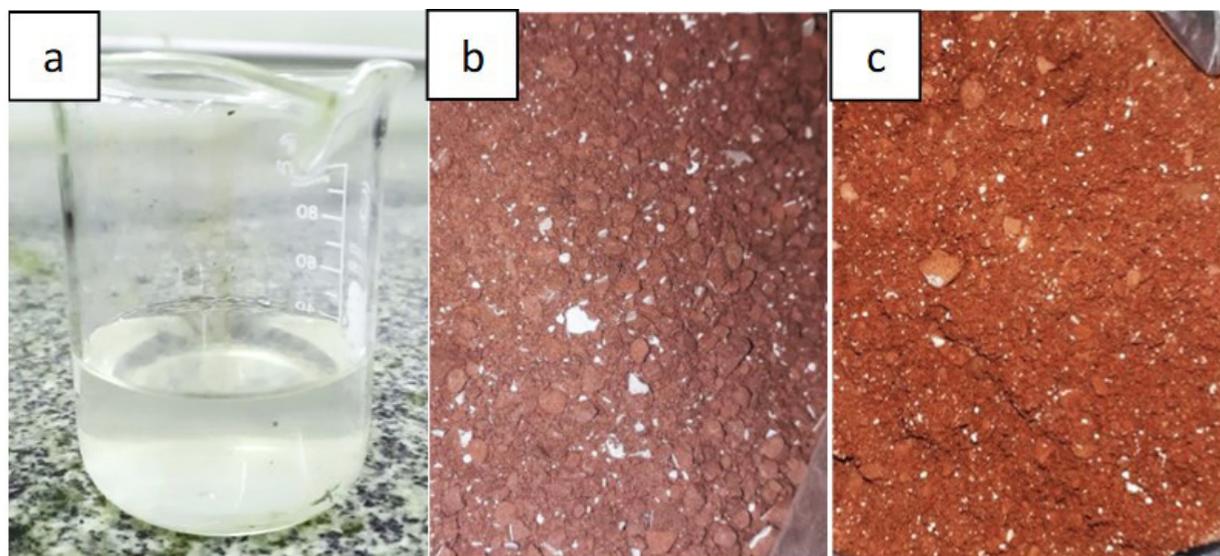


Figura 2. Tratamento: (a) solução aditivo + água; (b) resíduo seco; (c) resíduo após o tratamento

As análises do comportamento das argamassas foram realizadas no seu estado fresco por meio dos ensaios estabelecidos pela ABNT NBR 13276:2016 [26], ABNT NBR 13277:2005 [28] e ABNT NBR 13278:2005 [29], para determinação do índice de consistência, da retenção de água e da densidade de massa, respectivamente.

Já, no estado endurecido os ensaios foram feitos após 28 dias de cura, para determinação da resistência à tração na flexão e à compressão, do módulo de elasticidade, da absorção de água, índice de vazios e da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade.

A resistência à tração na flexão e à compressão seguiu os parâmetros da ABNT NBR 13279:2005 [30], onde foram empregados três corpos de prova prismáticos ($4 \times 4 \times 16$ cm) para cada mistura. Para a tração na flexão o corpo de prova foi posicionado em prensa (EMIC PC200CS), com carga aplicada de 50 ± 10 N·s⁻¹. E para a compressão, o corpo de prova foi posicionado em prensa servo hidráulica (EMIC PC200CS), com carga aplicada de 500 ± 50 N·s⁻¹. Para a determinação do módulo de elasticidade, foram necessários três corpos de prova cilíndricos (5×10 cm) para cada mistura. O ensaio foi realizado conforme a ABNT NBR 8522-1:2021 [31]. O carregamento foi contínuo com velocidade de $0,45 \pm 0,15$ MPa, realizado em prensa servo hidráulica (EMIC PC200CS) com uso de extensômetro elétrico para medição de deformação.

O ensaio para determinação da absorção de água e índice de vazios foi realizado de acordo com a ABNT NBR 9778:2005 [32], sendo que foram utilizados três corpos de prova cilíndricos (5×10 cm) para cada mistura.

Por último, finalizando a caracterização da argamassa no estado endurecido, realizou-se a determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade, com a metodologia da ABNT NBR 9779:2012 [33]. Foram moldados três corpos de prova prismáticos ($4 \times 4 \times 16$ cm) para cada mistura, que foram colocados no recipiente com água do ensaio e analisados conforme indica a norma citada.

Para a interpretação dos dados e análise dos resultados obtidos utilizou-se a análise estatística de variância (ANOVA), com 0,05 de significância e, quando necessário, o teste de Tukey.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO:

A distribuição granulométrica dos agregados pode ser vista na Fig.3.

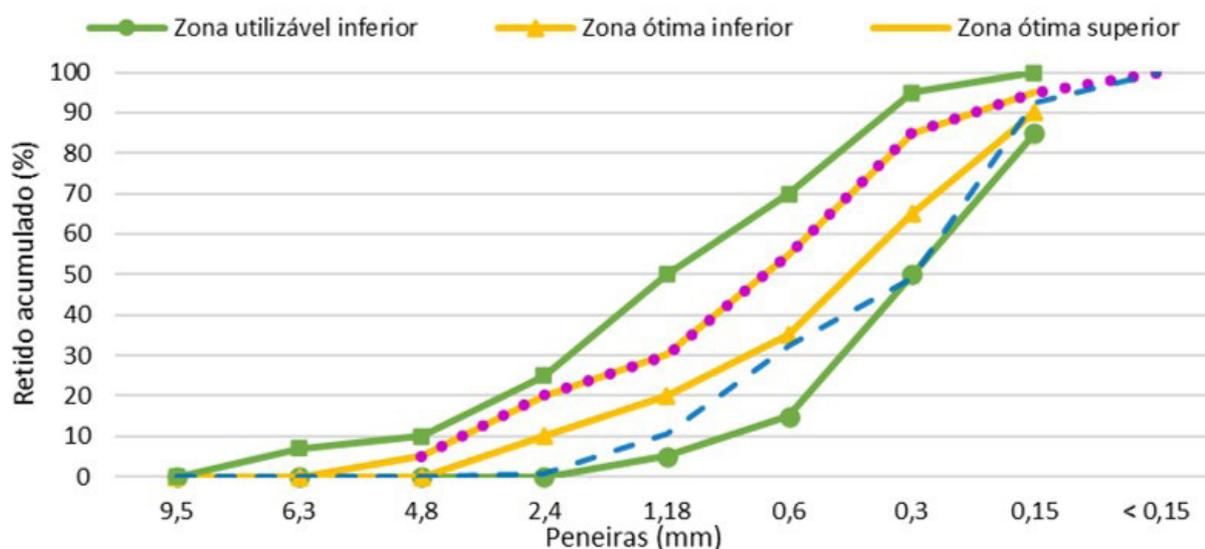


Figura 3. composição granulométrica dos agregados

Enquanto a areia tem sua composição dentro da zona ótima inferior e zona utilizável inferior, a composição granulométrica do agregado reciclado de placas cerâmicas foi feita por peneiramento, para ficar na zona ótima, a fim de se obter o melhor empacotamento das partículas, propiciando uma boa resistência mecânica e trabalhabilidade, reduzindo os espaços vazios entre os grãos [34]. O agregado reciclado e o agregado natural possuem diferença de aproximadamente 19 e 36% na quantidade de massa retida acumulada nas peneiras com aberturas de 2,4 e 4,8 mm, respectivamente. Para as peneiras com abertura igual ou menor que 0,15 mm, existe uma similaridade entre as massas retidas acumuladas dos grãos. O módulo de finura e a dimensão máxima característica do RPC resultou em 2,9 e 4,8 mm, e da areia em 1,85 e 2,4 mm, nesta ordem. Em vista disso, é possível verificar que o RPC apresenta mais finos em sua composição granulométrica em relação ao agregado natural.

As caracterizações dos agregados utilizados nas misturas podem ser vistas na Tab.3.

Tabela 3. Caracterização dos agregados

Agregado	Densidade (g/cm ³)	Absorção de água (%)	Massa unitária (kg/m ³)	Volume de vazios (%)
RPC	2,51	6,91	1256	41
Areia	2,61	0,66	1600	38

Conforme Silva et al. [35], quanto maior a absorção de água, maior é a porosidade do resíduo. Desse modo, observa-se na Tab.3 que o agregado reciclado é mais poroso em relação à areia e possui uma absorção de água mais elevada, portanto é mais leve, resultando em menor valor de densidade, como mostra os resultados dos ensaios. Além da porosidade influenciar nos resultados, outra característica importante para análise da massa unitária é o formato dos grãos dos agregados [36]. O RPC possui grãos com formatos mais irregulares e pontiagudos do que a areia. Observando a Fig.4 é possível verificar microscopicamente a dessemelhança, explicando o motivo da massa unitária do RPC ser menor que a da areia. A Fig.4(a) mostra o formato do agregado reciclado e a Fig.4(b), o formato do agregado natural, ambas imagens possuem ampliação de 1000 vezes. Mesmo com a dessemelhança no formato dos grãos, houve apenas uma diferença de 3% no volume de vazios, devido à composição granulométrica do resíduo estar na zona ótima e possuir melhor empacotamento das partículas.

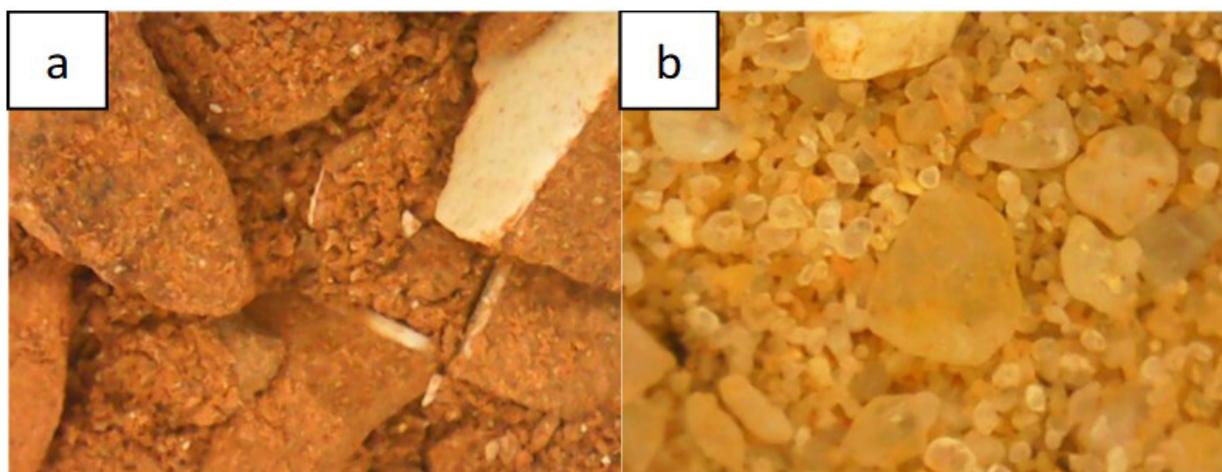


Figura 4. Formato dos agregados: (a) agregado reciclado, (b) agregado natural

Os resultados de índice de consistência, retenção de água e densidade de massa são mostrados na Fig.5. Pelo ensaio do índice de consistência percebe-se que os traços com substituição da areia por RPC são menos fluidos, tendo em vista o menor espalhamento. Tal fato pode ser justificado devido ao maior valor de absorção de água do agregado reciclado em relação ao agregado natural e, conseqüentemente, por ser mais poroso, absorve mais água da mistura. Essa característica é pertinente ao agregado reciclado, visto que a ABNT NBR 15116:2021 [21] recomenda sua molhagem antes de sua adição na mistura, com intuito de melhorar as propriedades reológicas das argamassas. Tal fato também ocorreu nos trabalhos de Negrini et al. [15] e Prado [37].

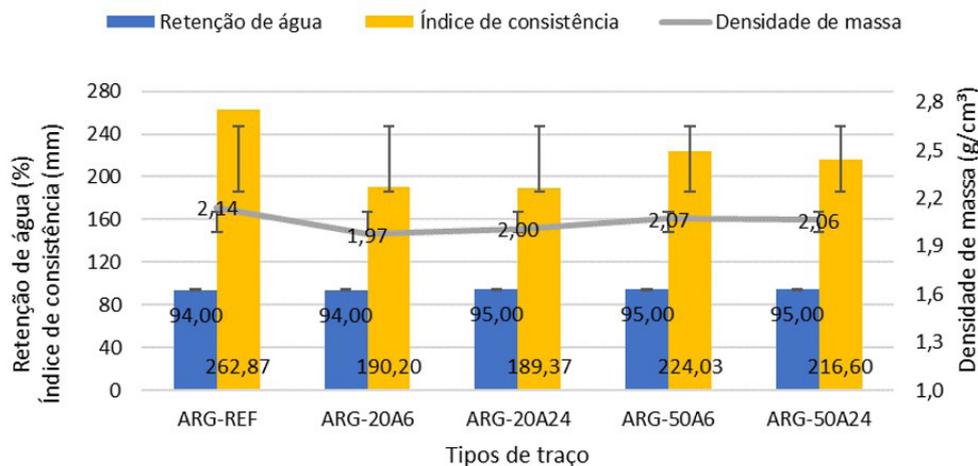


Figura 5. Resultados dos ensaios no estado fresco.

Os traços ARG-50A6 e ARG-50A24 tem maiores quantidades de aditivo em sua solução de tratamento e resultaram em uma trabalhabilidade mais próxima do traço ARG-REF, em virtude da efetividade do tratamento, devido à cristalização dos poros da mistura pelo aditivo, impedindo a absorção de água da mistura. Estatisticamente, os traços possuem diferença significativa entre si, ou seja, o tratamento do RPC influenciou na análise do índice de consistência.

A retenção de água é a propriedade da argamassa no estado fresco que consiste em manter sua trabalhabilidade sem perder água para o meio externo [38]. Botelho et al. [39] complementam que a retenção de água auxilia na reação de cristalização do cimento, mantendo a argamassa hidratada. Segundo a ABNT NBR 13281:2005 [40], o menor valor para retenção de água em argamassas de revestimento é de 72%, sendo assim, todos os resultados obtidos estão dentro do padrão estabelecido pela normativa. Em razão da menor consistência em relação ao traço de referência, a retenção de água dos traços com RPC em sua mistura aumentaram, pois existe uma menor quantidade de água livre nas misturas. No entanto, após o arredondamento dos valores para números inteiros, o traço de referência e o ARG-20A6 apresentaram resultados iguais de 94%.

A densidade do ARG-REF é maior que a dos demais traços, justificada pela substituição da areia, que é um material mais denso, com $2,61 \text{ g/cm}^3$, em relação ao resíduo de placa cerâmica, com densidade $2,51 \text{ g/cm}^3$ e, por conta de o RPC ser mais poroso que a areia.

O coeficiente por capilaridade e a absorção de água por capilaridade são mostrados na Tab.4.

Tabela 4. Coeficiente de capilaridade e a absorção de água por capilaridade das misturas

Traços	Coef. de capilaridade ($\text{g/dm}^2 \cdot \text{min}^{-1} / \text{m}^2$)	Desvio padrão	Absorção de água em 10 min (g/cm^2)	Desvio padrão	Absorção de água em 90 min (g/cm^2)	Desvio padrão
ARG-REF	4,267	0,416	0,169	0,020	0,435	0,035
ARG-20A6	6,033	0,444	0,208	0,024	0,585	0,051
ARG-20A24	7,533	0,378	0,279	0,018	0,750	0,021
ARG-50A6	6,007	0,356	0,250	0,025	0,629	0,040
ARG-50A24	6,000	0,400	0,250	0,012	0,625	0,037

A capilaridade ocorre quando a água entra em contato com um sólido e tende a subir pelos poros das argamassas. No entanto, quanto maior a dimensão dos poros, menor é a força capilar [41]. O traço ARG-20A24 apresentou maior absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade que os demais traços. Os traços ARG-50A6 e ARG-50A24 mostram um valor menor no ensaio, quando comparados aos traços com substituição da areia por RPC. Uma possível justificativa para o menor valor encontrado é que o tratamento com 50% de aditivo, independentemente ao tempo, é capaz de cristalizar a água com o aditivo fechando os poros das misturas e então, diminuir a capilaridade.

Pelo método de análise de estatística ANOVA é possível afirmar que os traços ARG-50A6 e ARG-50A24 são iguais, entretanto, quando comparados com o ARG-REF, todos os cinco traços possuem diferença significativas entre si. A Fig.6, obtida por microscopia óptica, mostra os poros de cada traço: Fig.6(a) ARG-REF, Fig.6(b) ARG-20A6, Fig.6(c) ARG-20A24, Fig.6(d) ARG-50A6 e Fig.6(d) ARG-50A24, nesta ordem, todas com ampliação de 1000 vezes.

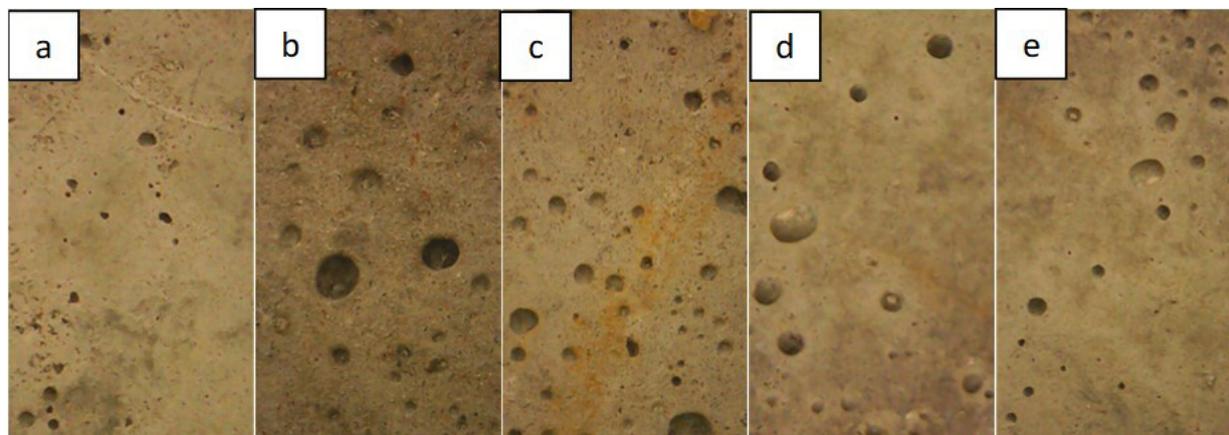


Figura 6. Poros dos traços: (a) ARG-REF; (b) ARG-20A6; (c) ARG-20A24; (d) ARG-50A6; (e) ARG-50A24

Quanto à absorção de água e ao índice de vazios, são mostrados na Fig.7. A absorção de água é prejudicial ao desempenho das argamassas. Quanto maior a absorção de água maior a permeabilidade, a água é transportada e ocupa os poros permeáveis das argamassas [32]. Os traços com 20% de aditivo em sua solução de tratamento (ARG-20A6 e ARG-20A24) apresentaram-se mais permeáveis que os demais traços. O traço ARG-50A6 resultou em uma absorção de água igual ao traço de referência, e o traço ARG-50A24 resultou em uma absorção de água menor que o ARG-REF, potencializando o tratamento do resíduo com 50% de aditivo + 50% de água durante o período de 24 h. A quantidade de vazios é proporcional à absorção de água de cada traço. Logo, se a absorção de água diminui, o índice de vazios também diminui, indicando que o traço ARG-50A24 teve um maior fechamento dos poros em relação aos outros traços. Baseando-se no teste de Tukey, em relação ao ARG-REF todos os traços com RPC são iguais. No entanto, quando comparados entre si, os traços ARG-20A6 e ARG-50A24 são diferentes, com 0,05 de significância.

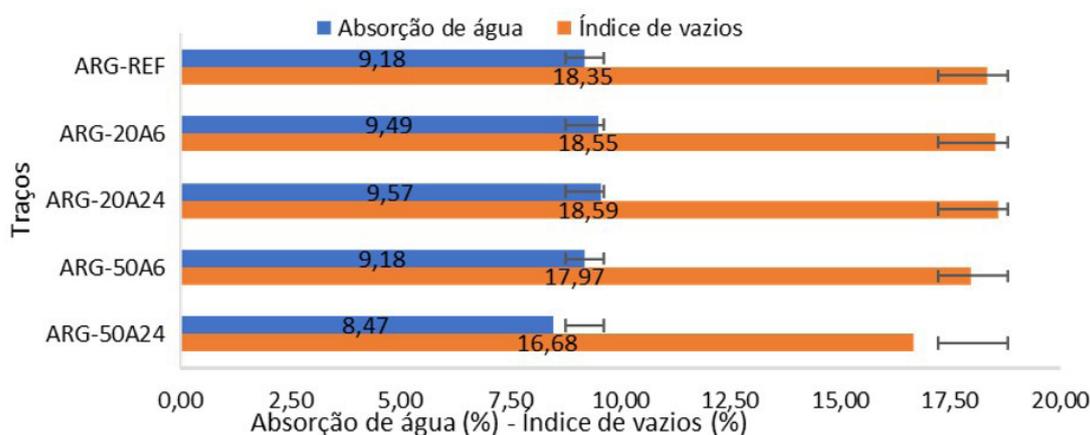


Figura 7. Absorção de água e índice de vazios

A massa específica do traço de referência é 2,38 g/cm³, o traço ARG-20A6 e ARG-20A24 resultaram em 2,40 e 2,39 g/cm³, respectivamente. Os traços com maior quantidade de aditivo em sua solução (ARG-50A6 e ARG-50A24) tiveram uma massa específica de 2,39 e 2,36 g/cm³ nesta ordem.

Segundo a ANOVA, as argamassas não possuem diferença significativa entre si para o ensaio de massa específica, com 95% de confiança, ou seja, o tratamento se mostrou eficiente para todos os traços.

As propriedades mecânicas das argamassas podem ser vistas na Fig.8. Os traços ARG-50A6 e ARG-50A24 tiveram resistência à compressão similar ao do traço ARG-REF. Pelo teste de Tukey são iguais entre si, estatisticamente, atestando o efeito benéfico do tratamento. Os traços ARG-20A6 e ARG-20A24 tiveram um decréscimo na resistência à compressão. Essas argamassas contêm maiores quantidades de água na sua solução de tratamento. Conforme outros estudos de substituição de agregado miúdo por agregado de RPC, Pinz [42] verificou a diminuição da resistência à compressão das argamassas. O autor atribui a diminuição a maior porosidade do RPC.

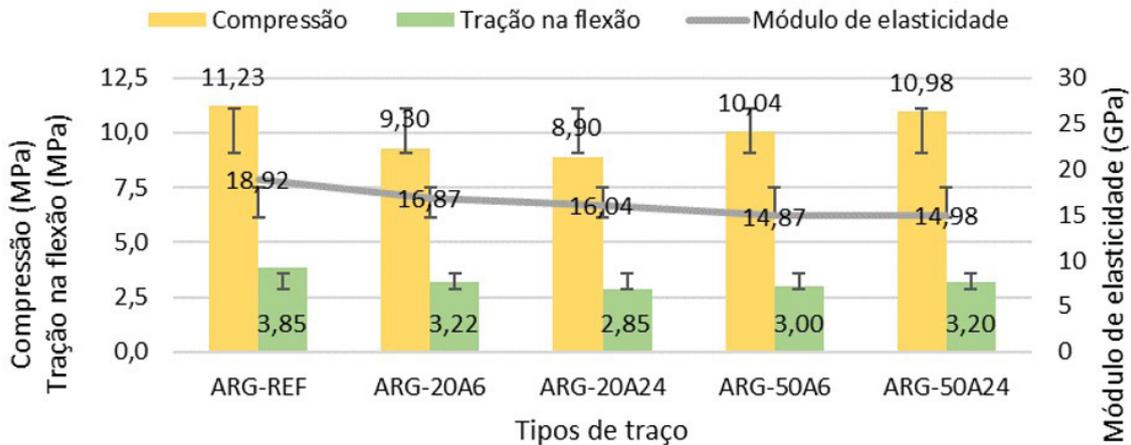


Figura 8. Propriedades mecânicas das misturas

O ensaio de resistência à tração na flexão resultou um valor médio de 3,22 MPa, todos os traços tiveram valores próximos ao traço ARG-REF e estatisticamente são iguais entre si. Em estudo comparativo, Dang et al. [43] também observaram que há uma semelhança nos valores do ensaio de tração na flexão, quando substituída areia por resíduo de cerâmica. Segundo os autores, essa proximidade nos valores obtidos ocorre devido ao resíduo preencher os vazios deixados pela areia. A ABNT NBR 6118:2014 [44] relaciona a elasticidade com a porosidade do agregado, sendo possível apresentar uma deformação maior sem ocorrer fissuração com o uso de agregado poroso. No caso das argamassas produzidas com o RPC o módulo de elasticidade diminuiu em função do agregado reciclado ser poroso. De acordo com a análise de estatística (ANOVA), comprova-se com 95% de significância que os traços não apresentam diferença considerável nos resultados para a resistência à tração na flexão e para o módulo de elasticidade.

4. CONCLUSÃO:

O resíduo reciclado de placa cerâmica é mais poroso que o agregado natural, e sua granulometria tem maior quantidade de finos e melhor empacotamento dos grãos do que a areia. As argamassas produzidas com o RPC se mostraram com menor consistência em relação ao traço de referência, devido à porosidade do resíduo que absorve mais água da mistura, como já comentado. A capacidade de reter água se manteve constante nos cinco traços, com valores atendidos pela normativa citada, o que é um resultado adequado.

O traço ARG-20A24 se destacou de forma negativa no ensaio de absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade, por apresentar o maior valor de capilaridade entre os quatro traços com substituição da areia por RPC. Estatisticamente, os traços ARG-50A6 e ARG-50A24 são iguais entre si em relação à capilaridade.

Para o índice de vazios, o traço com maior quantidade de aditivo em sua solução com maior tempo de tratamento (ARG-50A24) teve resultado melhor que a argamassa de referência. Nessa mesma propriedade pode-se dizer que os traços ARG-20A6 e ARG-20A24 não obtiveram resultados adequados, influenciando na propriedade mecânica.

O tratamento com aditivo cristalizante resultou em valores adequados no ensaio de resistência à tração na flexão e módulo de elasticidade, não houve diferença estatística entre os cinco traços. No entanto, para o ensaio de compressão, os traços ARG-50A6 e ARG-50A24, que estatisticamente são iguais, se sobressaíram, chegando a valores mais próximos ao traço ARG-REF.

Todavia, a solução composta por 50% de água + 50% de aditivo cristalizante, independente do tempo de tratamento (ARG-50A6 e ARG-50A24), usada para a pré-molhagem dos agregados reciclados antes de sua adição na mistura argamassada se mostrou eficaz nas propriedades físico-mecânicas das argamassas.

REFERÊNCIAS:

- [1] ANFACER, 2020. Números do Setor. Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica para Revestimentos, Louças Sanitárias e Congêneres. <http://www.anfacer.org.br/>
- [2] Antunes E G P, 2019. Avaliação dos efeitos da expansão por umidade (EPU) das placas cerâmicas na durabilidade dos sistemas de revestimentos cerâmicos internos. Florianópolis: Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo, Doutorado em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Santa Catarina.
- [3] NBR ISO 13006, 2020. Placas cerâmicas. Definições, classificação, características e marcação. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [4] Oliveira C, Reis C, Correia J, Silva L T, Silva P L, Silva J F, 2019. Study of historical value mortars. *Procedia Structural Integrity* 22, 125-129.
- [5] CCB, 2020. Programa setorial da qualidade de placas cerâmicas para revestimento. Relatório setorial 035/2020. Centro Cerâmico do Brasil. <https://www.ccb.org.br/pt/psq>
- [6] Presidência da República, 2010. Lei nº 12305. Brasília: Presidência da República.
- [7] Brundtland G O, 1991. Comissão mundial sobre meio ambiente e desenvolvimento. Nosso futuro comum. 2ª ed. Rio de Janeiro: Editora da Fundação Getúlio Vargas.
- [8] Matera M, 2018. O desafio e construir de forma sustentável. <https://ecogranito.com.br/blog/desafiodeconstruir>
- [9] ANM, 2017. Sumário mineral. Agência Nacional de Mineração. https://www.gov.br/anm/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/sumario-mineral/sumariomineral_2017
- [10] ANEPAC, 2023. Revista Areia e Brita. Associação Nacional das Entidades de Produtores e Agregados para a Construção. <https://www.anepac.org.br/publicacoes/revista-areia-e-brita>
- [11] Agopyan V, John V M, 2011. O desafio da sustentabilidade na construção civil. 2ª ed. São Paulo: Edgard Blucher.
- [12] Ledesma E F, Jiménez J R, Ayuso J, Fernández J M, Brito J M, 2015. Feasible use of recycled sand from construction and demolition waste for eco-mortar production. Part-I. Ceramic masonry waste. *Journal of Cleaner Production* 87, 692-706.
- [13] Carasek H, Girardi A C C, Araujo R C, Angelim R, Cascudo O, 2018. Estudo e avaliação de agregados reciclados de resíduo de construção e demolição para argamassas de assentamento e de revestimento. *Cerâmica* 64, 70, 288-300.
- [14] Torres I, Matias G, Faria P, 2020. Natural hydraulic lime mortars. The effect of ceramic residues on physical and mechanical behaviour. *Journal of Building Engineering* 32, 101747.
- [15] Negrini J G, Gurkewicz R P, Wanderlind A, Savi A E, Piva J H, Antunes E G P, 2023. Análise da influência da substituição parcial de agregado miúdo natural por resíduos de placas cerâmicas com distintos tratamentos de saturação em argamassas. *Cerâmica Industrial* 28, 1, 1-13.
- [16] NBR 11768-1, 2019: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland. Parte 1. Requisitos. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [17] Ferreira M F, 2017. Análise do desempenho mecânico com aditivo cristalizante após o Self-sealing e Self-Healing na resistência à compressão de argamassas. Manaus: 11 Exposição científica, Tecnológica e Cultural do IFAM/CMC 1-13.
- [18] Azarsa P, 2018. Crystalline waterproofing admixtures effects on self-healing and permeability of concrete. Victoria, Canada: 1st International Conference on New Horizons in Green Civil Engineering, University of Victoria 1-10.
- [19] Helene P, Guignone G, Vieira G, Roncetti L, Moroni F, 2018. Evaluation of the chloride penetration and service life of self-healing concretes activated by crystalline catalyst. *Revista Ibracon* 11, 3, 544-563. <http://dx.doi.org/10.1590/s1983-41952018000300007>
- [20] Jantsch A C A, Mohamad G, Schmidt R P B, Antoniazzi J P, Lübeck A, 2021. Avaliação do comportamento de revestimentos em argamassas estabilizadas submetidas a tratamento superficial com aditivos cristalizantes. *Ambiente Construído* 21, 1, 81-99.
- [21] NBR 15116, 2004. Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil. Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural. Requisitos. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [22] NBR 16916, 2021. Agregado miúdo. Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [23] NBR 7211, 2019. Agregados para concreto. Especificação. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [24] NBR 17054, 2022. Agregados. Determinação da composição granulométrica. Método de ensaio. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [25] NBR 16972, 2021. Agregados. Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

-
- [26] NBR 13276, 2016. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos. Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [27] NBR 16541, 2016. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos. Preparo da mistura para a realização de ensaios. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [28] NBR 13277, 2005. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos. Determinação da retenção de água. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [29] 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: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [30] 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: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [31] NBR 8522, 2017. Concreto. Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [32] NBR 9778, 2009. Argamassa e concreto endurecidos. Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [33] NBR 9779, 2012. Argamassa e concreto endurecidos. Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [34] Castro A, Ferreira F, 2016. Efecto de empaquetamiento de las partículas en la durabilidad de los hormigones de alto desempeño. *Revista Ingeniería de Construcción* 31, 2, 91-104. <http://dx.doi.org/10.4067/s0718-50732016000200003>
- [35] Silva M N P, Silva M N P, Barrionuevo B U S, Feitosa I M, Silva G S, 2015. Revestimentos cerâmicos e suas aplicabilidades. *Maceió: Caderno de Graduação, Ciências Exatas e Tecnológicas* 2, 3, 87-97.
- [36] Arnold D C M, 2011. Análise da influência da forma dos grãos nas propriedades das argamassas. São Leopoldo: Curso de Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos.
- [37] Prado R N R, 2021. Suscetibilidade á fissuração das argamassas produzidas com agregados de cerâmica vermelha. *Criciúma: Revista Técnico-Científica de Engenharia Civil* 1, 4, 19-37.
- [38] Warch P, 2011. Estudo da capacidade de retenção de água em argamassas com incorporação de pó de exaustão. Porto de Galinhas: 55 Congresso Brasileiro de Cerâmica 1-10.
- [39] Botelho K C H, Consatti D A W, Bueno B G, Bandeira F, 2017. Retenção de água em argamassas com substituição parcial do agregado miúdo por resíduo da construção civil. Ijuí: 28 Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia p. 1-4.
- [40] NBR 13281, 2005. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos. Requisitos. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [41] Santana B V, Aleixo I V, 2017. Avaliação da absorção por capilaridade de argamassas para revestimento com diferentes aditivos impermeabilizantes. Brasília: Programa de Iniciação Científica, Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas.
- [42] Pinz F P, 2019. Influência do resíduo de cerâmica vermelha em argamassas na substituição parcial do agregado ou do cimento. Pelotas: Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Pelotas.
- [43] Dang J, Zhao J, Hu W, Du Z, Gao D, 2018. Properties of mortar with waste clay brick as fine aggregate. *Construction and Building Materials* 166, 898-907.
- [44] NBR 6118, 2014. Projeto de estruturas de concreto. Procedimento. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.