

Análise da influência da substituição parcial de agregado miúdo natural por resíduos de placas cerâmicas com distintos tratamentos de saturação em argamassas

João Guilherme Negrini^{a*}, Rafael de Paula Gurkewicz^{a,b,c}, Augusto Wanderlind^{a,b}, Aline Eyng Savi^{a,b}, Jorge Henrique Piva^{a,b}, Elaine Guglielmi Pavei Antunes^{a,b}

^aDepartamento de Engenharia Civil, UNESC, Av Universitária 1105, Criciúma, Santa Catarina, Brasil

^bGPDECC, Grupo de Pesquisa em Desempenho de Estruturas e Construção Civil, UNESC, Av Universitária 1105, Criciúma, Santa Catarina, Brasil

^cPrograma de Pós-Graduação em Ciências e Engenharia de Materiais, UNESC, Av Universitária 1105, Criciúma, Santa Catarina, Brasil

*e-mails: rafaelpgurkewicz@unesc.net e elainegpa@unesc.net

Resumo:

O reaproveitamento de Resíduos de Construção e Demolição RCD possui grande potencial para uso como agregados, diminuindo a dependência por agregados naturais. Este trabalho visa analisar a influência da substituição de agregado miúdo natural por Resíduo de Placa Cerâmica (RPC), com distintos tratamentos de saturação, nas características físico-mecânicas de argamassas. Para tal, fez-se uma substituição de 20% de RPC, em relação à massa de areia, em um traço referência de argamassa. Cabe salientar que antes da mistura dos componentes o RPC passou por processos distintos de saturação, que são: sem saturação (SS), saturação em água (SA), saturação *self-healing* e água (S80A20C) e (S50A50C). Verifica-se a influência do resíduo nas características físico-mecânicas e com base nos resultados pode-se constatar que as argamassas com substituição apresentam aumento na resistência à compressão, estabilidade na resistência à tração na flexão, e em geral, uma queda no módulo de elasticidade. Em relação às propriedades físicas, obtém-se um aumento na absorção de água e no índice de vazios das amostras com tratamento de saturação. A substituição do agregado miúdo natural por resíduos de placas cerâmicas com distintos tratamentos de saturação resulta na melhora das propriedades mecânicas da argamassa.

Palavras-chave: Resíduo; argamassa; agregado; reaproveitamento; *self-healing*.

1. INTRODUÇÃO:

A construção civil é considerada uma área de ampla importância na indústria brasileira, com potente indicativo econômico de crescimento [1]. O aumento populacional global requer a implantação de novas obras de edificações e infraestrutura, quesito que impacta diretamente no consumo de matérias-primas não renováveis. A areia e a brita, por exemplo, destacam-se como as matérias-primas naturais mais utilizadas na construção civil, e tal fato deve-se à sua disponibilidade na natureza; no entanto, apresentam grandes índices de extração, o que ocasiona consequências globais a longo prazo [2].

Atualmente a Indústria da Construção Civil é classificada como umas das principais atividades responsáveis pelo desenvolvimento econômico e social, porém de acordo com o CIB (Conselho Internacional de Construção) também é responsável pela alta produção de resíduos e grande geradora de impactos ambientais [3]. Pode-se estimar o consumo de recursos naturais entre 20 e 50% [4]. No entanto, apesar de utilizar uma quantidade significativa de recursos naturais, a construção civil também possui uma grande capacidade de absorção dos sólidos produzidos por ela mesma; a incorporação desses resíduos pode diminuir os impactos ambientais causados pela elevada taxa de extração de recursos naturais [5]. Tais impactos, segundo Ribeiro e Morelli [6], podem variar de acordo com o processo construtivo, além de reduzir a disposição de resíduos construtivos em aterros.

Para que um sistema de gerenciamento de resíduos seja eficaz, deverá ter como meta não apenas reduzir a quantidade de resíduos gerado, mas também reciclar e prever materiais que possibilitem a fácil substituição, e que sejam duráveis, de modo que possam ser reaproveitados para outras finalidades [7]. O reaproveitamento de resíduos da construção civil possui grande potencial como fonte de geração de agregados e além de proporcionar a reciclagem do resíduo, diminui a dependência por agregados naturais, promovendo a economia no processo construtivo [8].

Os Resíduos de Construção e Demolição (RCD) vêm recebendo elevada atenção por parte de pesquisadores e construtores nos últimos anos, devido ao fato de serem os principais agentes poluidores ambientais da construção civil [9]. Nesse contexto, são necessários estudos e análises para que se possa compreender maneiras de diminuir e aperfeiçoar a utilização ao máximo dos materiais construtivos. Segundo Carasek et al. [10] a classificação dos agregados reciclados pode ser dada de acordo com sua composição (cimentício, cerâmico ou misto) e quanto sua origem (construção, demolição ou restos de fábricas), utilizando análise visual na maioria das vezes. Nessa linha, destaca-se o resíduo de placas cerâmicas (RPC), oriundo das fábricas produtoras de revestimentos cerâmicos, importante setor no Brasil.

O setor cerâmico brasileiro tem apresentado significativo aumento na produção nos últimos anos. O Brasil é o terceiro maior produtor de placas cerâmicas do mundo, sendo que em 2018 produziu aproximadamente 872 milhões de metros quadrados de placas cerâmicas, de acordo com os dados estatísticos da ANFACER (Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica) [11]. Segundo pesquisa realizada pelo SINDICERAM (Sindicato das Indústrias de Cerâmica) [12] de Criciúma, SC, no ano de 2022, o volume produzido foi de aproximadamente 93,5 milhões de metros quadrados de pisos e 13,6 milhões de metros quadrados de azulejos.

Na indústria de placas cerâmicas é comum haver peças não-conformes (dimensões da placa, curvatura, esquadro, tonalidade, absorção de água, dentre outros) que conseqüentemente acabam por se tornarem resíduos dessa indústria.

Segundo Jimenez et al. [13] as argamassas podem conter até 40% de agregado reciclado cerâmico em sua composição, sem que suas propriedades mecânicas e a trabalhabilidade sejam afetadas. Em estudo comparativo, Dutra (2019) [14] verificou nos trabalhos de Gomes et al. [15]; Etxeberria e Vegas [16]; Alves et al. [17]; Debieb e Kenai [18] que o agregado reciclado cerâmico possui uma alta absorção de água (variando de 10 a 15%), quesito este que pode afetar as características e propriedades das argamassas. De acordo com Jantsch et al. [19], a presença de água em revestimentos argamassados é uma das principais causas de manifestações patológicas. Conforme De Brito et al. [20] uma alta absorção de água pode ser um fator limitante para o uso de agregados na produção de materiais cimentícios como argamassas, haja vista que a mesma pode ocasionar perda na resistência mecânica, na durabilidade e na trabalhabilidade do novo material. Existe uma necessidade do aprimoramento de novas técnicas para tratamento dos resíduos cerâmicos a fim de que os mesmos possam ser utilizados com uma maior capacidade de ocasionar melhoria nas propriedades das argamassas [14].

Nesse cenário, vem-se buscando alternativas e uma possível é o tratamento do RPC com aditivos cristalizantes. Os aditivos cristalizantes são compostos por silicatos que quando misturados com água e em contato com materiais cimentícios tornam-se um cristal insolúvel. De acordo com Takagi et al. [21], o tratamento de cristalização é um processo físico-químico, onde os componentes do aditivo cristalizante desencadeiam reações catalíticas, ocorrendo a formação de depósitos insolúveis que ocasionam a vedação dos poros, que também promove um aumento da resistência à penetração de água; *self-healing* é a capacidade de preencher poros, pela formação de estruturas cristalinas.

Com base nessa contextualização a presente pesquisa visa analisar a influência da substituição de agregado miúdo natural por resíduo de placa cerâmica (RPC), com distintos tratamentos de saturação, nas características físico-mecânicas de argamassas. Para tal, faz-se uma substituição de 20% de RPC em relação à massa de areia em um traço referência de argamassa. Cabe salientar que antes da mistura dos componentes o RPC passa por processos distintos de saturação, que são: sem saturação (SS), saturação em água (SA), saturação *self-healing*, e água (S80A20C) e (S50A50C).

2. MATERIAIS E MÉTODOS:

A fim de avaliar o comportamento da substituição de agregado miúdo natural (areia) por resíduos de placas cerâmicas (RPC) em argamassas, o estudo foi dividido em duas etapas. A primeira, constituiu-se na produção, tratamento de absorção do RCP e caracterização física dele. Na segunda etapa realizou-se a verificação da influência do RCP no comportamento mecânico de argamassas. Para isso produziram-se misturas com percentual de substituição de 20% em relação à massa de areia, com diferentes tratamentos de absorção do agregado miúdo reciclado. As principais etapas do procedimento experimental adotado para a elaboração do presente estudo podem ser visualizadas no fluxograma apresentado na Fig.1.

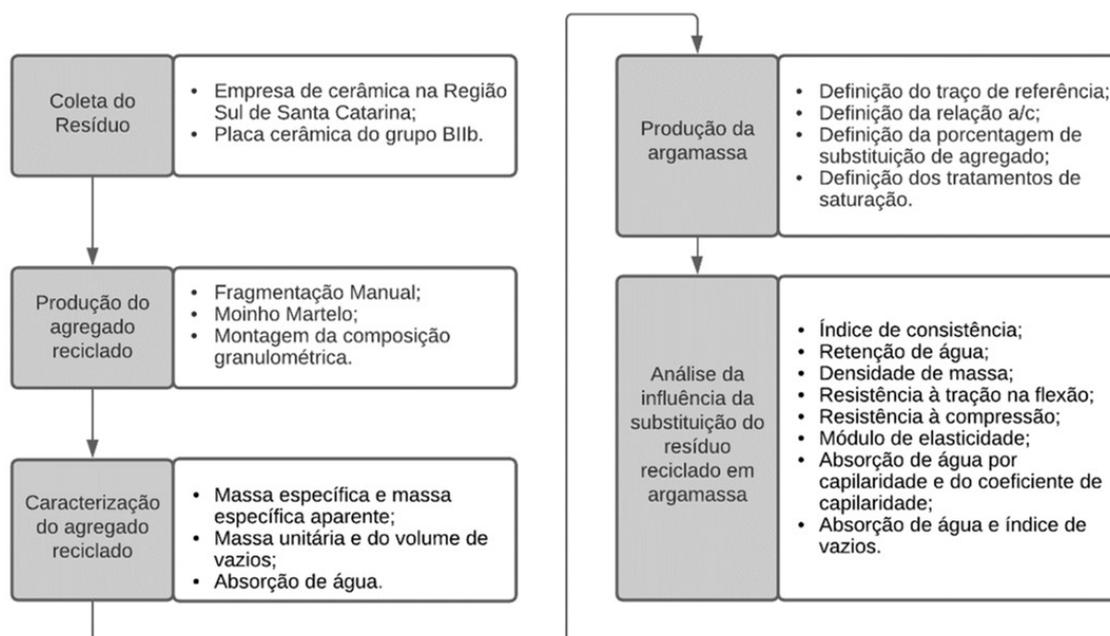


Figura 1. Fluxograma das etapas do trabalho

Para o estudo foram coletados resíduos de placas cerâmicas do tipo B11b de uma empresa da região sul de Santa Catarina. As placas cerâmicas para revestimento são classificadas quanto ao processo de conformação e quanto à porosidade aberta, medida em termos de absorção de água (AA), sendo que o tipo B11b possui absorção de água entre 6 e 10%, conforme a NBR 13006:2020 [22]. Segundo Motta et al. [23] e Antunes [24] a maioria das unidades fabris do Brasil produzem placas do tipo B11b.

Procedendo a etapa de moagem os resíduos foram triturados manualmente e, posteriormente, processados em moinho de martelos (marca Furlan, modelo MM Manchester) e, em seguida, foram secos em estufa a 105 ± 5 °C. De acordo com a NBR 7211:2009 [25], para que um material seja considerado agregado miúdo, os fragmentos devem ser passantes pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm e ficar retidos na peneira com abertura de malha de 150 μ m, em ensaio realizado de acordo com a NBR 17054:2022 [26]. Após definição das dimensões das partículas do RPC, eles foram organizados de acordo com sua graduação, como mostra a Fig.2.

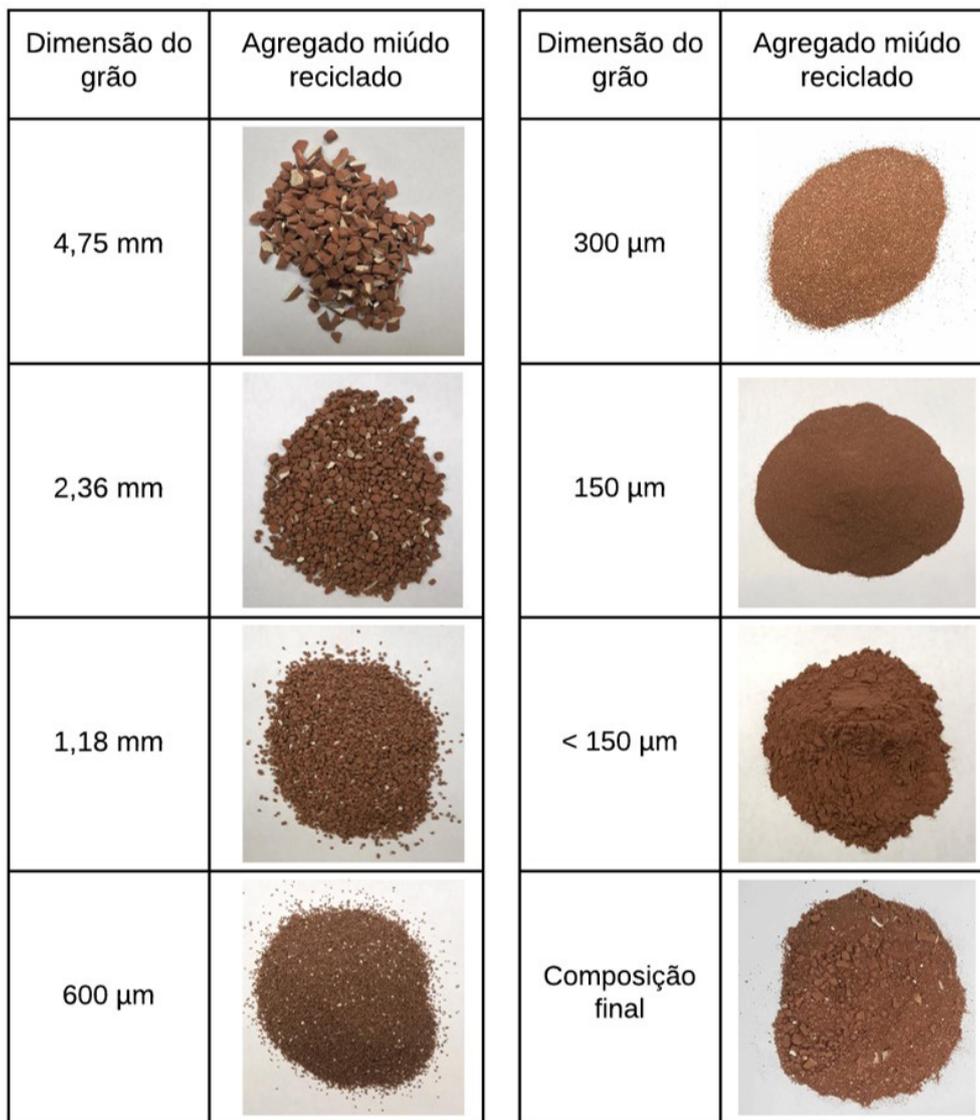


Figura 2. Resíduos de placa cerâmica após processo de beneficiamento

A distribuição de tamanhos do agregado miúdo deve atender aos limites preconizados pela NBR 7211:2009 [25]. Portanto, realizou-se a montagem da composição granulométrica do RPC para atender aos parâmetros da zona ótima. Foram adotados os percentuais entre o limite superior e inferior da zona ótima, sendo eles de 5% de partículas com 4,75 mm, 15% de partículas com 2,36 mm, 10% de partículas com 1,18 mm, 25% de partículas com 600 µm, 30% de partículas com 300 µm, 10% de partículas com µm, e 5% de partículas com dimensão < 150 µm. A adequação da distribuição pode ser mais bem compreendida na Fig.3.

Os ensaios realizados para caracterizar o agregado reciclado miúdo foram: determinação da massa específica e massa específica aparente, determinação da massa unitária no estado solto e do volume de vazios e determinação da absorção de água, os quais seguiram as diretrizes estabelecidas pelas NBR 16916:2021 [27] e NBR 16972:2021 [28].

A mistura da argamassa foi executada conforme os parâmetros estabelecidos pela NBR 13276:2016 [29]. Para as dosagens das argamassas foram utilizados o cimento CPIV-32, areia média (com finura de 2,02 mm), cal hidratada CH-III e aditivo cristalizante líquido à base de silicatos ativos, sendo que o traço referência adotado foi 1: 0,25: 5,5, (cimento: cal: areia). Para o estudo foram elaborados traços com 20% de substituição de areia por resíduos de placas cerâmicas, em relação à massa de areia, com diferentes processos de tratamento da absorção do RPC. A relação água/cimento foi fixada em

0,88 para os traços e foi definida a partir do índice de consistência 260 ± 5 mm, como recomenda NBR 13276:2016 [29].

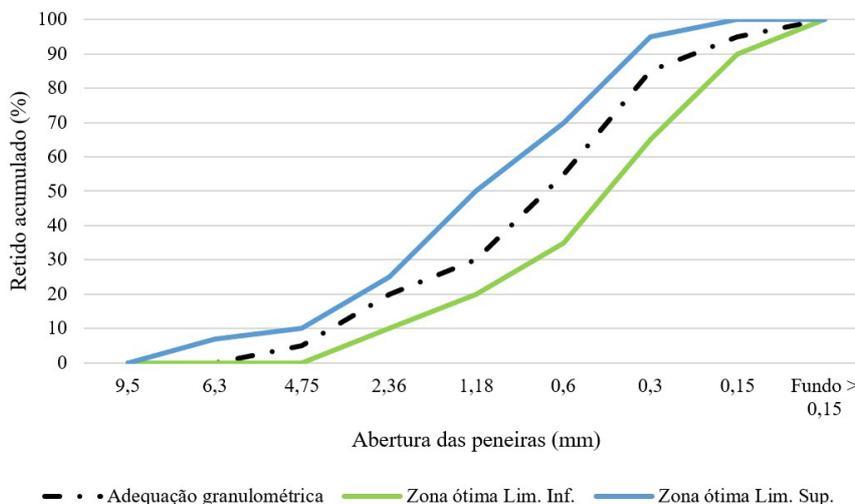


Figura 3. Distribuição de tamanhos de partículas do agregado reciclado

Foram executados 5 traços, sendo 1 traço de referência e 4 traços com substituição de 20% de areia por RPC. Para cada um dos traços com substituição foi utilizado o resíduo com um tipo de tratamento superficial, a fim de atenuar sua absorção de água. Segundo a NBR 15116:2004 [30], para o preparo de misturas com agregado reciclado miúdo, é necessária a pré-molhagem dos agregados para minimizar a absorção de água. Ainda conforme a mesma normativa, a prática tem mostrado que valores em torno de 80% do teor de absorção de água do agregado reciclado em uso são adequados.

Nesse contexto, foram definidos os quatro tipos de tratamento superficial dos resíduos para absorção de água, que são: ARG20-SS, ARG20-AS, ARG20-S80A20C, ARG20-S50A50C. Para o traço ARG20-SS, o RPC foi utilizado seco, ou seja, não recebeu nenhum tratamento para absorção, isto é, sem saturação (SS).

Para a execução dos outros 3 traços com tratamento superficial no RPC, foi necessário primeiramente obter a absorção de água do mesmo e, com base neste valor, definir os outros tipos de tratamento. O resultado de absorção de água do RPC foi de 6,91%, executado conforme a NBR 16916:2021 [27]. Este valor de absorção está condizente com o que já era esperado, tendo em vista que o RPC empregado é oriundo de placas do grupo de absorção B1Ib, conforme já comentado. O traço ARG20-SA utilizou o RPC com 80% do teor de absorção obtido, sendo que a saturação do agregado foi realizada somente com água, denominada saturação com água (SA). Para o traço ARG20-S80A20C o RPC foi utilizado com 100% do teor de absorção obtido e a saturação foi feita com 80% de água e 20% de aditivo cristalizante, em relação à massa de líquido adicionado ao agregado reciclado. Para o traço ARG20-S50A50C foi utilizado o RPC com 80% do teor de absorção obtido, porém a saturação foi realizada com 50% de água e 50% de aditivo cristalizante, em relação à massa de líquido adicionado ao agregado. Os métodos de dosagens podem ser visualizados na Tab.1.

Tabela 1. Traços das composições

Tipo de mistura	Teor de absorção	Tipo de saturação	Nomenclatura	Composição unitária em massa (cimento : cal : areia : resíduo : a/c)
Referência	0%	-	REF	1 : 0,25 : 5,5 : 0 : 0,88
20% substituição	0%	-	ARG20-SS	1 : 0,25 : 4,4 : 1,1 : 0,88
	80%	100% água	ARG20-SA	
	100%	80% água + 20% aditivo	ARG20-S80A20C	
	80%	50% água + 50% aditivo	ARG20-S50A50C	

Para a execução do traço ARG20-SA, inicialmente foi realizada a incorporação da massa de água ao RPC da mistura com auxílio de uma espátula, até que as partículas absorvessem todo o líquido adicionado. Imediatamente após a incorporação da água no RPC, ele foi introduzido na argamassadeira juntamente com o restante dos outros componentes da mistura, que seguiu os parâmetros estabelecidos na NBR 13276:2016 [29].

Para a execução dos traços ARG20-S50A50C e ARG20-S80A20C, adotou-se o mesmo procedimento citado anteriormente, porém foi realizada a homogeneização da água com o aditivo cristalizante primeiro, e após adicionado ao RPC.

Segundo o fabricante, o aditivo cristalizante utilizado no estudo é um aditivo líquido à base de silicatos ativos, que ao entrar em contato com o cimento no momento da hidratação forma cristais que preenchem os poros, bloqueando a penetração de água. A Tab.2 apresenta as principais características do aditivo cristalizante empregado no estudo.

Tabela 2. Características do aditivo, segundo [31]

Densidade	1.200 kg/m ³
Base	Silicatos
Dosagem	200 ml para cada 50 kg de cimento ou 1,2 l para cada m ³ de concreto
Aparência	Líquido amarelado
pH	11
Viscosidade (Ford 4 a 25 °C)	12 segundos
Validade	24 meses a partir da data de fabricação

Para o estudo foram analisadas as misturas de argamassa nos estados fresco e endurecido. As análises em estado fresco foram feitas pelos ensaios de determinação do índice de consistência, determinação da retenção de água e determinação da densidade de massa e seguiram os parâmetros estabelecidos conforme a NBR 13276:2016 [29], NBR 13277:2005 [32] e NBR 13278:2005 [33], nessa ordem.

As análises das misturas em estado endurecido da argamassa foram efetuadas pelos ensaios de determinação da resistência à tração na flexão, determinação da resistência à compressão, determinação do módulo de elasticidade, determinação da absorção de água, índice de vazios, determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade. Todos esses ensaios foram realizados após o tempo de cura de 28 dias. Para a determinação da resistência à tração na flexão e compressão da argamassa executou-se o ensaio conforme os parâmetros estabelecidos na NBR 13279:2005 [34]. Foram utilizados 3 corpos de prova prismáticos para cada traço com dimensões de 40 mm de largura, 40 mm de profundidade e 160 mm de comprimento. O ensaio de tração na flexão foi executado em uma prensa EMIC, modelo PC 200I, sendo aplicada uma carga de $50 \pm 10 \text{ N}\cdot\text{s}^{-1}$, enquanto para o ensaio de compressão foi utilizada uma prensa servo hidráulica da marca EMIC, modelo PC 200CS, com carga aplicada de $500 \pm 50 \text{ N}\cdot\text{s}^{-1}$.

Para a determinação do módulo de elasticidade da argamassa, realizou-se o ensaio conforme a NBR 8522:2017 [35], sendo adaptado para argamassas, com adaptações relativas ao ciclo de carga e descarga aplicados ao corpo de prova, sendo contínuo o carregamento e velocidade de $0,45 \pm 0,15 \text{ MPa}$. Para o ensaio foram produzidos três corpos de prova cilíndricos com diâmetro de 50 mm e 100 mm de comprimento para cada traço estudado. O ensaio foi realizado em uma prensa servo hidráulica da marca EMIC, modelo PC 200CS, juntamente com extensômetro elétrico, após 28 dias de cura da argamassa.

Para a determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade realizou-se o ensaio conforme a NBR 15259:2005 [36]. Os corpos de prova prismáticos (40 × 40 × 160 mm) tiveram a superfície lixada e limpa para a determinação da massa inicial; posteriormente os corpos de prova foram posicionados no recipiente de ensaio com nível de água de $5 \pm 1 \text{ mm}$ acima da face em contato com a água. Após transcorridos 10 minutos e 90 minutos, os corpos de prova foram pesados, sendo previamente enxutos com pano úmido.

Para a determinação da absorção de água e índice de vazios, executou-se o ensaio conforme os parâmetros da NBR 9778:2009 [37]. Para o ensaio foram moldados três corpos de prova cilíndricos

com dimensão de 50 mm de diâmetro e 100 mm de comprimento, conforme a NBR 7215:2019 [38], para cada traço estudado.

Para a análise dos resultados realizou-se a análise estatística de variância (ANOVA) com nível de significância de 5% para os ensaios de argamassa no estado endurecido e quando necessário, Teste de Tukey.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES:

Os resultados de determinação da massa específica, massa específica aparente, massa unitária no estado solto, volume de vazios e absorção de água dos agregados estão apresentados na Tab.3.

Tabela 3. Caracterização dos agregados

Ensaio	Resíduo de placa cerâmica	Agregado miúdo natural
Massa específica (g/cm ³)	2,51 ± 0,00	2,61 ± 0,00
Massa específica aparente (g/cm ³)	2,14 ± 0,00	2,57 ± 0,00
Massa unitária (kg/m ³)	1256 ± 3,11	1600 ± 0,00
Volume de vazios (%)	41 ± 0,15	38 ± 0,00
Absorção de água (%)	6,91 ± 0,00	0,66 ± 0,00

Conforme pode ser visualizado na Tab.3, o agregado de RPC é mais leve e tem menor massa específica que o agregado natural. Essa diferença pode ser justificada pela maior porosidade do RPC em relação à areia, tendo em vista os valores obtidos para absorção de água (6,91% para o RPC e 0,66% para a areia) e pelos valores obtidos de massa específica e massa específica aparente dos dois agregados. De acordo com a NBR 16916:2021 [27], massa específica é a relação entre a massa do agregado seco e seu volume, excluindo poros permeáveis na mensuração do volume; já a massa específica aparente considera o volume dos poros permeáveis. Portanto, com os resultados obtidos, verifica-se que o RPC possui maior porosidade que o agregado miúdo natural. O valor mais baixo de massa unitária do RPC relaciona-se, por conseguinte, a menor massa específica dos agregados e pelo maior volume de vazios entre as partículas. No entanto, cabe mencionar que a diferença entre o volume de vazios dos dois agregados foi de apenas 3%. Tal fato pode ser explicado pelo RPC ter passado por um processo de cominuição que propiciou partículas poliedrais, apesar de mais rugosos que o agregado natural. A Fig.4 apresenta imagens feitas com estereoscópio óptico portátil (Festinght) do agregado miúdo reciclado.



Figura 4. Microscopia óptica do agregado miúdo reciclado

A Tab.4 apresenta os resultados referentes ao índice de consistência e a densidade de massa das argamassas.

Tabela 4. Resultados de densidade de massa aparente e consistência

Tipo de mistura	Densidade (g/cm ³)	Consistência (mm)	Desvio Padrão (mm)
REF	2,14	262,87	1,66
ARG20-SS	2,07	202,80	0,36
ARG20-SA	2,13	230,73	1,70
ARG20-S80A20C	2,09	228,00	6,59
ARG20-S50A50C	2,07	232,76	0,34

A massa específica dos agregados utilizados na mistura e o teor de ar incorporado nas argamassas são os fatores principais na obtenção da densidade de massa aparente das argamassas. As argamassas podem ser classificadas quanto à densidade no estado fresco em leve, normal e pesada [39] e todas as argamassas produzidas na pesquisa são classificadas como normais.

Ao analisar os resultados obtidos no ensaio de consistência pode-se perceber que a amostra ARG20-SS, a qual não possui nenhum tipo de tratamento, teve menor índice, devido às partículas serem muito porosas e absorverem mais água da mistura, tornando-a menos trabalhável.

Com base nos resultados obtidos nos ensaios de densidade de massa e de consistência percebe-se que os traços com RPC tratados com presença do cristalizante, ARG20-S50A50C e ARG20-S80A20C, apresentaram menor densidade e mantiveram consistência similares à mistura tratada somente com água (ARG20-SA). Quando comparados com a composição ARG20-SS, mantiveram sua densidade, mas diminuíram sua consistência. Esses resultados mostram que o tratamento com cristalizante inicialmente conseguiu diminuir a porosidade do RPC, pois dificultou a penetração de água nos poros, devido à manutenção da densidade quando comparado com ARG20-SS, e ao mesmo tempo, não absorveu água da mistura, pois manteve consistência similar à ARG20-SA. A Fig.5 apresenta os percentuais de retenção de água das amostras.

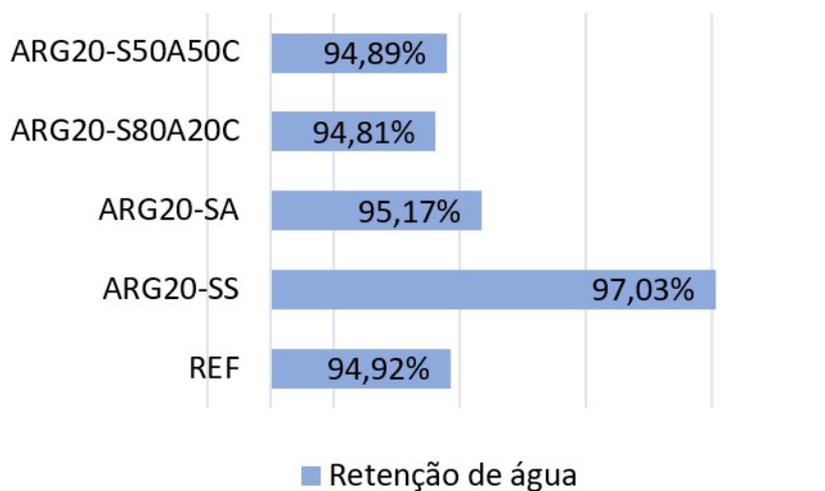


Figura 5. Determinação da retenção de água em argamassas

Segundo Carasek [39], a retenção de água possui grande importância, pois afeta os processos de acabamento, de retração plástica e favorece ou não as reações químicas dos aglomerantes no processo de endurecimento. Com base nos percentuais de retenção pode-se observar que o comportamento da amostra ARG20-SS, que não possui nenhum tipo de tratamento de saturação, teve a maior retenção de água das amostras analisadas. Tal resultado pode ser justificado pela menor quantidade de água livre na mistura, como evidenciado pelo resultado de consistência. Como o RPC tem maior porosidade e não passou por nenhum tratamento para minimizar seus efeitos, esse agregado absorve água da mistura deixando a consistência mais seca, e por conseguinte, menor quantidade de água livre para ser

absorvida durante o ensaio. Os resultados de retenção de água dos outros traços (ARG20-SA, ARG20-S80A20C e ARG20-S50A50C) apresentaram valores próximos entre si e com a REF, demonstrando assim resultados positivos quanto à retenção de água.

Os resultados obtidos no ensaio de capilaridade estão apresentados pelos valores médios encontrados no ensaio, conforme Fig.6.

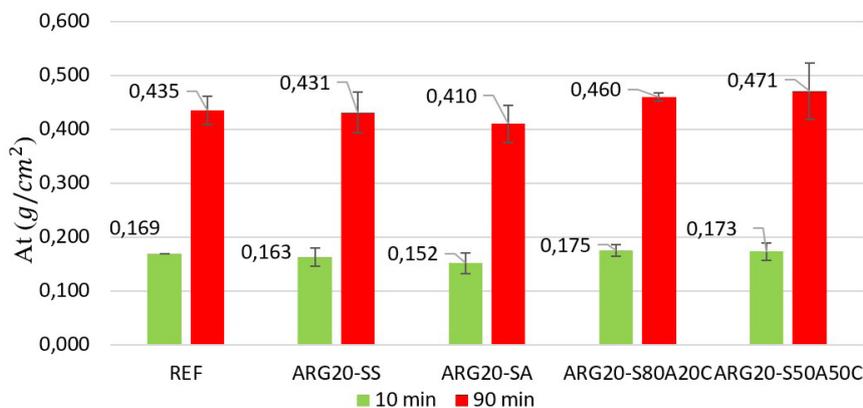


Figura 6. Determinação da absorção de água por capilaridade

Considerando os ensaios de absorção de água por capilaridade aos 10 e aos 90 min, e com base na análise de variância (ANOVA), constatou-se que as argamassas com substituição parcial de agregado miúdo natural por RPC com os distintos tratamentos de saturação não tiveram resultados significativos, isto é, não influenciaram nos resultados de absorção de água. Portanto, considera-se que a substituição com os distintos tratamentos foi eficiente.

A Tab.5 apresenta os resultados de coeficiente de capilaridade, obtido conforme os parâmetros da NBR 15259:2005 [36].

Tabela 5. Coeficientes de capilaridade

Tipo de mistura	Coefficiente de capilaridade (g/dm ² ·min ^{1/2})	Desvio padrão (g/dm ² ·min ^{1/2})
REF	4,267	0,416
ARG20-SS	4,300	0,360
ARG20-SA	4,133	0,351
ARG20-S80A20C	4,567	0,153
ARG20-S50A50C	4,767	0,651

Após análise estatística por meio da ANOVA, constatou-se que as amostras não apresentaram diferenças significativas nos resultados para o coeficiente de capilaridade. Para Metha e Monteiro [40], o tamanho e a continuidade dos poros controlam a absorção de água por capilaridade e o coeficiente de capilaridade em argamassas endurecidas. Os resultados obtidos justificam-se pelos seguintes itens: o agregado natural tem menor porosidade; o RPC sem tratamento (SS) absorveu água da mistura, conforme já discutido nos resultados da argamassa fresca, portanto, minimizando a capilaridade. E nas outras três misturas (ARG20-SA, ARG20-S80A20C, ARG20-S50A50C), o RPC passou previamente por tratamentos para atenuar a porosidade, que por conseguinte, diminuíram também a capilaridade. Assim sendo, os resultados de absorção de água por capilaridade e coeficiente de capilaridade apresentaram resultados promissores.

O índice de vazios pode ser considerado a relação entre o volume dos poros permeáveis e o volume total da amostra. Os resultados obtidos para absorção de água e índice de vazios podem ser vistos na Fig.7.

De acordo com a NBR 9778:2009 [37], a absorção de água consiste no processo pelo qual a água é conduzida e tende a ocupar os poros permeáveis de um corpo sólido poroso. Analisando os resultados obtidos, pode-se perceber que as amostras com maiores percentuais de índices de vazios resultaram

nos maiores percentuais de absorção de água. Houve uma pequena variação entre as amostras com distintos tratamentos de saturação, porém há um aumento significativo quando comparadas com a amostra referência. Segundo Roig-Flores [41], a presença do aditivo misturado à argamassa durante o processo de cura pode causar reações internas que afetam o efeito de cristalização, pois ambas utilizam a água para o processo. Desta forma, a cristalização do produto juntamente com a reação do hidróxido de cálcio pode ser responsável pela maior absorção de água das amostras com cristalizante.

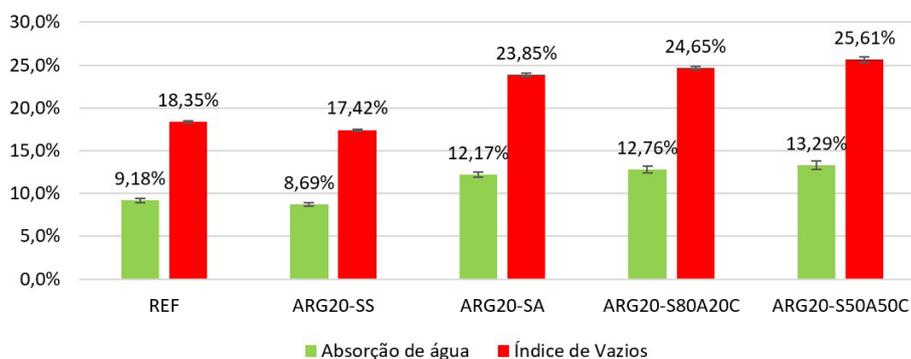


Figura 7. Determinação da absorção de água e índice de vazios

A Fig.8 apresenta os resultados obtidos nas propriedades mecânicas de resistência à tração na flexão, compressão e módulo de elasticidade das argamassas.

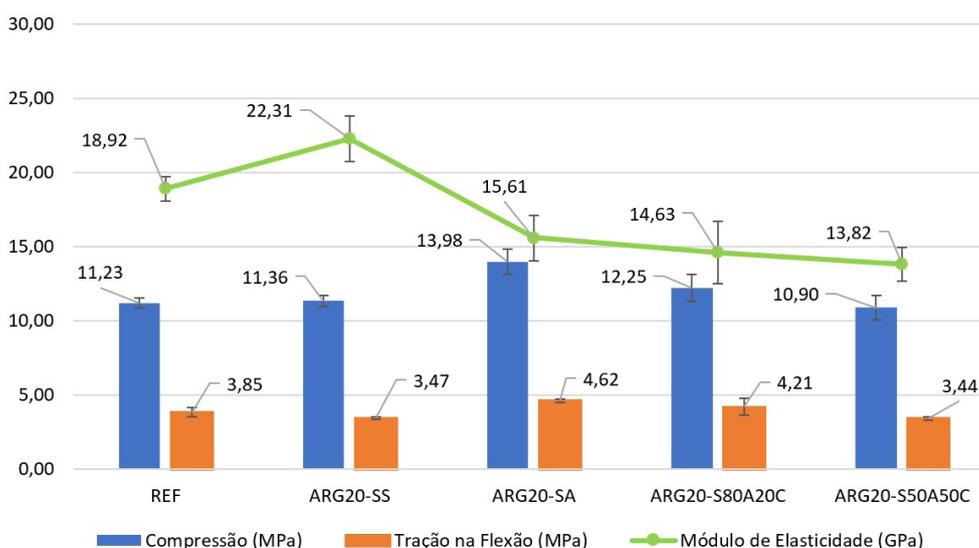


Figura 8. Caracterização mecânica das argamassas

Considerando os resultados obtidos, foi realizada a análise de variância ANOVA de fator único, observando-se com 95% de confiabilidade que houve variações significativas nos resultados dos três ensaios realizados.

Pelo teste de Tukey ($p=0,000142449$), pôde-se concluir que a amostra ARG20-SA, produzida com 80% do teor de absorção do RPC, obteve os resultados mais altos na resistência à compressão. Cabe salientar que pelo resultado da argamassa REF os resultados obtidos mostraram o potencial da substituição do RPC com os distintos tratamentos de absorção, pois em média apresentaram valores similares e maiores que o REF.

Em se tratando da resistência à tração na flexão, a amostra ARG20-SA novamente se destacou, porém havendo diferença significativa somente quando comparada com as amostras ARG20-SS e com a ARG20-S50A50C. Segundo Metha e Monteiro [40], o tamanho e a continuidade dos poros relacionam-se inversamente com a resistência mecânica, no entanto, nesta pesquisa a ARG20-SA,

que não apresentou o menor índice de vazios e absorção de água, foi a que apresentou os maiores valores de resistência à compressão e à tração.

No ensaio de módulo de elasticidade pelo teste de Tukey, pôde-se perceber que a amostra ARG20-SS tem diferença significativa quando comparada com as amostras ARG20-SA, ARG20-S80A20C e ARG20-S50A50C. Porém, tratando-se de módulo de elasticidade, considera-se um valor alto como um resultado ruim para argamassas de revestimento, como citado por Dutra [14], devido à baixa maleabilidade frente às movimentações térmicas e higroscópicas às quais ficam tradicionalmente expostas. Houve também uma diferença entre as amostras ARG20-S80A20C e ARG20-S50A50C, que diminuíram o módulo de elasticidade quando comparadas ao traço REF.

O módulo de elasticidade relaciona-se com a distribuição dos poros, conectividade e porosimetria no interior da argamassa, e segundo Santos et al. [42], agregados leves, mais porosos, definem a rigidez da mistura, pois controlam a capacidade de deformação da matriz. Aliado a isso, tem-se neste estudo o preenchimento dos poros de forma parcial e total com água e água com cristalizante em dois percentuais de solução, fatores esses que interferem na deformação da argamassa endurecida.

4. CONCLUSÕES:

De modo geral, todas as substituições de 20% de agregado miúdo por resíduos de placas cerâmicas com distintos tratamentos de saturação obtiveram resultados satisfatórios. O resíduo de placa cerâmica possui uma alta porosidade, que pôde ser controlada pelos processos de saturação executados; acredita-se que a adequação da faixa de tamanho do RPC resultou em alta significância nos resultados, confirmando a citação de trabalhos anteriores.

Contudo, percebe-se que não houve influência nos resultados de absorção de água por capilaridade e no coeficiente de capilaridade quando comparadas com a amostra referência. Tal fato pode ser considerado como positivo, pois não alterou as propriedades físicas das amostras estudadas. Porém, houve um aumento significativo da absorção de água e do índice de vazios das argamassas; tal resultado ocorreu em decorrência da diferença do teor dos finos dos agregados, apontada também por outros autores.

As propriedades mecânicas indicaram um aumento na resistência à compressão; na resistência à tração na flexão não houve resultados significativos quando comparados com as amostras referência (pode-se considerar um resultado satisfatório). Já no módulo de elasticidade pôde-se perceber uma diferença significativa nos resultados nas amostras com distintos tratamentos de saturação, porém são somente significativas quando comparadas entre si. E quando comparadas com a amostra REF, as amostras ARG20-S80A20C e ARG20-S50A50C tiveram valores menores, considerados positivos para argamassas de revestimento.

De modo geral, a substituição parcial de agregado miúdo natural por resíduos de placas cerâmicas com distintos tratamentos de saturação teve resultados satisfatórios. O estudo gera sugestões para trabalhos futuros que levem em consideração outras variáveis, como a substituição de agregado em diferentes percentuais, a possibilidade de tratamentos de saturação alternativos, bem como também o uso do aditivo cristalizante em diferentes dosagens, sendo aplicado no resíduo em diferentes formas, podendo analisar a influência do aditivo nas partículas após algumas horas ou até dias. Recomenda-se, também, a saturação com o aditivo cristalizante em agregados graúdos reciclados, ou somente o uso do agregado graúdo na produção de concretos. Pode ser realizado um estudo de viabilidade da produção de agregados miúdos a partir de resíduos de placas cerâmicas.

REFERÊNCIAS:

- [1] IPEA, 2020. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada www.ipea.gov.br
- [2] UNEP, 2016. Global material flows and resource productivity: Assessment report for the UNEP international resource panel. Paris: United Nations Environment Programme.
- [3] Brasil, 2022. Conselho Internacional da Construção. <https://memoria.ebc.com.br/conselho-internacional-da-construcao>
- [4] Sutherland W J, Barnard P, Broad S, Clout M, Connor B, Côté I M, Ockendon N A, 2017. Horizon scan of emerging issues for global conservation and biological diversity. *Trends in Ecology and Evolution* 32, 1, 31-40, 2017.
- [5] Lucas D, Benatti C T, 2008. Utilização de resíduos industriais para a produção de artefatos cimentícios e argilosos empregados na construção civil. *Revista em Agronegócios e Meio Ambiente* 1.

- [6] Ribeiro D V, Morelli M R, 2009. Resíduos sólidos: Problemas ou oportunidade? Rio de Janeiro: Interciência.
- [7] Nagalli A, 2014. Gerenciamento de resíduos sólidos na construção civil. São Paulo: Oficina de Textos.
- [8] Guo Y, Xie J, Zhao J, Zuo K, 2019. Utilization of unprocessed steel slag as fine aggregate in normal- and high-strength concrete. *Construction and Building Materials* 204, 41-49.
- [9] Yuan H, 2012. A model for evaluating the social performance of construction waste management. *Waste Management* 32, 6, 1.218-1.228.
- [10] Caraseck H, Girardi A C C, Araújo 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. Goiânia: Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Goiás.
- [11] ANFACER, 2022. História da cerâmica. Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica para Revestimentos, Louças Sanitárias e Congêneres. <http://www.anfacer.org.br>
- [12] SINDICERAM, 2023. Sindicato das Indústrias de Cerâmica de Criciúma. <http://www.sindiceram.com.br>
- [13] Jiménez J R, Ayuso J, López M, Fernández J M, De Brito J M C L, 2013. Use of fine recycled aggregates from ceramic waste in masonry mortar manufacturing. *Construction and Building Materials* 40, 679-690.
- [14] Dutra J D F. Levantamento bibliográfico de análises da influência do resíduo proveniente de materiais cerâmicos em argamassas. Monografia. UFMG, 2019.
- [15] Gomes P C C, Santos M G C, Felix S S, Dos Santos R B, 2010. Obtenção de argamassas com agregados reciclados produzidos na obra para uso em revestimento. Canela, RS, Brasil: XIII ENTAC, Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído.
- [16] Etxeberria M, Vegas I, 2015. Effect of fine ceramic recycled aggregate (RA) and mixed fine RA on hardened properties of concrete. *Magazine of Concrete Research* 67, 12, 645-655.
- [17] Alves A V, Vieira T F, De Brito J, Correia J R, 2014. Mechanical properties of structural concrete with fine recycled ceramic aggregates. *Construction and Building Materials* 64, 103-113.
- [18] Debieb F, Kenai S, 2008. The use of coarse and fine crushed bricks as aggregate in concrete. *Construction and Building Materials* 22, 886-893.
- [19] 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. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212021000100495>
- [20] De Brito J, Pereira A S, Correia J R, 2005. Mechanical behaviour of nonstructural concrete made with recycled ceramic aggregates. *Cement and Concrete Composites* 27, 4, 429-433.
- [21] Takagi E M, Almeida W J, Oliveira F S, 2007. Tratamento químico cristalizante para impermeabilização e proteção de estrutura de concreto armado. Florianópolis: 45 Congresso Brasileiro do Concreto.
- [22] NBR 13006, 2020. Placas cerâmicas: Definições, classificação, características e marcação. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [23] Motta J F M, Christofoletti S R, Garcez L L, Floreêncio R V D S, Boschi A O, Moreno M M T, Cuchierato G, Zanardo A, 2004. Características do polo de revestimentos cerâmicos de Santa Gertrudes, SP, com ênfase na produção de argilas. *Cerâmica Industrial* 9, 1, 7-13.
- [24] 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: Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Santa Catarina.
- [25] NBR 7211, 2009. Agregados para concreto: Especificação. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [26] NBR NBR 17054, 2022. Agregados: Determinação da composição granulométrica. Método de ensaio. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [27] NBR NBR 16916, 2021. Agregado miúdo: Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [28] NBR NBR 16972, 2021. Agregados: Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] Bautech Brasil, 2020. Aditivos para argamassas e concretos. <https://bautechbrasil.com.br/produtos/>
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] NBR 8522, 2017. Concreto: Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [36] NBR 15259, 2005. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

- [37] 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.
- [38] NBR 7215, 2019. Cimento Portland: Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [39] Carasek H, 2007. Argamassas. In: Isaia G C. Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia dos materiais. São Paulo: Arte Interativa 26, 863-904.
- [40] Mehta P K, Monteiro P J M, 2008. Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais. 3ª ed. São Paulo: Arte Interativa.
- [41] Roig Flores M. Study of the feasibility of self-healing concrete with and without crystalline admixtures. Universitat Politècnica de València, 2016.
- [42] Santos A M D, Cabral L M C, Monteiro E B, Helene P R D L, 2013. Análise do módulo de elasticidade estático e dinâmico para diferentes dosagens de concreto. In: 55 Congresso Brasileiro de Concreto. Florianópolis: Ibracon 1-13.