

EFEITO DA ADIÇÃO DO RESÍDUO DO POLIMENTO DE PORCELANATO – RPP NA DURABILIDADE DE ARGAMASSA DE REVESTIMENTO

Elis Machado de Oliveira (1), Camila Machado de Oliveira (2), Elaine Guglielmi Pavei
Antunes (3)

UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense

(1)elismdeoliveira@hotmail.com, (2)machadodeoliveirac@gmail.com, (3)elainegpa@unesc.net

RESUMO

As indústrias cerâmicas produzem grande quantidade de resíduos que precisa ser descartada em aterros sanitários, gerando custo para as empresas e afetando o meio ambiente. Práticas de reciclagem vêm sendo estudadas para inserir esses materiais em concretos e argamassas, criando um produto sustentável. Considerando as características do resíduo do polimento de porcelanato (RPP), como finura e composição química, foi avaliado o seu potencial como material pozolânico para fabricação de argamassas de revestimento a fim de melhorar suas propriedades como durabilidade e resistência mecânica. Corpos de prova, preparados com 10% e 20% de substituição de parte do cimento pelo resíduo e também com 10% e 20% de adição do resíduo em relação à massa de cimento, além de amostras de referência, foram submetidos ao ensaio de envelhecimento acelerado. O método consistiu em ciclos alternados de imersão em solução de cloreto de sódio (5% em massa) e submissão à temperatura elevada (71 °C). Após as imersões, avaliou-se a absorção de solução por parte dos corpos de prova. A resistência à compressão pré-envelhecimento determinada para a argamassa com adição de 20% se mostrou superior à resistência das amostras de referência. Estatisticamente, os corpos de prova com substituição de 20% e adição de 10% apresentaram resistência semelhante àquela observada para a argamassa sem resíduo. Os resultados obtidos pós-envelhecimento revelaram que as resistências mecânicas das argamassas não foram afetadas pelo ensaio. Os percentuais de absorção de solução de cloreto de sódio para as composições que continham o RPP foram inferiores quando comparados à referência, comprovando que o resíduo tem a capacidade de diminuir a absorção. Esse efeito viabiliza o uso do material em locais com classe de agressividade elevada.

Palavras-Chave: Resíduo do polimento de porcelanato. Material pozolânico. Resistência mecânica. Envelhecimento.

1. INTRODUÇÃO

A fabricação do porcelanato exige uma etapa de polimento, que tem como objetivos nivelar, remover riscos e defeitos, além de dar brilho a peça. Esse processo resulta em uma grande quantidade de resíduo que deve ser descartada em aterros sanitários (MARQUES et al., 2007). A indústria de revestimentos cerâmicos tem

participação significativa na produção desse resíduo. Estima-se que as empresas localizadas no sul do Estado de Santa Catarina geram 1.000 toneladas por semana (JACOBY e PELISSER, 2015).

Além dos altos valores econômicos relacionados com a deposição do material em aterros, surgem também os problemas ambientais que envolvem a contaminação do solo e do lençol freático e o ataque à vegetação do local. A reutilização e a reciclagem são recursos para resíduos industriais, incluindo o gerado no polimento de porcelanato. Elas resultam na redução de custos, na preservação dos recursos naturais não renováveis e reduzem a emissão de poluentes para o meio ambiente (BERNARDIN et al., 2006a).

Os materiais de construção, especialmente o concreto, têm motivado o interesse da reciclagem de resíduos industriais. A tecnologia simples aplicada em sua mistura, o grande volume produzido, a uniformidade e o crescimento do número de obras são fatores de incentivo (BIGNOZZI e SACCANI, 2012).

A produção de argamassas e concretos mais econômicos, duráveis e sustentáveis é de extrema importância, pois há um grande consumo de energia na fabricação do cimento Portland. A aplicação de materiais cimentícios suplementares (MCS) é uma alternativa para melhorar a eficiência do processo (MOESGAARD et al., 2011). MCS são elementos como cinzas volantes, cimentos de alto-forno, sílica ativa, metacaulim e outros materiais pozzolânicos misturados ao cimento ou acrescentados na dosagem, sendo a eficiência dependente de sua composição química, finura e da quantidade de fases amorfas existentes (PELISSER et al., 2012).

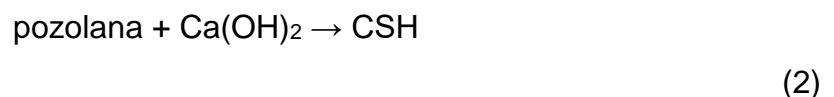
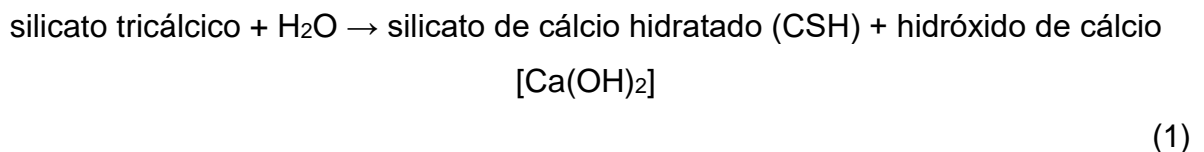
O resíduo do polimento de porcelanato (RPP) é uma suspensão aquosa composta pela mistura de restos de porcelanato e sobras de abrasivos. O processo de polimento é realizado por máquinas automatizadas, com sistema de refrigeração com água, que utilizam carboneto de silício e partículas de diamante para retirar cerca de 1 mm da superfície da peça (JACOBY e PELISSER, 2015). O resíduo produzido é coletado, armazenado e filtrado em estações de tratamento de efluentes para remover a água residual e transformá-lo em lama, criando um subproduto que pode ser encaminhado para a reciclagem ou para os aterros (RAMBALDI et al., 2007).

Os porcelanatos apresentam uma densa microestrutura e baixa porosidade fechada, sendo caracterizados por uma fase cristalina secundária constituída de mulita e

crystalos de quartzo incorporados em uma fase vítrea. Essa fase é composta de vidro silicoso que contém principalmente óxidos alcalinos e alcalinos terrosos de potássio, sódio e magnésio com um baixo ponto de fusão, assim como o “grés porcelanato”, que é queimado a 1200 °C durante 40-50 minutos. Por essas duas características, material vítreo com um ponto de fusão relativamente baixo, os porcelantos podem ser reciclados para utilização em novos produtos (BERNARDIN et al., 2006b).

As propriedades físico-químicas do resíduo do polimento de porcelanato mostram sua atividade pozolânica, além de seu uso como enchimento. As altas concentrações de sílica e alumina favorecem a reação pozolânica durante a hidratação, aumentando esse efeito em cimento Portland (WILD et al., 1996).

A resistência e outras propriedades do concreto e argamassa são garantidas pelo silicato de cálcio hidratado (CSH) produzido durante a hidratação do cimento Portland. A reação pozolânica é a reação entre a pozolana e o hidróxido de cálcio, formando o CSH (Reações 1 e 2).



No decorrer da reação pozolânica, três fatos principais são importantes: (i) a reação é lenta, e conseqüentemente a taxa de liberação de calor e ganho de resistência também; (ii) o consumo de hidróxido de cálcio eleva a durabilidade do concreto em ambientes ácidos e (iii) as pesquisas a respeito da distribuição dos tamanhos de poros em cimentos hidratados revelam que os produtos da reação são mais eficazes no preenchimento dos vazios capilares, o que contribui para o ganho de resistência e redução da permeabilidade. O uso de pozolanas em concretos com cimento Portland também aumenta a trabalhabilidade do material e a resistência à fissuração, em virtude da redução da reação álcali-agregado, e fornece maior durabilidade (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

Ao estudar a viabilidade de uma adição pozolânica no cimento Portland, é necessário verificar se esta não altera nenhuma propriedade de forma negativa,

principalmente quando se trata de durabilidade de concretos e argamassas, que interfere diretamente na vida útil de uma estrutura (SANTOS, 2006).

O desempenho inadequado de estruturas relativamente novas exigiu que estudos mais aprofundados fossem realizados para o aumento da durabilidade e vida útil das mesmas e, conseqüentemente, dos materiais que a compõem (SILVA, 2015).

As argamassas de revestimento são responsáveis por proteger a edificação, sendo fundamental que elas apresentem capacidade de preservar sua forma original, qualidade e resistência às solicitações no decorrer do tempo quando sujeitas à condições normais de uso (ABCP, s.d.).

Para Santos (2006), a durabilidade do material está associada às degradações sofridas por ele. Segundo Mehta e Gerwich (1982) apud Santos (2006), suas causas são classificadas em físicas e químicas. As causas físicas são subdivididas em: desgaste superficial ocasionado pela abrasão, erosão ou cavitação; fissuração como resultado de gradientes de temperatura e umidade, pressão de cristalização de sais nos poros, carregamento estrutural e exposição a extremos de temperatura, como congelamento e fogo. As causas químicas ocorrem em virtude da hidrólise dos componentes da pasta de cimento por água pura; trocas iônicas entre fluidos agressivos e a pasta de cimento; reações causadoras de produtos expansíveis, como corrosão da armadura no concreto, expansão por sulfato e reação álcali-agregado.

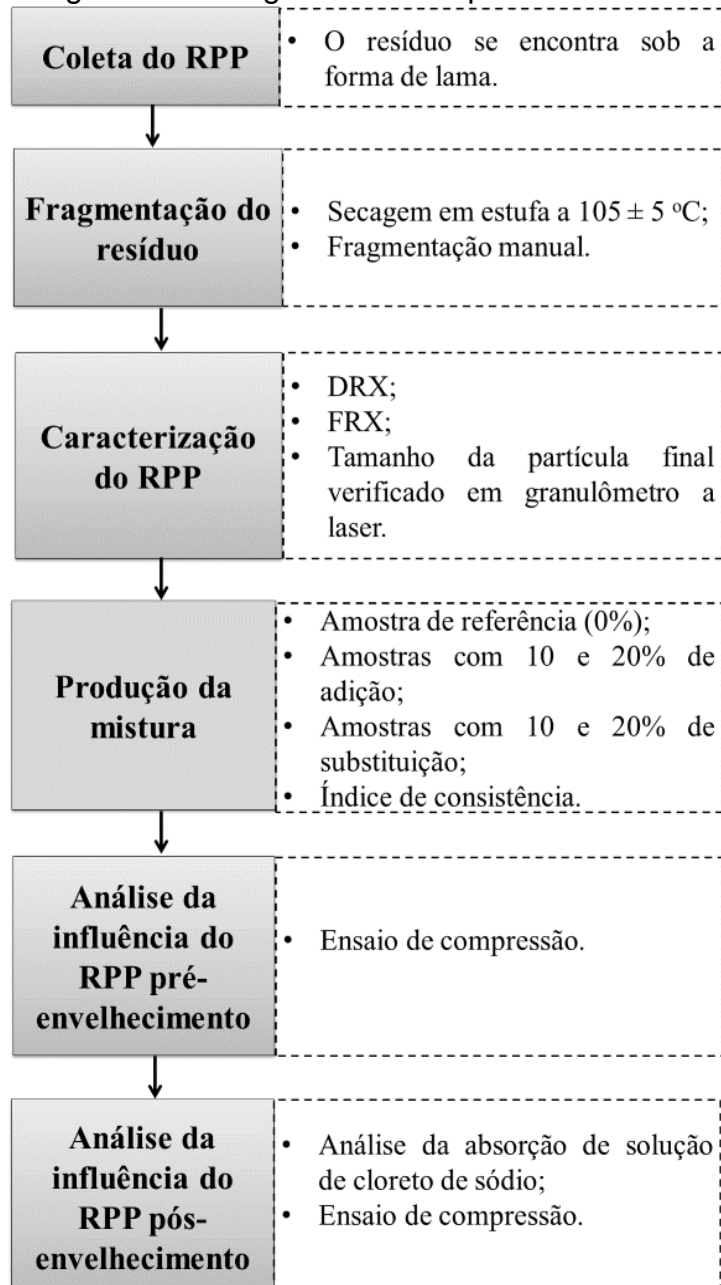
Guedert (1989) apud Santos (2006) diz que a adição de pozolana ao cimento proporciona a redução de sua permeabilidade, diminuindo o diâmetro dos poros da pasta hidratada e, por consequência, o ataque do material por substâncias externas, como cloretos e sulfatos.

Com base nas informações relatadas, o presente trabalho busca avaliar a influência da adição do resíduo do polimento de porcelanato na durabilidade de argamassa. O RPP será caracterizado quanto a sua atividade pozolânica e adições e substituições, em percentuais de 10% e 20% de resíduo em relação à massa de cimento, serão avaliadas. Como a pozolana apresenta capacidade de diminuir o tamanho dos poros, verificar-se-á se o material reduz a absorção de corpos de prova imersos em solução de cloreto de sódio e se mantém a resistência mecânica à compressão de argamassas submetidas a ensaio de envelhecimento acelerado.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

As principais etapas do procedimento experimental adotado neste trabalho encontram-se no fluxograma da Figura 1.

Figura 1 - Fluxograma das etapas do trabalho.



Fonte: Do autor, 2016.

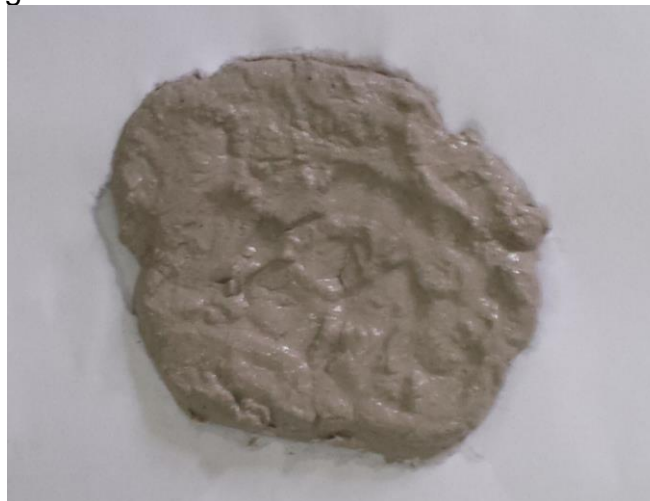
Para avaliar a influência do uso do resíduo do polimento de porcelanato nas propriedades dos materiais cimentícios, produziram-se argamassas com adição de RPP e substituição de parte do cimento por ele, verificando o efeito do resíduo sobre

a compressão antes e após o envelhecimento, bem como a absorção de solução de cloreto de sódio durante este processo.

O resíduo, coletado em uma empresa situada no município de Criciúma/SC (Figura 2), foi seco em estufa a 105 ± 5 °C e passou por desaglomeração manual. Na sequência, o RPP foi peneirado em malha com abertura de 45 μm para atender a NBR 12653 (2014) e caracterizado por:

- Difractometria de raios X (DRX) para determinar as espécies cristalinas. Difratorômetro marca Shimadzu, modelo XRD-6000, goniômetro theta theta, radiação k- α com tubo de cobre de comprimento de onda (λ) de 1,5406 Å operando com 25 kV de voltagem e 25 mA de corrente elétrica. Equipamento pertencente ao Instituto de Engenharia e Tecnologia (IDT/UNESC). A análise foi realizada entre 3 e 80° com tempo de leitura de 2°/min;
- Espectrometria de fluorescência de raios X (FRX). Para especificar a composição química do resíduo, utilizou-se um espectrômetro de raios X por dispersão de comprimento de onda - WDXRF - Axios Max Panalytical do Laboratório de Desenvolvimento e Caracterização de Materiais (LDCM/SENAI_{SC}/Criciúma - CTCmat);
- Granulometria a laser, granulômetro a laser Cilas 1064 do Laboratório de Desenvolvimento e Caracterização de Materiais (LDCM/SENAI_{SC}/Criciúma - CTCmat), para verificar o tamanho de partícula final do RPP.

Figura 2 – Resíduo coletado sob a forma de lama.



Fonte: Do autor, 2016.

Executou-se a produção da argamassa no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC), pertencente ao IDT/UNESC, conforme a NBR 13276 (2005), adotando um traço de referência de 1: 3: 0,48 (cimento: areia: água/cimento, em massa), com adição do resíduo de 0, 10 e 20% e substituição de 10 e 20% de cimento pelo resíduo. Os materiais empregados foram o cimento CP II Z 32 e a areia lavada média com finura de 2,2 mm, sendo modificada a relação água/cimento para manter constante o índice de consistência *flow-table* em (260 ± 5) mm. A Tabela 1 apresenta os traços aplicados nos experimentos.

Tabela 1 - Traços das composições.

Tipo de mistura	Composição unitária em massa (cimento: areia: resíduo)
Referência	1: 3: 0
10% de substituição	0,90: 3: 0,10
10% de adição	1: 3: 0,10
20% de substituição	0,80: 3: 0,20
20% de adição	1: 3: 0,20

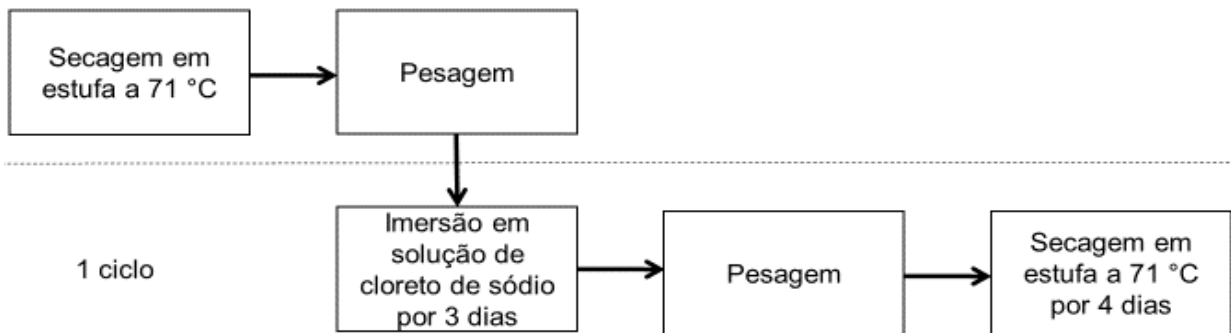
Fonte: Do Autor, 2016.

Para determinar a resistência à compressão, para cada composição da Tabela 1 foram confeccionados três corpos de prova cilíndricos com tempo de cura de vinte e oito dias, com dimensões de 5 x 10 cm. Antes do rompimento, os corpos de prova passaram por um processo de capeamento com uma mistura de cimento CP II Z 32 e água com consistência de pasta. O equipamento utilizado para rompimento dos corpos de prova foi a prensa EMIC PC200CS, com velocidade de carregamento de $0,25 \pm 0,05$ MPa/s, situado no LMCC do IDT/UNESC. Todo o procedimento foi realizado conforme prescreve a ABNT NBR 7215 (1996).

Para o ensaio de envelhecimento acelerado, prepararam-se, para cada composição da Tabela 1, três corpos de prova cilíndricos com dimensões de 5 x 10 cm curados por vinte e oito dias. Posteriormente, estes foram secos em estufa microprocessada de secagem, modelo Q317M-32 a (71 ± 1) °C, sendo a temperatura baseada no trabalho de Brasileiro et al. (2000). Na sequência, foram pesados e imersos em uma

solução de cloreto de sódio (5% em massa) por um período de três dias. A conclusão do ciclo de envelhecimento, fundamentado no trabalho de Lima et al. (2001), se deu pelo retorno das amostras a estufa por quatro dias. Repetiu-se o ciclo por mais quatro vezes. A Figura 3 exemplifica o ciclo adotado.

Figura 3 – Fluxograma representativo do ciclo de envelhecimento.



Fonte: Do autor, 2016.

Determinou-se a capacidade de absorção das argamassas pela aplicação da Equação 3, definida na ABNT NBR 9778 (2005).

$$\frac{M_{sat} - M_s}{M_s} \times 100 \quad (3)$$

Onde

M_{sat} : massa do corpo de prova saturado e

M_s : massa do corpo de prova seco em estufa.

Para verificar a resistência final dos corpos de prova, estes foram submetidos ao ensaio de compressão seguindo os procedimentos da ABNT NBR 7215 (1996).

A resistência mecânica das amostras com adições e substituições foi comparada com a de referência pelos testes para comparação de duas variâncias (Teste F) e teste para comparação de duas médias (Teste t). Os mesmos procedimentos estatísticos foram adotados para confrontar os dados antes e após o ensaio de envelhecimento acelerado. Para as análises, empregou-se o *software Excel*.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO

O resíduo do polimento de porcelanato é apresentado na Figura 4. Sua distribuição de tamanho de partícula (Figura 5A) demonstrou que 100% da amostra apresenta diâmetro inferior a 45 μm , respeitando o que determina a ABNT NBR 12653 (2014). Desta, 90% ficou abaixo de 23,47 μm , 50% inferior a 7,30 μm e 10% abaixo de 1,65 μm , resultando em um diâmetro médio de 10,21 μm .

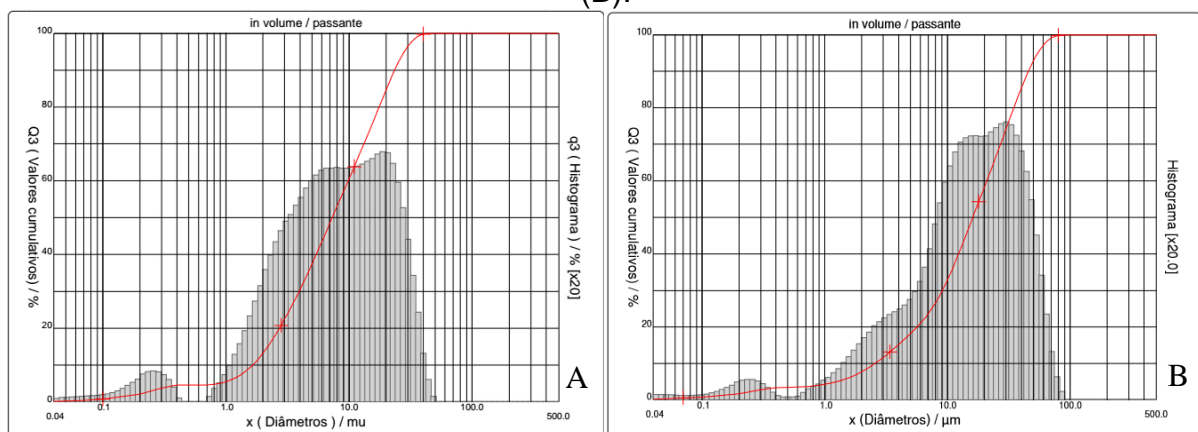
A distribuição do tamanho de partícula do cimento (Figura 5B) evidenciou que 100% da amostra apresenta diâmetro inferior a 90 μm , sendo que 90% dela está abaixo de 45,72 μm , 50% inferior a 16,08 μm e 10% abaixo de 2,56 μm . O diâmetro médio obtido foi de 20,70 μm , valor duas vezes superior ao diâmetro médio do RPP.

Figura 4 - Resíduo após a fragmentação manual.



Fonte: Do autor, 2016.

Figura 5 - Curvas de distribuição de tamanho de partícula do RPP (A) e do cimento (B).



Fonte: Do autor, 2016.

O resíduo do polimento de porcelanato estudado apresenta como componentes predominantes a sílica e a alumina, com percentuais de participação de 70,03% e 18,74%, respectivamente. Esse resultado constata, conforme a ABNT NBR 12653 (2014), que o RPP é um material pozolânico, pois a soma de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ é superior a 70% (89,76%). A Tabela 2 traz a análise química do resíduo do polimento de porcelanato.

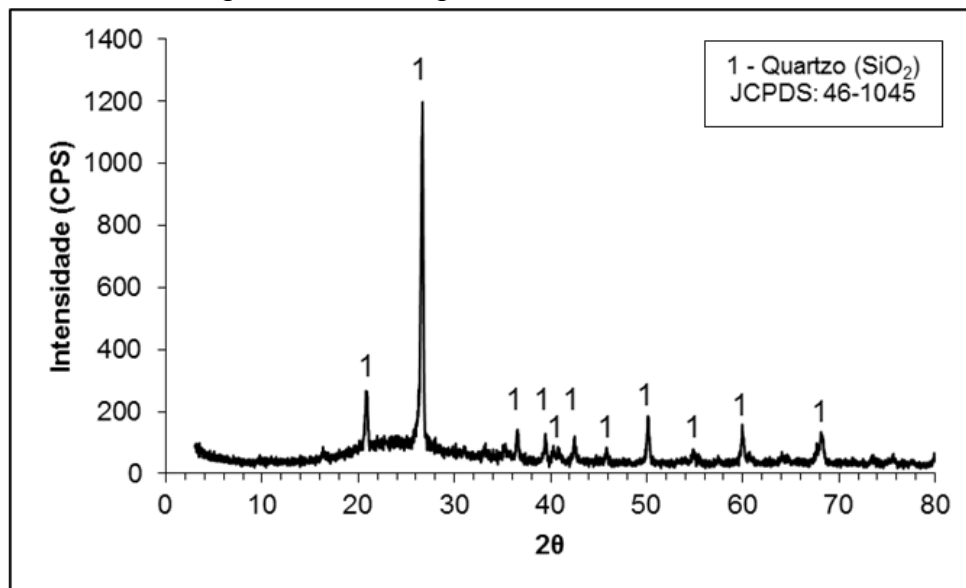
Tabela 2 - Análise química da amostra de RPP.

Elementos	Teor (%)
Al_2O_3	18,74
CaO	1,13
Fe_2O_3	0,99
K_2O	1,75
MgO	2,28
MnO	< 0,05
Na_2O	2,60
P_2O_5	0,06
SiO_2	70,03
TiO_2	0,22
B_2O_3	-
Li_2O	-
BaO	0,21
Co_2O_3	< 0,01
Cr_2O_3	< 0,01
PbO	< 0,01
SrO	< 0,01
ZnO	< 0,01
$\text{ZrO}_2 + \text{HfO}_2$	0,09
Perda ao fogo	1,70

Fonte: Do Autor, 2016.

O difratograma da Figura 6 indica que o RPP é um material reativo, pois apresentou um halo amorfo acentuado na região entre 2 theta igual a 18° e 36° . Foram identificados na amostra picos relativos a fase cristalina quartzo, SiO_2 (JCPDS: 46-1045), concordando com a análise química, que indicou a presença de 70,03% de sílica no resíduo.

Figura 6 - Difratoograma de raios X do RPP.



Fonte: Do autor, 2016.

3.2. ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA

A Tabela 3 demonstra que o índice de consistência das argamassas produzidas com percentuais de 10% e 20% de adição e substituição mantiveram-se constante, respeitando o valor de 260 ± 5 mm *flow-table* estabelecido pela ABNT NBR 13276 (2005). Nota-se que em virtude do acréscimo de material fino (aumento do percentual de RPP incorporado) foi necessário adicionar mais água para atender a trabalhabilidade desejada.

Tabela 3 - Relação água/cimento e índice de consistência.

Tipos de mistura	Relação água/cimento	Índice de consistência ($\pm 0,01$ mm)
Referência	0,48	260,36
10% de substituição	0,48	264,47
10% de adição	0,50	255,93
20% de substituição	0,50	261,53
20% de adição	0,53	262,47

Fonte: Do Autor, 2016.

3.3. RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão estão dispostos na Tabela 4.

Tabela 4 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão.

Condição	Tipo de mistura	Resistência à compressão (MPa)				
		Réplica I	Réplica II	Réplica III	Média	Desvio padrão
Pré-envelhecimento	Referência	31,74	33,74	33,78	33,09	1,16
	10% de substituição	27,71	29,18	29,46	28,78	0,94
	20% de substituição	31,89	30,92	31,24	31,35	0,49
	10% de adição	39,73	34,24	33,56	35,85	3,38
	20% de adição	36,13	37,99	39,16	37,76	1,53
Pós-envelhecimento	Referência	37,24	35,95	41,30	38,16	2,79
	10% de substituição	30,50	38,77	36,63	35,30	4,30
	20% de substituição	34,13	38,59	40,20	37,64	3,14
	10% de adição	29,25	44,19	48,51	40,65	10,11
	20% de adição	36,34	47,97	45,97	43,43	6,22

Fonte: Do Autor, 2016.

3.3.1. Análise da resistência à compressão pré-envelhecimento

Os testes estatísticos para comparação entre as amostras com adição/substituição e a referência (pré-envelhecimento) encontram-se nas Tabelas 5 e 6. As análises foram conduzidas ao nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$) e adotaram-se como hipóteses:

Teste F

H_0 : $S_1 = S_2$; a variância da resistência à compressão da amostra de referência (S_1) é igual à variância da resistência à compressão das amostras com adição/substituição (S_2).

H_1 : $S_1 \neq S_2$; a variância da resistência à compressão da amostra de referência (S_1) é diferente da variância da resistência à compressão das amostras com adição/substituição (S_2).

Teste t

$H_0: \mu_1 = \mu_2$; a média da resistência à compressão da amostra de referência (μ_1) é igual à média da resistência à compressão das amostras com adição/substituição (μ_2).

$H_1: \mu_1 \neq \mu_2$; a média da resistência à compressão da amostra de referência (μ_1) é diferente da média da resistência à compressão das amostras com adição/substituição (μ_2).

Tabela 5 - Teste F: duas amostras para variâncias.
Resultados para as adições e substituições.

S_1	S_2	F	Valor p (F ≤ f) bi-caudal
Referência	10% de substituição	1,5397	0,7875
	20% de substituição	5,5691	0,3045
	10% de adição	0,1189	0,2125
	20% de adição	0,5827	0,7363

$\alpha = 0,05$.

Fonte: Do Autor, 2016.

Segundo a Tabela 5, para todas as comparações realizadas, aceita-se H_0 . Não há evidências estatísticas - ao nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$) - de que as variâncias não são equivalentes, pois o Valor p ($F \leq f$) > α . Assim, o Teste t aplicado pressupõe essa equivalência.

Tabela 6 - Teste t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes.
Resultados para as adições e substituições.

μ_1	μ_2	T	Valor p (T ≤ t) bi-caudal
Referência	10% de substituição	4,9755	0,0076
	20% de substituição	2,3744	0,0764
	10% de adição	-1,3343	0,2530
	20% de adição	-4,2107	0,0136

$\alpha = 0,05$.

Fonte: Do Autor, 2016.

Na Tabela 6, os Valores $p > \alpha$ indicam que não há evidências estatísticas de que a média de resistência à compressão dos corpos de prova com 20% de substituição e 10% de adição é diferente daquela observada para a amostra de referência. Aceita-se H_0 .

Porém, para 10% de substituição e 20% de adição, rejeita-se H_0 . O Valor $p < \alpha$ comprova, ao nível de significância de 5%, que há evidências de que a média de resistência é diferente da de referência.

Com base na Tabela 4, deduz-se que a resistência dos corpos de prova com 10% de substituição – $(28,78 \pm 0,94)$ MPa – é inferior à de referência, $(33,09 \pm 1,16)$ MPa. Já para 20% de adição, a resistência, estimada em $(37,76 \pm 1,53)$ MPa, é superior.

3.3.2. Análise da resistência à compressão pré-envelhecimento e pós-envelhecimento

Observando a Tabela 4, nota-se que o ensaio de envelhecimento acelerado promoveu o incremento da resistência à compressão de todas as misturas. Esses dados sugerem que o processo de cura permaneceu além dos 28 dias, como estabelece a Lei da Maturidade que relaciona o ganho de resistência com o tempo e temperatura. No período de execução do ensaio, a presença do cloreto de sódio e a variação de temperatura não prejudicaram as propriedades mecânicas das argamassas, Neville (1997) salienta que esta tem um efeito acelerador nas reações de hidratação.

Para verificar se a diferença observada antes e após o processo de envelhecimento é significativa, aplicaram-se os testes estatísticos das Tabelas 7, 8 e 9. As análises foram conduzidas ao nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$) e adotaram-se como hipóteses:

Teste F

H_0 : $S_3 = S_4$; a variância da resistência à compressão das amostras pré-envelhecimento (S_3) é igual à variância da resistência à compressão das amostras pós-envelhecimento (S_4).

H_1 : $S_3 \neq S_4$; a variância da resistência à compressão das amostras pré-envelhecimento (S_3) é diferente da variância da resistência à compressão das amostras pós-envelhecimento (S_4).

Teste t

H_0 : $\mu_3 = \mu_4$; a média da resistência à compressão das amostras pré-envelhecimento (μ_3) é igual à média da resistência à compressão das amostras pós-envelhecimento (μ_4).

H_1 : $\mu_3 \neq \mu_4$; a média da resistência à compressão das amostras pré-envelhecimento (μ_3) é diferente da média da resistência à compressão das amostras pós-envelhecimento (μ_4).

Tabela 7 - Teste F: duas amostras para variâncias.
Resultados para o ensaio de envelhecimento acelerado.

Tipo de mistura	S_3	S_4	F	Valor p ($F \leq f$) bi-caudal
Referência			0,1745	0,2972
10% de substituição			0,0480	0,0915
20% de substituição	Pré-envelhecimento	Pós-envelhecimento	0,0247	0,0482
10% de adição			0,1121	0,2015
20% de adição			0,0604	0,1139

$\alpha = 0,05$.

Fonte: Do Autor, 2016.

De acordo com a Tabela 7, com exceção da mistura com 20% de substituição, para todas as outras comparações realizadas, aceita-se H_0 . Não há evidências estatísticas - ao nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$) - de que as variâncias não são equivalentes, pois o Valor p ($F \leq f$) $> \alpha$. Assim, o Teste t aplicado pressupõe essa equivalência.

Já para a comparação entre as amostras com 20% de substituição, como o Valor p ($F \leq f$) $< \alpha$, há evidências estatísticas de que as variâncias são diferentes (rejeita-se H_0). Logo, para elas, é preciso aplicar o Teste t para duas amostras presumindo variâncias diferentes.

Tabela 8 - Teste t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes.
Resultados para o ensaio de envelhecimento acelerado.

Tipo de mistura	μ_3	μ_4	T	Valor p (T ≤ t) bi-caudal
Referência			-2,9060	0,0439
10% de substituição	Pré-envelhecimento	Pós-envelhecimento	-2,5687	0,0621
10% de adição			-0,7812	0,4783
20% de adição			-1,5328	0,2001

$\alpha = 0,05$.

Fonte: Do Autor, 2016.

Tabela 9 - Teste t: duas amostras presumindo variâncias diferentes.
Resultados para o ensaio de envelhecimento acelerado.

Tipo de mistura	μ_3	μ_4	T	Valor p (T ≤ t) bi-caudal
20% de substituição	Pré-envelhecimento	Pós-envelhecimento	-3,4226	0,0758

$\alpha = 0,05$.

Fonte: Do Autor, 2016.

As Tabelas 8 e 9 demonstram que para as misturas com a presença de resíduo não há evidências estatísticas de que as médias de resistência à compressão antes e após o processo de envelhecimento são diferentes. Para elas, aceita-se H_0 , pois os Valores $p > \alpha$.

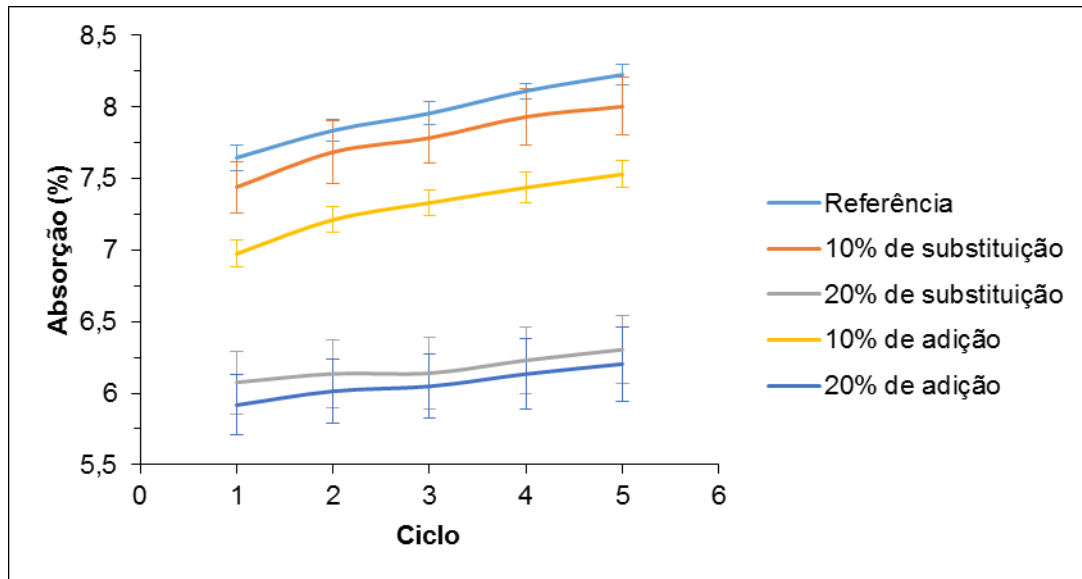
Para a amostra de referência, o Valor $p < \alpha$ indica que, ao nível de significância de 5%, há evidências de que o ensaio de envelhecimento alterou a propriedade mecânica da argamassa.

Essas análises estatísticas conduzem a observação de que a presença do resíduo acelera o processo de cura, ou seja, as argamassas com adição/substituição atingem a máxima resistência mecânica em um menor período de tempo.

3.4 ABSORÇÃO

A Figura 7 traz os resultados para a absorção da solução de cloreto de sódio pelas argamassas durante os ciclos do ensaio de envelhecimento.

Figura 7 - Absorção de solução de cloreto de sódio pelas argamassas em função do envelhecimento acelerado.



Fonte: Do autor, 2016.

A análise da Figura 7 demonstra que as amostras de referência absorveram um percentual maior de solução de cloreto de sódio em comparação aquelas com resíduo em sua composição. Como Guedert (1989) apud Santos (2006) afirma que materiais com atividade pozolânica tem a capacidade de reduzir o diâmetro dos poros da pasta hidratada e, conseqüentemente, a permeabilidade, sugere-se que a menor absorção das argamassas com RPP esteja relacionada a isto.

Os corpos de prova com 20% de adição/substituição apresentaram um percentual de absorção menor que as amostras com 10% de adição/substituição, cujos resultados foram mais próximos da referência, principalmente com 10% de substituição. O incremento do material fino (adição) se mostrou mais eficaz na redução da absorção para ambos os percentuais (10% e 20%).

A absorção das amostras de referência e com 10% de adição/substituição, com a evolução dos ciclos de envelhecimento, aumentou em proporções maiores em relação aos corpos de prova com 20% de adição/substituição.

A partir desses resultados, identifica-se que o uso do resíduo em argamassas de revestimento permite maior durabilidade das edificações, principalmente quando as mesmas revestirem peças estruturais de concreto armado, pois a corrosão iniciada por íons cloreto é o ataque mais severo e a causa de corrosão prematura em estruturas (MEHTA e MONTEIRO, 2008).

4. CONCLUSÃO

Na ótica de questões ambientais associadas à eficiência industrial, a reutilização de resíduos tornou-se essencial. O resíduo do polimento de porcelanato apresenta características físicas e químicas que o potencializam como material pozolânico, permitindo a produção de argamassas mais sustentáveis e eficazes em termos de propriedades mecânicas.

O RPP gerado pelas empresas de revestimento cerâmico contém partículas com diâmetro inferior a 45 μm , não exigindo processos de cominuição para atender a ABNT NBR 12653 (2014).

A resistência à compressão pré-envelhecimento da mistura com percentual de 10% de substituição, (28,78 \pm 0,94) MPa, se mostrou inferior àquela encontrada para a mistura de referência, (33,09 \pm 1,16) MPa. Porém, os corpos de prova com 20% de adição obtiveram resultados satisfatórios pelo incremento dessa propriedade, (37,76 \pm 1,53) MPa.

As análises estatísticas pré-envelhecimento demonstraram que a presença do resíduo em percentuais de 20% de substituição e 10% de adição não altera a resistência à compressão das argamassas, pois não há evidências, ao nível de significância adotado, de que as propriedades mecânicas destas misturas são diferentes da observada para as amostras de referência.

A utilização do RPP em argamassas de revestimento proporciona a elas uma maior durabilidade, pois mesmo após imersão em cloreto de sódio, não houve evidências estatísticas de que suas resistências à compressão foram diferentes das estimadas antes do ensaio. O resíduo também reduziu o tempo de cura das misturas e a absorção de solução de cloreto de sódio.

Além da importância ambiental envolvida na reciclagem do resíduo, o reaproveitamento é também interessante do aspecto financeiro, visto que a deposição em aterros sanitários gera custo para as empresas de revestimento cerâmico e que o resíduo permite substituir parte do cimento sem prejuízo à resistência mecânica das argamassas. Ainda, a aplicação do RPP como pozolana pode ser muito eficaz para a proteção de estruturas em ambientes agressivos.

5. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliar a resistência à compressão com maiores percentuais de adição e substituição do resíduo do polimento de porcelanato;
- Realizar ensaio de aderência e resistência à compressão, mantendo fixa a relação água/cimento, com os percentuais estudados neste trabalho;
- Testar um percentual maior de cloreto de sódio com um número de ciclos de envelhecimento mais elevado.

6. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Manual de Revestimentos de Argamassa**. s.d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

_____. **NBR 9778**: Argamassa e concretos endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 12653**: Materiais pozolânicos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2014.

_____. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2005.

BERNARDIN, Adriano Michael; FELISBERTO, Diana de Souza; DAROS, Maisa Topanotti; RIELLA, Humberto Gracher. Reaproveitamento de Resíduos de Polimento e de Esmaltação para Obtenção de Cerâmica Celular. **Cerâmica Industrial**, v. 11, n. 5, p. 31-34, set./dez. 2006a.

BERNARDIN, Adriano Michael; SILVA, Márcio José da; SILVA, Homero G. Calatzis da; RIELLA, Humberto Gracher. Caracterización física, estructural y mecánica de las cerámicas expandidas obtenidas a partir de los residuos de pulido. In: Proceedings of the VIII World Congress on Ceramic Tile Quality, vol. 3, 2006b, p. 191-198.

BIGNOZZI, Maria Chiara; SACCANI, Andrea. Ceramic waste as aggregate and supplementary cementing material: A combined action to contrast alkali silica reaction (ASR). **Cement & Concrete Composites**, v. 34, p. 1141-1148, 2012.

BRASILEIRO, M. I.; RODRIGUES, A.W.B.; FERREIRA, H.S.; OLIVEIRA, D. F.; NEVES, G. A.; PATRÍCIO, S. M. R.; SILVA, M. C.; FERREIRA, H. C. Envelhecimento de Argamassas Alternativas. Campina Grande, 2000, p. 1-11.

JACOBY Pablo Cardoso; PELISSER Fernando. Pozzolanic effect of porcelain polishing residue in Portland cement. **Journal of Cleaner Production**, v. 100, p. 84-88, 2015.

LIMA, Rosele Correia de; HELENE, Paulo Roberto do Lago; LIMA, Maryangela Geimba. Avaliação da Eficiência de Inibidores de Corrosão em Reparo de Estruturas de Concreto. São Paulo, 2001, p. 1-16.

MARQUES, L. N.; MENEZES, R. R.; NEVES, G. A.; SANTANA, L. N. L.; LIRA, H.L.; FERREIRA, H. C. Re-aproveitamento do resíduo do polimento de porcelanato para utilização em massa cerâmica. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 2.2, p. 34-42, 2007.

MEHTA, Povindar Kumar; MONTEIRO, Paulo J.M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2008. 574 p.

MOESGAARD; Mette, HERFORT Duncan; STEENBERG, Mette; KIRKEGAARD, Lise Frank; YUE, Yuanzheng. Physical performances of blended cements containing calcium aluminosilicate glass powder and limestone. **Cement and Concrete Research**, v. 41, p. 359-364, 2011.

NEVILLE, Adam Matthew. **Propriedades do concreto**. 2. ed. São Paulo: PINI, 1997. 828 p.

PELISSER, Fernando; STEINER, Luiz Renato; BERNARDIN, Adriano Michael. Recycling of Porcelain Tile Polishing Residue in Portland Cement: Hydration Efficiency. **Environmental Science & Technology**, v. 46, p. 2368-2374, 2012.

RAMBALDI, E.; ESPOSITO, L.; TUCCI, A.; TIMELLINI, G. Recycling of polishing porcelain stoneware residues in ceramic tiles. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 27, p. 3509-3515, 2007.

SANTOS, Silvia. **Produção e Avaliação do uso de pozolana com baixo teor de carbono obtida da cinza de casca de arroz residual para concreto de alto desempenho**. 2006. 288 f. Tese (Pós-Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

SILVA, Julhana Bacichetti da. Aspectos sobre durabilidade, vida útil e manutenção das estruturas de concreto. **Revista Especialize On-line IPOG**, v.1, 2015.

WILD, S.; KHATIB, J. M.; JONES, A. Relative strength, pozzolanic activity and cement hydration in superplasticised metakaolin concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 26, n. 10, p. 1537-1544, 1996.