

## Efeito da Adição do Resíduo do Polimento de Porcelanato – RPP na Durabilidade de Argamassa de Revestimento

Elis M. de Oliveira<sup>a</sup>, Elen M. de Oliveira<sup>a</sup>, Michael Peterson<sup>b,c</sup>, Fernando Pelisser<sup>d</sup>, Camila M. de Oliveira<sup>e\*</sup>, Elaine G. P. Antunes<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC, Criciúma, SC, Brasil

<sup>b</sup> Laboratório de Reatores e Processos Industriais, Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC, Criciúma, SC, Brasil

<sup>c</sup> Departamento de Engenharia Química, Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC, Criciúma, SC, Brasil

<sup>d</sup> Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis, SC, Brasil

<sup>e</sup> Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis, SC, Brasil

\*e-mail: machadodeoliveirac@gmail.com

### Resumo

Práticas de reciclagem vêm sendo estudadas para inserir resíduos da indústria cerâmica em concretos e argamassas, criando produtos sustentáveis. Considerando as características do resíduo do polimento de porcelanato (RPP), foi avaliado o seu potencial como material pozolânico para fabricação de argamassas de revestimento. 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. 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. O ensaio de envelhecimento acelerado indicou que o resíduo reduz a absorção das argamassas.

**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 [1]. 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 [2].

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 [3].

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 [4].

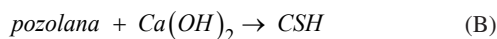
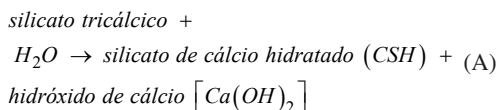
Na construção civil, o cimento é o material mais utilizado atualmente [5]. Assim, a produção de argamassas e concretos mais econômicos, duráveis e sustentáveis é de extrema importância, pois há um grande consumo de energia na fabricação do cimento Portland. A aplicação de materiais cimentícios suplementares (MCS) é uma alternativa para melhorar a eficiência do processo [6]. MCS são elementos como cinzas volantes, cimentos de alto-forno, sílica ativa, metacaulim e outros materiais pozolânicos misturados ao cimento ou acrescentados na dosagem, sendo a eficiência dependente de sua composição química, finura e da quantidade de fases amorfas existentes [7].

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 [2]. 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 [8].

Os porcelanatos apresentam uma densa microestrutura e baixa porosidade fechada, sendo caracterizados por uma fase cristalina secundária constituída de mulita e cristais 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 porcelanatos podem ser reciclados para utilização em novos produtos [9].

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 [10].

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 A e B).



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 [11].

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 [12].

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 [13].

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 a condições normais de uso [14].

Associa-se a durabilidade do material às degradações sofridas por ele [12], que muitas vezes ocorrem devido à sua natureza porosa e às microfissuras que surgem, permitindo o acesso de contaminantes externos e fluidos responsáveis pela deterioração. O desempenho das argamassas está relacionado às suas propriedades de resistência e permeabilidade [15].

A adição de pozolana ao cimento proporciona a redução de sua permeabilidade, diminuindo o diâmetro dos poros da pasta hidratada e, por conseqüência, o ataque do material por substâncias externas nocivas, como cloretos e sulfatos [16].

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. Experimental

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, foi seco em estufa a 105 ± 5 °C e passou por desaglomeração manual. Na seqüência, o RPP foi peneirado em malha com abertura de 45 µm para atender a NBR 12653 (2014) [17] e caracterizado por:

- Difratomia de raios X (DRX) para determinar as espécies cristalinas. Difrátômetro 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. 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;
- Granulometria a laser, granulômetro a laser Cilas 1064, para verificar o tamanho de partícula final do RPP.

Executou-se a produção da argamassa conforme a NBR 13276 (2005) [18], 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  $(260 \pm 5)$  mm. A Tabela 1 apresenta os traços aplicados nos experimentos.

Para determinar a resistência à compressão, para cada composição da Tabela 1 foram confeccionados três corpos de prova cilíndricos com tempo de cura de 28 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. Todo o procedimento foi realizado conforme prescreve a ABNT NBR 7215 (1996) [19].

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 28 dias. Posteriormente, com base na literatura, foram secos em estufa microprocessada de secagem Q317M-32 Quimis a  $(71 \pm 1)$  °C [20], 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 se deu pelo retorno das amostras a estufa por quatro dias [21]. Repetiu-se o processo por mais quatro vezes. A Figura 1 exemplifica o ciclo adotado.

**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

Determinou-se a capacidade de absorção das argamassas pela aplicação da Equação C, definida na ABNT NBR 9778 (2005) [22].

$$\text{Absorção (\%)} = \frac{M_{\text{sat}} - M_s}{M_s} \times 100 \quad (C)$$

onde Absorção (%) é a capacidade de absorção,  $M_{\text{sat}}$  é a massa do corpo de prova saturado e  $M_s$  é a 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) [19].

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*.

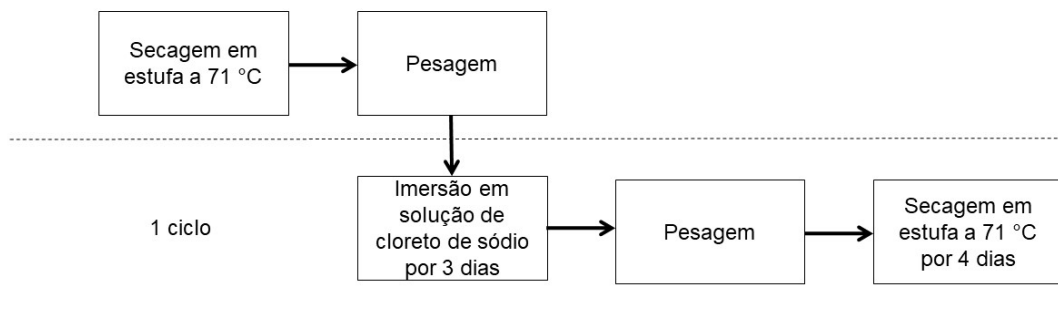
### 3. Resultados e Discussão

#### 3.1. Caracterização do resíduo

A distribuição de tamanho de partícula demonstrou que 100% da amostra apresenta diâmetro inferior a 45 µm, respeitando o que determina a ABNT NBR 12653 (2014) [17]. 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 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.

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) [17], 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



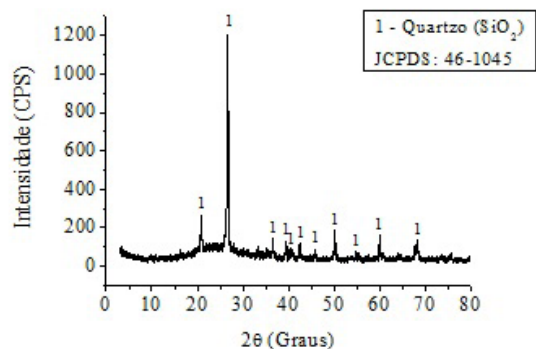
**Figura 1.** Fluxograma do ciclo de envelhecimento.

a 70% (89,76%). A Tabela 2 traz a análise química do resíduo do polimento de porcelanato.

O difratograma da Figura 2 indica que o RPP é um material reativo, pois apresentou um halo amorpho acentuado na região entre 2 theta igual a 18° e 36°. Foram identificados

**Tabela 2.** Análise química do RPP.

Elementos	Teor (%)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18,74
CaO	1,13
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,99
K <sub>2</sub> O	1,75
MgO	2,28
MnO	< 0,05
Na <sub>2</sub> O	2,60
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,06
SiO <sub>2</sub>	70,03
TiO <sub>2</sub>	0,22
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-
Li <sub>2</sub> O	-
BaO	0,21
Co <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	< 0,01
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	< 0,01
PbO	< 0,01
SrO	< 0,01
ZnO	< 0,01
ZrO <sub>2</sub> + HfO <sub>2</sub>	0,09
Perda ao fogo	1,70



**Figura 2.** Difratograma de raios X do RPP.

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

Tipos de mistura	Relação água/cimento	Índice de consistência (± 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

na amostra picos relativos a fase cristalina quartzo, SiO<sub>2</sub> (JCPDS: 46-1045), concordando com a análise química, que indicou a presença de 70,03% de sílica no resíduo.

### 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) [18]. 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.

### 3.3. Resistência à compressão

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

### 3.4. 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 ( $\mu_1$ ) é igual à média da resistência à compressão das amostras com adição/substituição ( $\mu_2$ ).

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

Segundo a Tabela 5, para todas as comparações realizadas, aceita-se  $H_0$ . Não há evidências estatísticas - ao nível de

**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

**Tabela 5.** Teste F: duas amostras para variâncias.

$S_1$	$S_2$	F	Valor p
Referência	10% de substituição	1,5397	<b>0,7875</b>
	20% de substituição	5,5691	<b>0,3045</b>
	10% de adição	0,1189	<b>0,2125</b>
	20% de adição	0,5827	<b>0,7363</b>

$\alpha = 0,05$ .

**Tabela 6.** Teste t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes.

$\mu_1$	$\mu_2$	T	Valor p
Referência	10% de substituição	4,9755	<b>0,0076</b>
	20% de substituição	2,3744	<b>0,0764</b>
	10% de adição	-1,3343	<b>0,2530</b>
	20% de adição	-4,2107	<b>0,0136</b>

$\alpha = 0,05$ .

significância de 5% ( $\alpha = 0,05$ ) - de que as variâncias não são equivalentes, pois o Valor  $p > \alpha$ . Assim, o Teste t aplicado pressupõe essa equivalência.

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.

Outros autores, ao trabalharem com 10% e 20% de substituição do cimento CP II pelo RPP, não observaram alterações na resistência (em comparação com a amostra de referência) aos 28 dias de cura. Diferenças foram constatadas ao término dos 56 e 84 dias, sendo que os corpos de prova que continham resíduo apresentaram maiores valores de resistência em relação aos de referência [2] [23].

### 3.5. 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, ambos têm um efeito acelerador nas reações de hidratação [24].

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 ( $S_4$ ).

**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
Referência			0,1745	<b>0,2972</b>
10% de substituição			0,0480	<b>0,0915</b>
20% de substituição	Pré-envelhecimento	Pós-envelhecimento	0,0247	<b>0,0482</b>
10% de adição			0,1121	<b>0,2015</b>
20% de adição			0,0604	<b>0,1139</b>

$\alpha = 0,05$ .

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

Tipo de mistura	$\mu_3$	$\mu_4$	T	Valor p
Referência			-2,9060	<b>0,0439</b>
10% de substituição	Pré-envelhecimento	Pós-envelhecimento	-2,5687	<b>0,0621</b>
10% de adição			-0,7812	<b>0,4783</b>
20% de adição			-1,5328	<b>0,2001</b>

$\alpha = 0,05$ .

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

Tipo de mistura	$\mu_3$	$\mu_4$	T	Valor p
20% de substituição	Pré-envelhecimento	Pós-envelhecimento	-3,4226	<b>0,0758</b>

$\alpha = 0,05$ .

$H_1$ :  $S_3 \neq S_4$ ; 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 ( $\mu_3$ ) é igual à média da resistência à compressão das amostras pós-envelhecimento ( $\mu_4$ ).

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

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  $> \alpha$ . Assim, o Teste t aplicado pressupõe essa equivalência.

Já para a comparação entre as amostras com 20% de substituição, como o Valor p  $< \alpha$ , 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.

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.

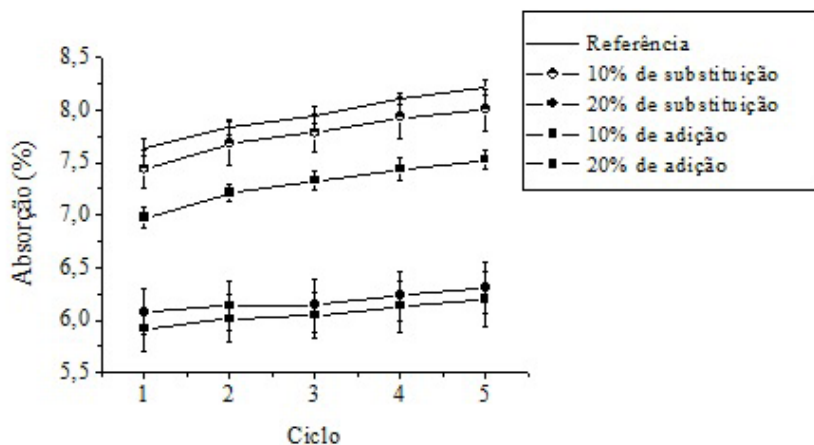
#### 3.6. Absorção

A Figura 3 traz os resultados para a absorção da solução de cloreto de sódio pelas argamassas durante os ciclos do ensaio de envelhecimento.

A análise da Figura 3 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 os materiais com atividade pozolânica tem a capacidade de reduzir o diâmetro dos poros da pasta hidratada e, consequentemente, a permeabilidade [16], 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



**Figura 3.** Absorção de solução de cloreto de sódio pelas argamassas em função do envelhecimento acelerado.

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 [11].

#### 4. Conclusões

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) [17].

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.

#### Referências

- [1] L.N. Marques, R.R. Menezes, G.A. Neves, L.N.L. Santana, H.L.Lira, H.C. Ferreira, *Rev. Eletrônica Mater. E Process.* **2** (2007) 34–42.
- [2] P. Cardoso, F. Pelisser, *J. Clean. Prod.* **100** (2015) 84–88.
- [3] A.M. Bernardin, D. de S. Felisberto, M.T. Daros, H.G. Riella, *Cerâmica Ind.* **11** (2006) 31–34.
- [4] M.C. Bignozzi, A. Saccani, *Cem. Concr. Compos.* **34** (2012) 1141–1148.
- [5] K. Abdelli, M. Tahlaiti, R. Belarbi, M.N. Oudjit, Influence of the origin of metakaolin on pozzolanic reactivity of mortars, in: *Energy Procedia*, 2017: pp. 230–235.
- [6] M. Moesgaard, D. Herfort, M. Steenberg, L.F. Kirkegaard, Y. Yue, *Cem. Concr. Res.* **41** (2011) 359–364.
- [7] F. Pelisser, L.R. Steiner, A.M. Bernardin, *Environ. Sci. Technol.* **46** (2012) 2368–2374.
- [8] E. Rambaldi, L. Esposito, A. Tucci, G. Timellini, *J. Eur. Ceram. Soc.* **27** (2007) 3509–3515.
- [9] A.M. Bernardin, M.J. da Silva, H.G.C. da Silva, H.G. Riella, 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*, 2006: pp. 191–198.
- [10] S. Wild, J.M. Khatib, A. Jones, *Cem. Concr. Res.* **26** (1996) 1537–1544.
- [11] P.K. Mehta, P.J. Monteiro, *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*, 3ed., IBRACON, São Paulo, 2008.

- [12] S. Santos, 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, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.
- [13] J. Bacichetti, Rev. Espec. On-Line IPOG. 01 (2015).
- [14] B. Szlak, E. Taniguti, E. Nakamura, É. Mota, M. Bottura, V. Frigieri, Manual de Revestimentos de Argamassa, Associação Brasileira de Cimento Portland, 2003.
- [15] S. Gupta, H.W. Kua, S.D. Pang, Constr. Build. Mater. **167** (2018) 874–889.
- [16] G. Li, A. Zhang, Z. Song, S. Liu, J. Zhang, Constr. Build. Mater. **158** (2018) 640–648.
- [17] ABNT NBR 12653, Materiais pozolânicos - Requisitos, (2014).
- [18] ABNT NBR 13276, Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura e determinação do índice de consistência, (2005).
- [19] ABNT NBR 7215, Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão, (1996).
- [20] M.I. Brasileiro, H.S. Rodrigues, A. W. B Ferreira, D.F. Oliveira, G.A. Neves, S.M.R. Patricio, M.C. Silva, H.C. Ferreira, Envelhecimento de Argamassas Alternativas, in: Anais do 44º Congresso Brasileiro de Cerâmica, São Paulo, 2000: pp. 40801–40811.
- [21] R.C. de Lima, P.R. do L. Helene, M.G. Lima, Avaliação da eficiência de inibidores de corrosão em reparo de estruturas de concreto, EPUSP, São Paulo, 2001.
- [22] ABNT NBR 9778, Argamassa e concretos endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica, (2005).
- [23] L.R. Steiner, A.M. Bernardin, F. Pelisser, Sustain. Mater. Technol. **4** (2015) 30–35.
- [24] A.M. Neville, Propriedades do concreto, 2ed., PINI, São Paulo, 1997.