

Análise da resistência à compressão e tração de argamassa com adição de resíduo de cerâmica vermelha

Study of the compressive and tensile strengths of mortar with addition of red-ceramic waste

Elen Machado de Oliveira ¹, Elis Machado de Oliveira ¹,
Michael Peterson ^{2,3}, Fernando Pelisser ⁴,
Camila Machado de Oliveira ⁵,
Elaine Guglielmi Pavei Antunes ¹

¹ Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Extremo Sul Catarinense, UNESC, 88806-000, Criciúma, Santa Catarina, Brasil.

² Laboratório de Reatores e Processos Industriais, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC, 88806-000, Criciúma, Santa Catarina, Brasil.

³ Departamento de Engenharia Química, Universidade do Extremo Sul Catarinense, UNESC, 88806-000, Criciúma, SC, Brasil.

⁴ Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, 88040-900, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil.

⁵ Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, 88040-900, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil.

e-mail: elen0407@hotmail.com, elismdeoliveira@hotmail.com, mpe@unesc.net, pelisser@hotmail.com, machadodeoliveirac@gmail.com, elainegpa@unesc.net

RESUMO

A crescente geração de resíduos resulta em uma intensa preocupação quanto à disposição final destes materiais. Os advindos da indústria de cerâmica vermelha despertaram o interesse para o uso em argamassas e concretos, pois, devido a sua composição, são capazes de gerar reação pozolânica. Neste trabalho, foram realizados testes com os resíduos coletados em três empresas (A, B e C) da região sul de Santa Catarina, caracterizando-os e, posteriormente, produzindo argamassas com 10% de substituição e adição em relação à massa de cimento. Partindo de um planejamento experimental de misturas, verificou-se a influência de cada resíduo na resistência à compressão e tração das argamassas. Embora as análises químicas e os difratogramas de raios X tenham demonstrado características semelhantes para ambos os resíduos, as amostras contendo apenas o resíduo C conciliaram maiores valores de resistência à compressão e tração. Apesar das diferenças observadas nas propriedades mecânicas entre as misturas, a análise estatística do planejamento experimental comprovou que, ao trabalhar com um traço de 10%, as resistências não são significativamente alteradas pela composição da adição/substituição. Exceto para as composições com 10% de adição, não houve evidências estatísticas de que as propriedades mecânicas das misturas que combinam os piores resultados de resistência à compressão e tração são diferentes da amostra de referência. Os resultados indicam que parte do cimento pode ser substituída pelo resíduo de cerâmica vermelha sem prejuízos ao desempenho mecânico da argamassa e que, ao se trabalhar com adições, há um aumento da resistência à compressão, viabilizando sua incorporação e criando um meio para a reciclagem deste material.

Palavras-chave: Resíduo de cerâmica vermelha. Argamassa. Resistência mecânica.

ABSTRACT

The increasing generation of wastes results in great concerns about the final disposition of certain materials. The waste from the red-ceramic industry has aroused interest for its potential use in concretes and mortars because of its composition, as well as its capability to generate a pozzolanic reaction. In this work, tests were done with the wastes collected in 3 industries (A, B and C) from the southern Santa Catarina State (Brazil). The wastes were characterized, and subsequently, mortars were produced with 10% substitution and addition

in relation to the cement mass. With the use of an experimental design of mixtures, the influence of each waste on the compressive and tensile strengths of the mortars was verified. Although the chemical compositions and the X-ray diffractograms demonstrated similar characteristics for both wastes, the samples containing only C waste obtained better values of compressive and tensile strengths. Despite the differences observed in the mechanical properties between the mixtures, the statistical analysis of the experimental design proved that with 10% addition/substitution, the mechanical strengths were not significantly changed by the composition. Except for the composition with the addition of 10% waste, there was no statistical evidence that the mechanical properties of the mixtures combining the worst results of compressive and tensile strengths were different than the reference sample. The results showed that a part of the cement can be substituted by red-ceramic waste without affecting the mechanical performance of the mortar, and that with the additions, there is an increase in the compressive strength, enabling its incorporation and creating a way for the recycling of the material.

Keywords: Red-ceramic waste. Mortar. Mechanical strength.

1. INTRODUÇÃO

Em concretos e argamassas, as adições minerais podem atuar na melhora de suas propriedades mecânicas e durabilidade [1]. Por isso, o uso dessas adições é crescente [2] e, quando não requer processos como a clínquerização, reduz significativamente as emissões de CO₂ [3].

As adições minerais são constituídas de materiais silicosos finamente fragmentados que, incorporados ao cimento e concreto, interagem quimicamente e fisicamente com os produtos da hidratação do clínquer ou do cimento, transformando a microestrutura do material. A reação entre a adição mineral e o hidróxido de cálcio [Ca(OH)₂], produzido ao longo dessa hidratação, forma silicato de cálcio hidratado (CSH), sendo designada como reação pozolânica [4].

As últimas décadas foram palco de várias pesquisas sobre materiais alternativos aos convencionais para concretagem. Os novos materiais são normalmente elencados por sua abundância ou, no caso dos resíduos, por resultarem em prejuízos ambientais [5].

Anualmente a indústria cerâmica gera grandes quantidades de resíduos, destinando-os, em sua maioria, aos aterros sanitários [6]. Substituir o cimento por esses materiais pode promover uma enorme economia de energia e redução de custos [7]. Incluem-se nesses resíduos os de cerâmica vermelha, gerados pelas indústrias de cerâmica estrutural, como tijolos, blocos e telhas [8].

No Brasil, em 2017, foi estimada uma produção de 63,6 bilhões de peças de cerâmica vermelha, considerando a massa média de 2 kg/peça e a argila como principal matéria-prima, utilizaram-se 140 milhões de toneladas [9]. Em 2016, aproximadamente 30% das empresas brasileiras reduziram suas perdas para 5 a 10%, as demais ultrapassam 15%, segundo relato do presidente do Sindicato da Indústria da Cerâmica Vermelha (SINDICER). A quantidade de resíduos gerada varia conforme os métodos de produção, podendo ser fruto de ruptura no processo de queima ou no transporte, além de peças com defeito [10].

Os resíduos de cerâmica vermelha utilizados como agregados graúdos no concreto são capazes de elevar a resistência à compressão, aos 28 dias, em até 29,3% quando 100% dos agregados são substituídos [11].

Com 100% dos agregados miúdos naturais em concreto estrutural substituídos por resíduos de tijolos triturados, apesar da redução de 10% da resistência à compressão aos 28 dias, observou-se uma qualidade adequada do material, de acordo com as especificações da norma europeia EN 206-1 [12].

Substituindo 20% do cimento por resíduos de tijolos em concreto, pesquisadores alcançaram uma resistência à compressão aos 28 dias de aproximadamente 32,00 MPa [6].

Um estudo que aplicou resíduos de tijolos e telhas portugueses finamente moídos como substituição parcial do cimento em argamassas demonstrou que quando a porcentagem de substituição foi de 25%, independente do tipo de resíduo, a resistência à compressão foi reduzida em torno de 20%. Essa redução aumentou para cerca de 30% com a substituição máxima (40%). Ao se avaliar a resistência à compressão entre 28 e 90 dias, verificou-se uma evolução maior para a argamassa com incorporação de pós de telhas, da ordem de 25% de aumento para 25% de substituição e 30% para a argamassa com 40% de substituição, enquanto no caso da incorporação dos pós de tijolos, foi de 15% e 20%. O trabalho mostrou que apenas os pós de resíduos de telhas tinham potencial de atividade pozolânica, concluindo que a temperatura de queima dos tijolos (800 – 1000 °C), inferior à utilizada na indústria de telhas (1100 – 1200 °C), não conferiu propriedades pozolânicas ao resíduo [1].

Existem inúmeros fatores que influenciam na atividade pozolânica, destacando-se o tipo e quantidade de minerais argilosos, a natureza e número de impurezas, o tratamento térmico aplicado e a superfície especí-

fica obtida [13].

Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento mecânico (resistência à compressão e tração) de argamassas contendo resíduos de cerâmica vermelha, analisando a variabilidade entre os resíduos fornecidos por diferentes empresas da região sul catarinense.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para avaliar a influência do resíduo de cerâmica vermelha no comportamento mecânico das argamassas, produziram-se misturas com percentuais de adição e substituição, em relação à massa de cimento, de 10%.

Objetivando identificar se a variabilidade dos resíduos interfere nas propriedades finais das argamassas, estes foram amostrados em três diferentes empresas da região sul de Santa Catarina, sendo identificados por A, B e C. Para adequar-se a etapa de moagem, foram fragmentados manualmente e britados em britador mandíbula. Na sequência, moídos em moinho horizontal com bolas de alta alumina. Para que os materiais retidos em peneira com abertura de 45 μm fossem inferiores a 20%, atendendo a ABNT NBR 12653 (2015) [14], os resíduos foram moídos em moinho excêntrico com bolas de alta alumina (marca Servitech, modelo CT-242). Em seguida, passaram por secagem em estufa a 105 ± 5 °C. O tamanho de partícula final dos resíduos foi verificado em um granulômetro a laser Cilas 1064.

Para a caracterização química e microestrutural, adotaram-se as técnicas de:

- Espectrometria de fluorescência de raios X (FRX): espectrômetro de raios X por dispersão de comprimento de onda - WDXRF - Axios Max Panalytical e
- Difractometria de raios X (DRX): ensaios em difratômetro de raios X, marca Shimadzu, modelo XRD-6000, goniômetro theta theta, radiação k- α com tubo de cobre de comprimento de onda (λ) de 1,5406 Å. O passo realizado nas análises foi de 2°/min. O range de medida foi de 3 a 80°, com 25 kV de voltagem e 25 mA de corrente elétrica.

O processo de mistura para produção das argamassas foi executado como determina a ABNT NBR 16541 (2016) [15]. Adotou-se como traço de referência 1: 3: 0,48 (cimento: areia: relação água/cimento) com percentual de adição de 0% e 10% e substituição de 10% de cimento por resíduo, para um índice de consistência fixado em (260 ± 5) mm, como prescreve a ABNT NBR 13276 (2016) [16]. O cimento utilizado foi o CP II Z 32 e a areia foi a lavada média com finura de 2,2 mm.

A Tabela 1 apresenta os traços utilizados 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

A influência de cada resíduo sobre a resistência à compressão e tração das argamassas foi avaliada segundo a metodologia estatística de um planejamento experimental de misturas (Tabela 2) com três fatores (Resíduo A, B e C) e um ponto central. Os dados foram analisados com auxílio do *software Statistica 13.0 Trial Version*.

Tabela 2: Matriz de dados do planejamento experimental de misturas. Percentuais relativos à fração de resíduo na argamassa.

EXPERIMENTO	RESÍDUO A	RESÍDUO B	RESÍDUO C
1	100%	0%	0%
2	0%	100%	0%
3	0%	0%	100%
4	50%	50%	0%

5	50%	0%	50%
6	0%	50%	50%
7	33%	33%	33%

A partir dos dados do planejamento experimental da Tabela 2, obteve-se a composição dos traços com 10% de adição do resíduo e 10% de substituição do cimento pelo resíduo, representados na Tabela 3.

Tabela 3: Composições de acordo com o planejamento experimental.

AMOSTRA	TIPO DE MISTURA	RESÍDUO A	RESÍDUO B	RESÍDUO C
1	10% de substituição 0,90: 3	0,10	-	-
2		-	0,10	-
3		-	-	0,10
4		0,05	0,05	-
5		0,05	-	0,05
6		-	0,05	0,05
7		0,033	0,033	0,033
8	10% de adição 1: 3	0,10	-	-
9		-	0,10	-
10		-	-	0,10
11		0,05	0,05	-
12		0,05	-	0,05
13		-	0,05	0,05
14		0,033	0,033	0,033

Para o ensaio de resistência à compressão, moldaram-se três corpos de prova com diâmetro de 5 cm e comprimento de 10 cm para cada tipo de mistura (Tabela 3 e amostra de referência), sendo capeados com uma pasta de cimento CP II Z 32 e respeitando o tempo de cura de 28 dias, como determina a ABNT NBR 7215 (1997) [17]. O equipamento utilizado para romper os corpos de prova foi a prensa EMIC, modelo PC200CS, aplicando uma velocidade de carregamento de $(0,25 \pm 0,05)$ MPa/s.

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral foi realizado como estabelece a ABNT NBR 7222 (2011) [18]. Foram moldados três corpos de prova com diâmetro de 5 cm e comprimento de 10 cm para cada mistura (Tabela 3 e amostra de referência) e respeitou-se o tempo de cura de 28 dias. O equipamento utilizado para romper os corpos de prova foi a prensa EMIC, modelo PC200CS. Aplicou-se continuamente uma carga, com crescimento constante da tensão de tração, a uma velocidade de $(0,05 \pm 0,02)$ Mpa/s.

Para o cálculo da resistência à tração por compressão diametral, empregou-se a Equação 1, encontrada na ABNT NBR 7222 (2011) [18].

$$f_{ct,sp} = \frac{2F}{\pi dl} \quad (1)$$

Onde $f_{ct,sp}$ é a resistência à tração por compressão diametral (MPa), F é a força máxima obtida no ensaio (N), d é o diâmetro do corpo de prova (mm) e l é o comprimento do corpo de prova (mm).

Para comparar a resistência mecânica das amostras com adição e substituição com a referência, empregou-se a pior composição elencada pela análise estatística do planejamento experimental descrito nas Tabelas 2 e 3. Para esse fim, aplicaram-se testes para comparação de duas variâncias (Teste F) e teste para comparação de duas médias (Teste t) com auxílio do *software Excel*.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Caracterização dos resíduos

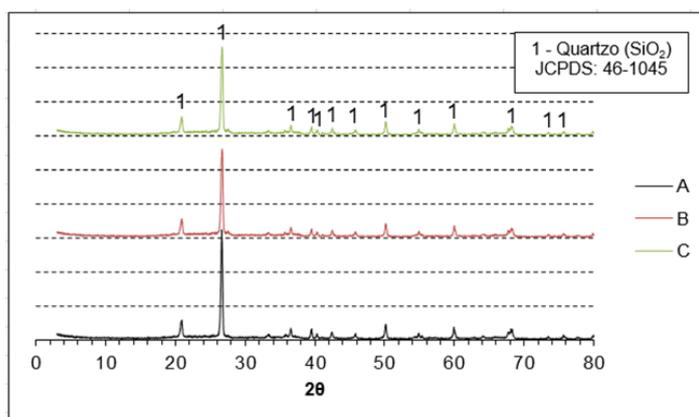
Suas análises químicas encontram-se na Tabela 4.

Tabela 4: Análise química dos resíduos de cerâmica vermelha A, B e C.

ELEMENTOS	RESÍDUO A	RESÍDUO B	RESÍDUO C
	TEOR (%)		
Al ₂ O ₃	17,93	18,42	19,18
CaO	0,13	0,28	0,18
Fe ₂ O ₃	7,35	6,10	7,56
K ₂ O	1,25	1,71	2,26
MgO	0,87	1,08	1,77
MnO	< 0,05	< 0,05	0,08
Na ₂ O	0,32	0,48	0,13
P ₂ O ₅	0,06	0,07	0,09
SiO ₂	70,20	69,64	66,51
TiO ₂	1,37	1,15	1,23
B ₂ O ₃	-	-	-
Li ₂ O	-	-	-
BaO	0,09	0,09	< 0,01
Co ₂ O ₃	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Cr ₂ O ₃	< 0,01	< 0,01	< 0,01
PbO	< 0,01	< 0,01	< 0,01
SrO	< 0,01	< 0,01	< 0,01
ZnO	< 0,01	< 0,01	< 0,01
ZrO ₂ + HfO ₂	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Perda ao fogo	< 0,39	0,79	0,84

As amostras dos resíduos submetidas à fluorescência de raios X apresentaram em maior concentração o óxido de silício (SiO₂), o óxido de alumínio (Al₂O₃) e o óxido de ferro (Fe₂O₃). Os resíduos A e B obtiveram valores próximos desses três componentes e no resíduo C o teor de óxido de silício foi ~3% menor em relação às outras amostras. Para um material ser caracterizado como pozolânico, a ABNT NBR 12653 (2015) [14] determina que a soma de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ seja igual ou superior a 70%. Os resíduos A, B e C mostraram um resultado de 95,48%, 94,16% e 93,25%, respectivamente, atendendo o requisito.

Os difratogramas de raios X dos resíduos encontram-se na Figura 1. Eles indicam que ambos os materiais possuem como fase cristalina o quartzo, SiO₂ (JCPDS: 46-1045). A intensidade do pico principal dessa fase, localizado em $2\theta \approx 26,6^\circ$, dá indicações de que a quantidade de SiO₂ presente em A > B > C, concordando com a análise química da Tabela 4, e que o resíduo C apresenta maior fase amorfa.


Figura 1: Difratogramas de raios X dos resíduos de cerâmica vermelha A, B e C.

Segundo a ABNT NBR 12653 (2015) [14], um material é considerado pozolânico quando somente 20% da amostra fica retida em peneira com abertura de 45 μm . Nos resíduos A e C, 90% das partículas ficaram abaixo desse tamanho e no resíduo B, 100%, como demonstra na Tabela 5.

Tabela 5: Análise da distribuição de tamanho de partícula dos resíduos de cerâmica vermelha A, B e C e do cimento.

	RESÍDUO A	RESÍDUO B	RESÍDUO C	CIMENTO
10% das partículas abaixo de	1,20 μm	0,95 μm	0,88 μm	2,56 μm
50% das partículas abaixo de	10,19 μm	5,05 μm	4,59 μm	16,08 μm
90% das partículas abaixo de	31,71 μm	23,49 μm	22,49 μm	45,72 μm
100% das partículas abaixo de	56,00 μm	45,00 μm	56,00 μm	90,00 μm
Diâmetro médio das partículas	13,63 μm	9,12 μm	8,59 μm	20,70 μm

3.2 Índice de consistência

A relação água/cimento e o índice de consistência de todas as misturas encontram-se na Tabela 6.

Tabela 6: Relação água/cimento e índice de consistência de cada mistura.

AMOSTRA	RELAÇÃO ÁGUA/CIMENTO	ÍNDICE DE CONSISTÊNCIA ($\pm 0,01$ mm)
Referência	0,48	259,11
1	0,51	256,60
2	0,51	262,43
3	0,52	257,35
4	0,50	263,31
5	0,50	262,45
6	0,50	260,23
7	0,50	260,81
8	0,50	262,90
9	0,50	262,24
10	0,50	259,04
11	0,50	264,32
12	0,50	262,90
13	0,50	261,02
14	0,50	262,92

Analisando a distribuição de tamanho de partícula (Tabela 5), percebe-se que o cimento apresenta um diâmetro médio superior aos resíduos. Por conta disso, as misturas de 1 a 7 necessitaram de uma quantidade maior de água, quando comparadas a de referência, para um índice de consistência fixado em (260 ± 5) mm.

A mistura 3, por conter partículas mais finas (resíduo C), precisou de uma quantidade maior de água do que as misturas 1 e 2 (resíduos A e B, respectivamente) para o índice de consistência fixado.

Os traços de substituição em que foram incorporados mais de um resíduo apresentaram a mesma relação água/cimento, mostrando que, quando misturados, a diferença nos tamanhos de partículas observada entre eles não influenciou nesta relação.

Em todas as misturas com adição de 10% de resíduo em relação à massa de cimento, para o índice de consistência fixado, o fator água/cimento foi de 0,50, sendo maior que a mistura de referência pelo acréscimo de material fino.

3.3 Análise estatística dos dados de resistência à compressão e tração

As Tabelas 7 e 8 mostram os resultados dos ensaios mecânicos de resistência à compressão e tração por compressão diametral, respectivamente.

Tabela 7: Resultados dos ensaios de resistência à compressão.

AMOSTRA	TIPO DE MISTURA	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO (MPa)				
		RÉPLICA I	RÉPLICA II	RÉPLICA III	MÉDIA	DESVIO PADRÃO
Referência		30,89	31,89	34,20	32,33	1,70
1	10% de substituição	29,71	32,53	30,57	30,94	1,45
2		30,07	28,75	31,10	29,97	1,18
3		33,42	30,14	32,31	31,96	1,67
4		29,78	30,64	28,68	29,70	0,98
5		32,67	27,96	32,21	30,95	2,60
6		32,99	30,53	32,31	31,95	1,27
7		32,64	33,49	32,06	32,73	0,72
8	10% de adição	36,81	38,73	35,74	37,09	1,52
9		36,31	38,02	29,64	34,66	4,43
10		39,27	34,24	38,59	37,37	2,73
11		37,88	35,24	38,56	37,22	1,75
12		36,42	34,49	37,56	36,15	1,55
13		38,27	37,66	37,66	37,87	0,35
14		35,10	34,13	38,31	35,85	2,18

Tabela 8: Resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral.

AMOSTRA	TIPO DE MISTURA	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL (MPa)				
		RÉPLICA I	RÉPLICA II	RÉPLICA III	MÉDIA	DESVIO PADRÃO
Referência		4,53	4,39	4,39	4,44	0,08
1	10% de substituição	4,30	3,79	4,60	4,23	0,41
2		4,28	4,41	4,30	4,33	0,07
3		4,20	4,66	4,34	4,40	0,24
4		4,07	3,73	4,34	4,05	0,31
5		3,82	4,34	3,87	4,01	0,29
6		4,48	4,16	4,07	4,24	0,21
7		3,96	4,20	3,37	3,84	0,43
8	10% de adição	4,13	4,80	4,46	4,46	0,34
9		4,48	4,67	4,15	4,44	0,26
10		4,89	4,04	4,98	4,64	0,52
11		3,85	4,83	4,35	4,34	0,49
12		5,05	4,39	4,67	4,71	0,33
13		4,94	4,61	4,48	4,68	0,24
14		4,90	4,84	4,86	4,87	0,03

Partindo dos resultados das Tabelas 7 e 8, geraram-se equações de regressão (Tabela 9) que relacionam a resistência mecânica com as frações de resíduos presentes nas adições e substituições. Optou-se pelo modelo cúbico porque, em todos os casos, ele demonstrou maior coeficiente de determinação (R^2), como se observa na Tabela 10. Esse coeficiente indica quanto o modelo é capaz de explicar os dados coletados.

Tabela 9: Equações de regressão.

TIPO DE MISTURA	EQUAÇÃO DE REGRESSÃO
10% de substituição	$f_c = 30,94A + 29,97B + 31,96C - 3,02AB - 2,00AC + 3,91BC + 51,23ABC$ (2)
10% de substituição	$f_{ct,sp} = 4,23A + 4,33B + 4,40C - 0,93AB - 1,22AC - 0,51BC - 4,87ABC$ (3)
10% de adição	$f_c = 37,09A + 34,66B + 37,37C + 5,41AB - 4,29AC + 7,41BC - 39,75ABC$ (4)
10% de adição	$f_{ct,sp} = 4,46A + 4,43B + 4,64C - 0,42AB + 0,61AC + 0,57BC + 7,32ABC$ (5)

Tabela 10: Resultado da análise estatística dos dados.

TIPO DE MISTURA	VARIÁVEL	MODELOS					
		LINEAR		QUADRÁTICO		CÚBICO	
		VALOR p	R ²	VALOR p	R ²	VALOR p	R ²
10% de substituição	f_c	0,1848	0,1710	0,5179	0,2842	0,1117	0,4064
10% de substituição	$f_{ct,sp}$	0,6396	0,0484	0,1495	0,3255	0,4258	0,3564
10% de adição	f_c	0,5743	0,0598	0,5554	0,1781	0,4159	0,2174
10% de adição	$f_{ct,sp}$	0,4252	0,0906	0,5643	0,2028	0,3122	0,2609

 Intervalo de confiança: 95%; $\alpha = 0,05$.

Na Tabela 9, A, B e C são as frações de cada resíduo que compõem a adição e a substituição e f_c e $f_{ct,sp}$ são a resistência à compressão e à tração, respectivamente.

As Figuras 2 a 5 demonstram as superfícies de resposta para os modelos propostos.

A Equação 2 e a Figura 2 indicam que a máxima resistência à compressão das argamassas com 10% de substituição é atingida em uma região próxima ao ponto central do planejamento experimental, deslocada para uma maior fração do resíduo C. Já a resistência à tração (Equação 3 e Figura 3) reduz a medida em que a composição se aproxima da central.

Comparando as Figuras 2 e 3, verifica-se que a substituição composta apenas pelo resíduo C concilia valores superiores de resistência mecânica – compressão e tração.

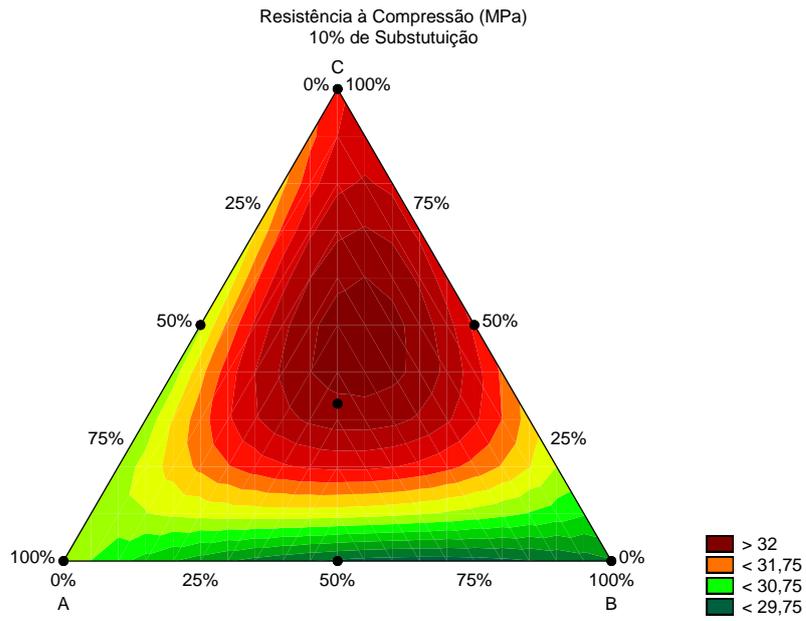


Figura 2: Superfície de resposta do modelo 1.

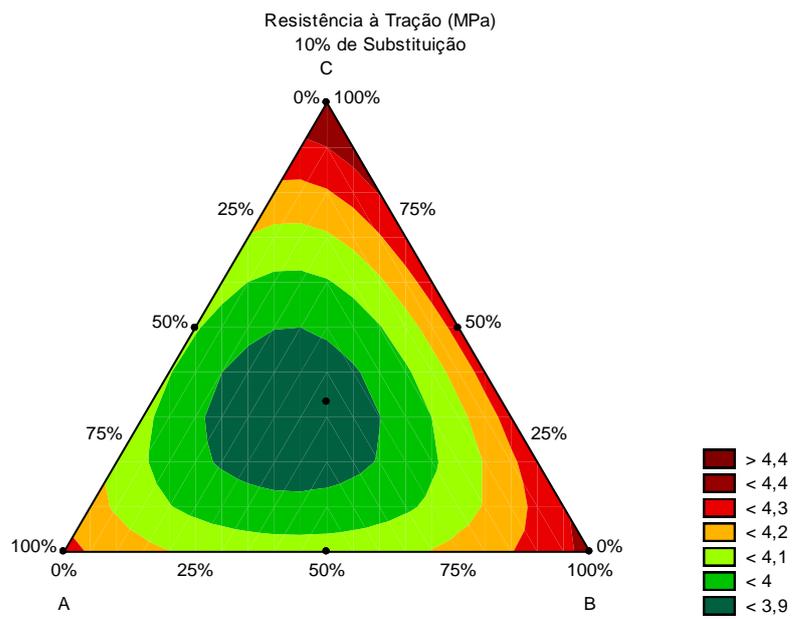


Figura 3: Superfície de resposta do modelo 2.

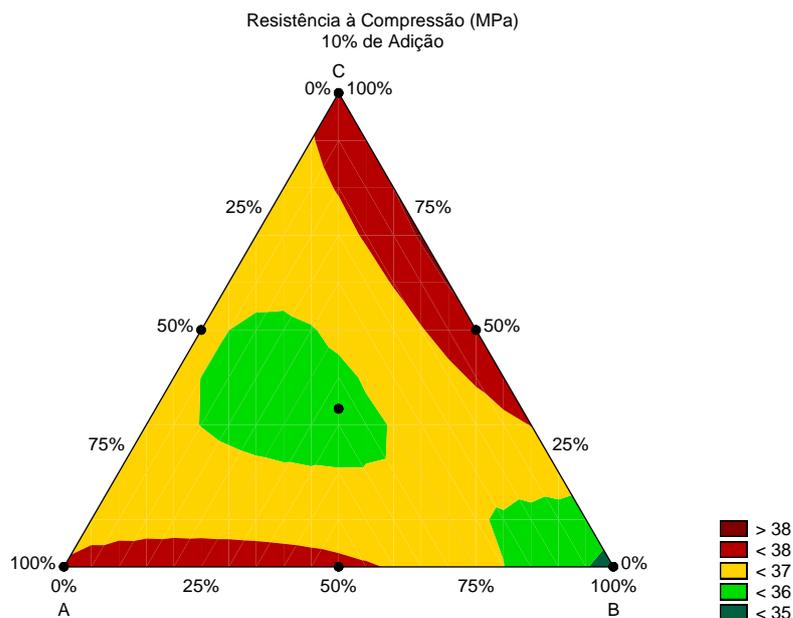


Figura 4: Superfície de resposta do modelo 3.

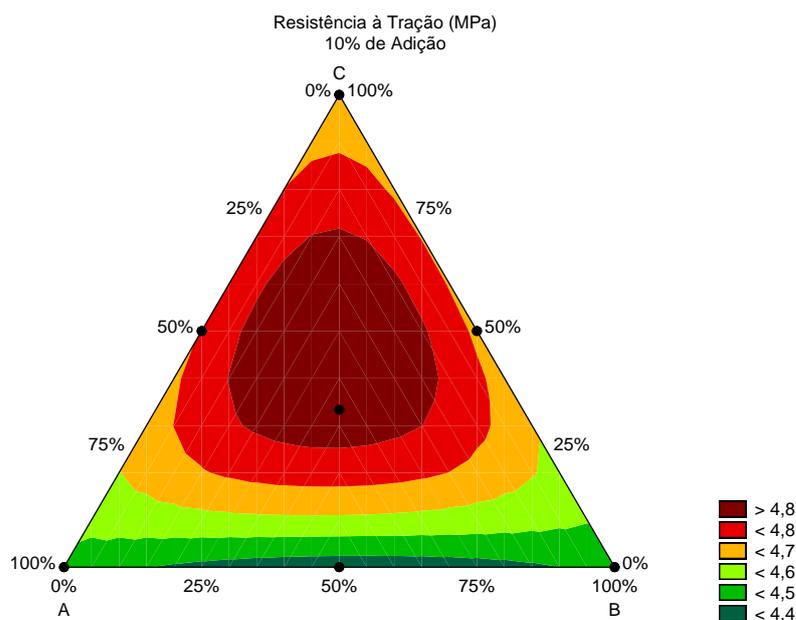


Figura 5: Superfície de resposta do modelo 4.

A Equação 4 e a Figura 4 indicam que a máxima resistência à compressão das argamassas com 10% de adição é atingida com os resíduos puros A e C ou com composições do tipo A (%A ≥ 50) + B com baixo teor de C ou B + C (%C ≥ 30) com baixo teor de A. Já a resistência à tração (Equação 5 e Figura 5) é máxima para composições próximas ao ponto central do planejamento e reduz para aquelas do tipo A + B com baixo teor de C.

Assim como identificado para a substituição, verifica-se, por meio das Figuras 4 e 5, que também a adição composta apenas pelo resíduo C concilia valores superiores de resistência mecânica – compressão e tração.

Como demonstra a Tabela 4, o teor de elementos com características pozolânicas dos resíduos A, B e C foi próximo. Assim, o melhor desempenho de C pode ser relacionado com seu maior conteúdo de fase amorfa [2], comprovado nos difratogramas de raios X da Figura 1.

Embora se observe que mudanças na composição das adições e substituições alteram as propriedades mecânicas, o Valor p para os modelos propostos, destacados na Tabela 10, são superiores ao nível de significância adotado (Valor $p > \alpha$, sendo $\alpha = 0,05$), apontando que os modelos não são estatisticamente significativos. Esse resultado sugere que a resistência mecânica das argamassas não é significativamente alterada pela composição das adições e substituições e que há outros fatores que interferem nessa propriedade, como relação água/cimento, tipo de cimento, ar incorporado, agregado, porosidade [19] e teor de adição/substituição.

Como as composições contendo os resíduos A e B demonstraram, no geral, as piores propriedades mecânicas, elas foram escolhidas para a comparação com as amostras de referência. Os testes estatísticos encontram-se nas Tabelas 11 e 12 e foram conduzidos ao nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$), adotando-se como hipóteses:

Teste F

$H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2$; a variância da resistência mecânica da amostra de referência (σ_1^2) é igual à variância da resistência mecânica da amostra com adição/substituição (σ_2^2).

$H_1: \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$; a variância da resistência mecânica da amostra de referência (σ_1^2) é diferente da variância da resistência mecânica da amostra com adição/substituição (σ_2^2).

Teste t

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

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

Tabela 11: Teste F: duas amostras para variâncias.

σ_1^2	σ_2^2	F	VALOR p
Referência	10% de substituição (compressão)	2,9859	0,5018
	10% de substituição (tração)	0,0699	0,1307
	10% de adição (compressão)	0,9370	0,9675
	10% de adição (tração)	0,0272	0,0530

$\alpha = 0,05$.

Na Tabela 11, para todas as comparações o Valor $p > \alpha$, sendo $\alpha = 0,05$. Assim, aceita-se H_0 , pois não há evidências estatísticas de que as variâncias não são equivalentes. Logo, o Teste t aplicado pressupõe equivalência.

Tabela 12: Teste t: duas amostras presumindo variâncias equivalentes.

μ_1	μ_2	t	VALOR p
Referência	10% de substituição (compressão)	2,3195	0,0812
	10% de substituição (tração)	2,1365	0,0995
	10% de adição (compressão)	-3,4771	0,0254
	10% de adição (tração)	0,3255	0,7611

$\alpha = 0,05$.

Na Tabela 12, o Valor $p < \alpha$ observado para a comparação entre a resistência à compressão da amostra de referência e a com 10% de adição indica que há evidências estatísticas de que as médias são diferentes. Rejeita-se H_0 . Com base na Tabela 7, deduz-se que a resistência dos corpos de prova com adição de resíduo A + B (Amostra 11) – $(37,22 \pm 1,75)$ MPa – é superior à de referência, $(32,33 \pm 1,70)$ MPa.

Para as demais situações abordadas na Tabela 12, aceita-se H_0 . Os Valores $p > \alpha$ comprovam que não há evidências estatísticas de que as médias de resistência mecânica das amostras com adição/substituição

sejam diferentes da de referência.

Pesquisadores verificaram uma queda de resistência à compressão de 20 e 30% para 25 e 40% de substituição em argamassa [1], indicando que o aumento do percentual de resíduo prejudica as propriedades mecânicas.

Logo, a utilização em argamassas, em quantidades específicas e já estudadas, é uma alternativa viável para o uso dos resíduos de cerâmica vermelha, independente de suas origens.

4. CONCLUSÕES

A região sul de Santa Catarina concentra muitas empresas do segmento de cerâmica vermelha, originando resíduos que devem ser descartados corretamente.

A metodologia estatística adotada neste estudo demonstrou que, para traços de 10%, a variação na composição das adições/substituições não é significativa para as propriedades mecânicas das argamassas, não prejudicando o desempenho destes materiais.

Nos traços em que o resíduo foi incorporado como substituição, as propriedades mecânicas equivale-ram-se a amostra de referência, o que permite a redução do consumo de cimento.

Nas misturas em que foi adicionado, a resistência à tração foi semelhante ao valor de referência e ocorreu um acréscimo na compressão, melhorando seu comportamento quando a argamassa está sujeita a este esforço.

Esses resultados comprovam que a variabilidade das composições dos resíduos A, B e C, analisada por espectrometria de fluorescência de raios X e difratometria de raios X, não interferiu nas propriedades mecânicas analisadas, garantindo que todos os refugos de materiais de cerâmica vermelha do sul catarinense podem ser utilizados na produção de argamassas de revestimento.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] PEREIRA-DE-OLIVEIRA, L.A., CASTRO-GOMES, J.P., SANTOS, P.M.S., “The potential pozzolanic activity of glass and red-clay ceramic waste as cement mortars components”, *Construction and Building Materials*, v. 31, pp. 197–203, 2012.
- [2] GARCIA, E., CABRAL JUNIOR, M., QUARCIONO, V.Â., CHOTOLI, F.F., “Resíduo de Cerâmica Vermelha (RCV): Uma Alternativa como Material Pozolânico”, *Cerâmica Industrial*, v. 19, n. 4, pp. 31–38, 2014.
- [3] LOTHENBACH, B., SCRIVENER, K., HOOTON, R.D., “Supplementary cementitious materials”, *Cement and Concrete Research*, v. 41, n. 12, pp. 1244–1256, 2011.
- [4] DAL MOLIN, D.C.C., “Adições Minerais”, In: Isaia, G.C. (eds), *Concreto: ciência e tecnologia*, São Paulo, Brasil, IBRACON, 2011.
- [5] AWOYERA, P.O., DAWSON, A.R., THOM, N.H., *et al.*, “Suitability of mortars produced using laterite and ceramic wastes : Mechanical and microscale analysis”, *Construction and Building Materials*, v. 148, pp. 195–203, 2017.
- [6] PACHECO-TORGAL, F., JALALI, S., “Reusing ceramic wastes in concrete”, *Construction and Building Materials*, v. 24, n. 5, pp. 832–838, 2010.
- [7] EL-GAMAL, S.M.A., EL-HOSINY, F.I., AMIN, M.S., *et al.*, “Ceramic waste as an efficient material for enhancing the fire resistance and mechanical properties of hardened Portland cement pastes”, *Construction and Building Materials*, v. 154, pp. 1062–1078, 2017.
- [8] AWOYERA, P.O., NDAMBUKI, J.M., AKINMUSURU, J.O., *et al.*, “Characterization of ceramic waste aggregate concrete”, *HBRC Journal*, v. 14, n. 3, pp. 282–287, 2018.
- [9] MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, *Anuário estatístico do setor de transformação de não metálicos*. 2018.
- [10] SALES, A.T.C., ALFERES FILHO, R. dos S., “Efeito do pó de resíduo cerâmico como adição ativa para o concreto”, *Ambiente Construído*, v. 14, n. 1, pp. 113–125, 2014.
- [11] KESHAVARZ, Z., MOSTOFINEJAD, D., “Porcelain and red ceramic wastes used as replacements for coarse aggregate in concrete”, *Construction and Building Materials*, v. 195, pp. 218–230, 2019.
- [12] ALVES, A.V., VIEIRA, T.F., BRITO, J. DE, *et al.*, “Mechanical properties of structural concrete with

- fine recycled ceramic aggregates”, *Construction and Building Materials*, v. 64, pp. 103–113, 2014.
- [13] TIRONI, A., TREZZA, M.A., SCIAN, A.N., *et al.*, “Cement & Concrete Composites Assessment of pozzolanic activity of different calcined clays”, *Cement and Concrete Composites.*, v. 37, pp. 319–327, 2013.
- [14] ABNT NBR 12653, “Materiais pozolânicos - Requisitos”, 2015.
- [15] ABNT NBR 16541, “Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura para a realização de ensaios”, 2016.
- [16] ABNT NBR 13276, “Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência”, 2016.
- [17] ABNT NBR 7215, “Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão”, 1996.
- [18] ABNT NBR 7222, “Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos”, 2011.
- [19] MEHTA, P.K., MONTEIRO, P.J., *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*, 3 ed, São Paulo, IBRACON, 2008.

ORCID

Elen Machado de Oliveira	https://orcid.org/0000-0001-6554-0583
Elis Machado de Oliveira	https://orcid.org/0000-0003-2821-3211
Michael Peterson	https://orcid.org/0000-0002-5002-1294
Fernando Pelisser	https://orcid.org/0000-0002-6113-5473
Camila Machado de Oliveira	http://orcid.org/0000-0002-3740-6157
Elaine Guglielmi Pavei Antunes	https://orcid.org/0000-0002-9698-1100