

# ANÁLISE DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E TRAÇÃO DE ARGAMASSA COM ADIÇÃO DE RESÍDUO DE CERÂMICA VERMELHA

Elen Machado de Oliveira (1); Camila Machado de Oliveira (2); Elaine Guglielmi Pavei Antunes (3)

UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense

(1)[elen0407@hotmail.com](mailto:elen0407@hotmail.com), (2)[machadodeoliveirac@gmail.com](mailto:machadodeoliveirac@gmail.com), (3)[elainegpa@unesec.net](mailto:elainegpa@unesec.net)

## RESUMO

A crescente produção 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 e finura, 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 quanto as suas propriedades pozolânicas 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 pozolânicas 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. Reação pozolânica. Argamassa. Resistência mecânica.*

## 1. INTRODUÇÃO

A incorporação de adições minerais na fabricação de cimentos, concretos e/ou argamassas, com o intuito de aumentar sua durabilidade e desempenho, vem crescendo nos últimos anos, especialmente por preocupações ambientais e aspectos econômicos. Essas introduções proporcionam maior sustentabilidade na cadeia produtiva do cimento, pois permitem a reciclagem de resíduos industriais ou

subprodutos, além de reduzirem o consumo de recursos naturais não renováveis (GARCIA et al., 2014).

O crescente aumento da geração de resíduos, provenientes da etapa de produção, está relacionado com a evolução de diferentes áreas da economia, principalmente a industrial (SALES e ALFERES FILHO, 2014). Esse fenômeno resulta, para diversos setores da sociedade, em uma preocupação quanto à sua disposição final, comprometimento visual da paisagem e sua ocupação da superfície (MEDEIROS et al., 2010).

A viabilidade do uso de resíduos na construção civil depende de sua quantidade e localização (CINCOTTO, 1988 apud MEDEIROS et al., 2010). Em Santa Catarina, segundo dados da FIESC de 2014, existem 700 empresas de cerâmica vermelha, sendo que aproximadamente 160 localizam-se na região sul do estado (PAGNAN, 2016).

No Brasil, em 2013, foi estimada uma produção de 70,8 bilhões de peças de cerâmica vermelha, considerando a massa média de 2 kg/peça e a argila como principal matéria-prima, utilizaram-se 141,6 milhões de toneladas (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2015).

A quantidade de resíduos gerada na indústria de cerâmica vermelha - blocos, telhas, lajotas e tijolos - varia conforme os métodos de produção, podendo ser fruto de ruptura no processo de queima ou no transporte, além de peças com defeito (SALES e ALFERES FILHO, 2014). Aproximadamente 30% das empresas em todo o Brasil reduziram suas perdas para 5 a 10%, as demais ultrapassam 15%, segundo relato de Pagnan (2016), presidente do Sindicato da Indústria da Cerâmica Vermelha (SINDICER).

Os impactos ambientais predominantes associados à indústria de cerâmica vermelha estão relacionados com fatores que ocorrem nas diversas etapas da concepção do produto, culminando em problemas como a degradação dos locais de extração de argila, gasto de energia, produção de resíduos sólidos resultantes das peças com defeito e emissão de gases do efeito estufa e poluentes atmosféricos (MACHADO JUNIOR e TORQUETTI, 2013).

As adições minerais são constituídas de materiais silicosos finamente fragmentados que, quando 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)<sub>2</sub>], produzido ao longo dessa hidratação, forma silicato de cálcio hidratado (CSH), sendo designada como reação pozolânica (DAL MOLIN, 2011).

Os resíduos de cerâmica vermelha apresentam propriedades capazes de gerar essa reação, mas não são empregados no país como pozolanas. A argila calcinada, principalmente a de composição caulinítica (metacaulinita), é o tipo mais comum de adição mineral e vem conquistando espaço no mercado brasileiro (GARCIA et al., 2014).

Existem inúmeros fatores que influenciam a atividade pozolânica, entre eles destacam-se o tipo e quantidade de minerais argilosos, a natureza e número de impurezas, o tratamento térmico aplicado e a superfície específica obtida (TIRONI et al., 2013).

A temperatura utilizada pelas indústrias de cerâmica vermelha para a queima de seus produtos varia entre 700 °C e 900 °C, pois nesse intervalo começa o processo de sinterização, com pouca produção de fase vítrea e quase nenhuma formação de fases minerais. Em relação às transformações químicas, acontece a desidroxilação e amorfismo dos argilominerais, o que deve garantir a reatividade química de natureza pozolânica quando fragmentados (GARCIA et al., 2014). Materiais ricos em sílica e/ou alumina reativas e com granulometria fina podem ser empregados como pozolanas em argamassas e concretos (PONTES et al., 2012).

As propriedades das cerâmicas fabricadas e, conseqüentemente, seus resíduos estão relacionadas com a velocidade em que acontece o aumento de temperatura, a temperatura máxima atingida durante o processo de queima e o seu tempo de permanência, a velocidade de resfriamento e a regularidade da temperatura no forno (KAZMIERCZAK, 2007).

Mehta e Monteiro (2008) destacam algumas vantagens do uso de pozolana em concreto com cimento Portland, como o aumento da resistência à fissuração pela redução da reação álcali-agregado, aumento da trabalhabilidade do material, impermeabilidade e também maior durabilidade.

Os revestimentos exteriores, como as argamassas, desempenham um papel fundamental para a vida útil de uma estrutura, pois a recobrem como uma pele, sendo a primeira camada de proteção, estando mais sujeitos as ações de degradação (ASHWORTH, 1996).

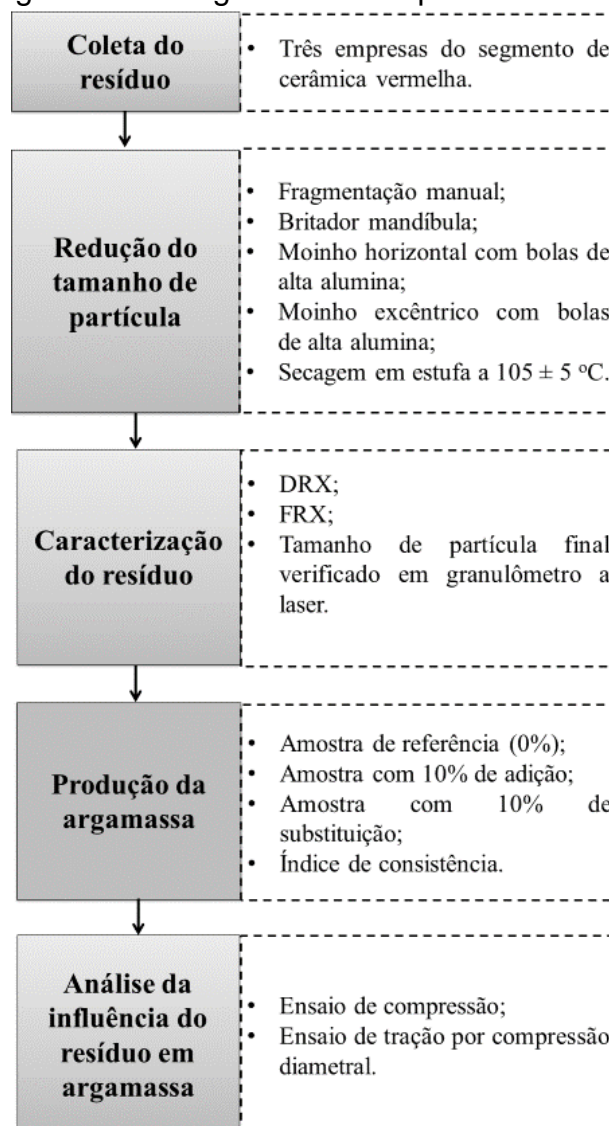
Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento mecânico (resistência à compressão e tração) de argamassa de revestimento

contendo resíduo de cerâmica vermelha. A variabilidade composicional de resíduos fornecidos por empresas da região sul catarinense será analisada quanto as suas características pozolânicas. Testar-se-ão diferentes composições de argamassas com o resíduo, em percentuais de 10% de adição e substituição em relação à massa de cimento, que seguem a metodologia de um planejamento experimental de misturas.

## 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.

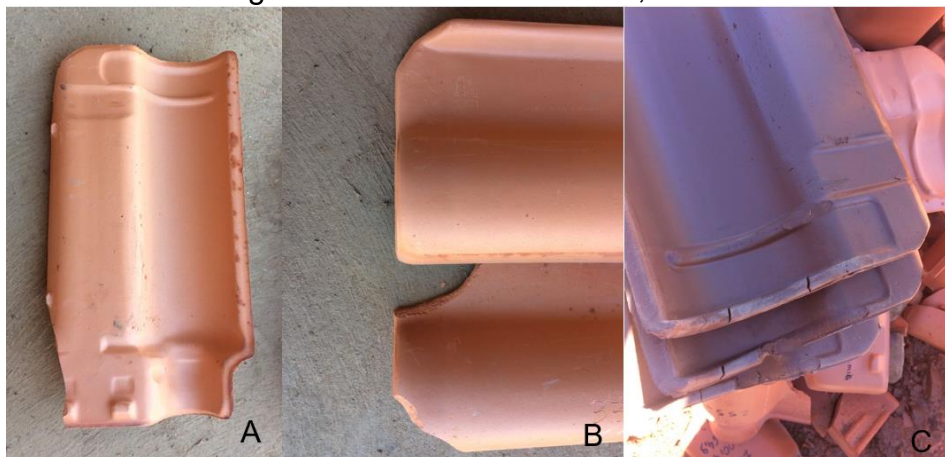


Fonte: Do Autor, 2016.

Para verificar 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%.

Coletaram-se os resíduos em três empresas da região sul de Santa Catarina (Figura 2). Para adequar-se a etapa de moagem, eles 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  $\mu\text{m}$  fossem inferiores a 20%, atendendo a ABNT NBR 12653 (2014), 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  $105 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ . O tamanho de partícula final dos resíduos foi verificado em um granulômetro a laser Cilas 1064 no Laboratório de Desenvolvimento e Caracterização de Materiais (LDCM/SENAlsc/Criciúma – CTCmat).

Figura 2 – Resíduos brutos A, B e C.



Fonte: Do Autor, 2016.

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 do Laboratório de Desenvolvimento e Caracterização de Materiais (LDCM/SENAlsc/Criciúma - CTCmat) e
- Difractometria de raios X (DRX): ensaios em difratômetro de raios X pertencente ao Instituto de Engenharia e Tecnologia (IDT/UNESC), marca Shimadzu, modelo XRD-6000, goniômetro theta theta, radiação k- $\alpha$  com tubo de cobre de

comprimento de onda ( $\lambda$ ) 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 13276 (2005) no Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) do IDT/UNESC. 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 mesma ABNT NBR. 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

Fonte: Do Autor, 2016.

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%

Fonte: Do Autor, 2016.

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 - Traços das composições com 10% de adição e substituição segundo o planejamento experimental.

Amostra	Tipo de mistura	Resíduo A	Resíduo B	Resíduo C
1		0,10	-	-
2		-	0,10	-
3	10% de substituição 0,90: 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		0,10	-	-
9		-	0,10	-
10	10% de adição 1: 3	-	-	0,10
11		0,05	0,05	-
12		0,05	-	0,05
13		-	0,05	0,05
14		0,033	0,033	0,033

Fonte: Do Autor, 2016.

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 (1996). 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 procedimento aconteceu no LMCC/IDT/UNESC.

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral foi realizado como estabelece a ABNT NBR 7222 (2011). 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, pertencente ao LMCC/IDT/UNESC, 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).

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

Onde

$f_{ct,sp}$ : resistência à tração por compressão diametral (MPa);

F: força máxima obtida no ensaio (N);

d: diâmetro do corpo de prova (mm) e

l: 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

A Figura 3 mostra os resíduos A, B e C após os processos de cominuição e secagem.

Figura 3 - Resíduos A, B e C após o processo de cominuição.



Fonte: Do Autor, 2016.

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

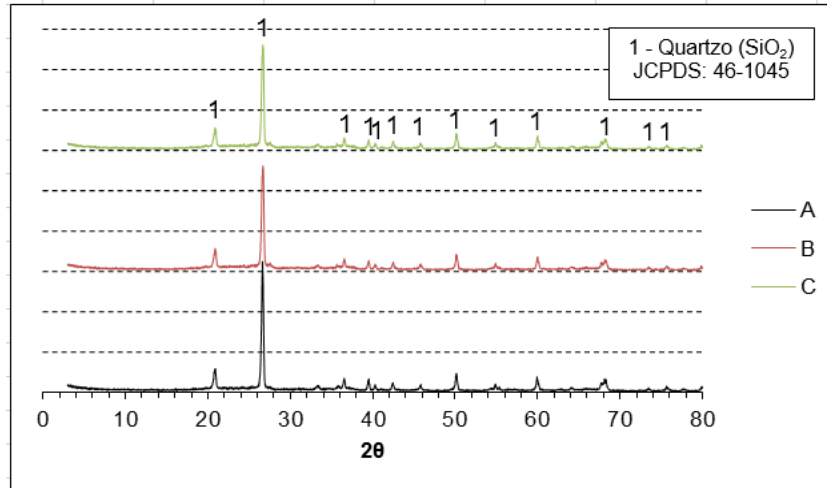
Fonte: Do Autor, 2016.

As amostras dos resíduos submetidas à fluorescência de raios X apresentaram em maior concentração o óxido de silício (SiO<sub>2</sub>), o óxido de alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) e o óxido de ferro (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). 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 (2014) determina que a soma de SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 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 4. Eles indicam que ambos os materiais possuem como fase cristalina o quartzo, SiO<sub>2</sub> (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  $\text{SiO}_2$  presente em  $A > B > C$ , concordando com a análise química da Tabela 4, e que o resíduo C apresenta maior fase amorfa.

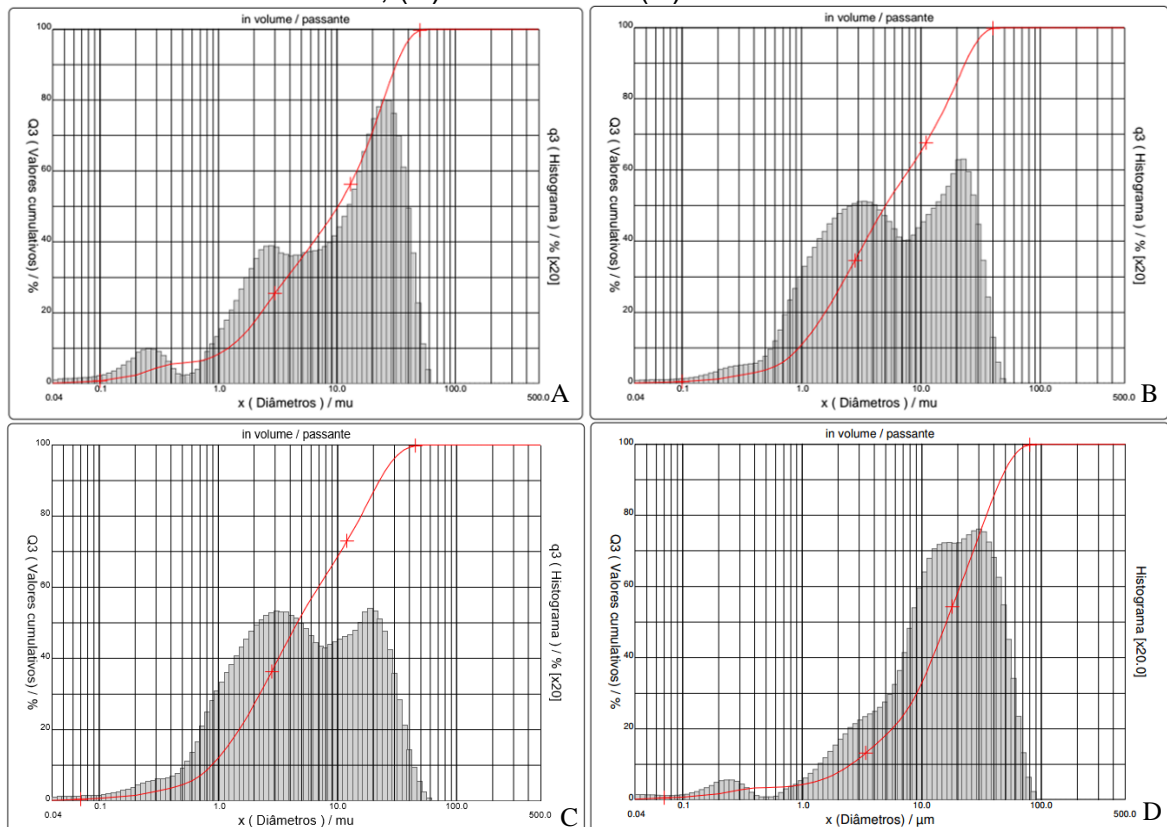
Figura 4 - Difratomogramas de raios X dos resíduos de cerâmica vermelha A, B e C.



Fonte: Do Autor, 2016.

A Figura 5 traz as curvas de distribuição de tamanho de partícula dos resíduos A, B e C e também do cimento CP II Z 32.

Figura 5 - Curva de distribuição de tamanho de partícula: (A) Resíduo A, (B) Resíduo B, (C) Resíduo C e (D) Cimento.



Fonte: Do Autor, 2016.

Segundo a ABNT NBR 12653 (2014), um material é considerado pozolânico quando somente 20% da amostra fica retida em peneira com abertura de 45  $\mu\text{m}$ . 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 $\mu\text{m}$	0,95 $\mu\text{m}$	0,88 $\mu\text{m}$	2,56 $\mu\text{m}$
50% das partículas abaixo de	10,19 $\mu\text{m}$	5,05 $\mu\text{m}$	4,59 $\mu\text{m}$	16,08 $\mu\text{m}$
90% das partículas abaixo de	31,71 $\mu\text{m}$	23,49 $\mu\text{m}$	22,49 $\mu\text{m}$	45,72 $\mu\text{m}$
100% das partículas abaixo de	56,00 $\mu\text{m}$	45,00 $\mu\text{m}$	56,00 $\mu\text{m}$	90,00 $\mu\text{m}$
Diâmetro médio das partículas	13,63 $\mu\text{m}$	9,12 $\mu\text{m}$	8,59 $\mu\text{m}$	20,70 $\mu\text{m}$

Fonte: Do Autor, 2016.

### 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

Fonte: Do Autor, 2016.

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  $(260 \pm 5)$  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		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	10% de substituição	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

Fonte: Do Autor, 2016.

Tabela 7 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão (continuação).

Amostra	Tipo de mistura	Resistência à compressão (MPa)				
		Réplica I	Réplica II	Réplica III	Média	Desvio padrão
8		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	10% de adição	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

Fonte: Do Autor, 2016.

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		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	10% de substituição	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		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	10% de adição	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

Fonte: Do Autor, 2016.

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)

Fonte: Do Autor, 2016.

Tabela 10 - Resultado da análise estatística dos dados.

Tipo de mistura	Variável	Modelos					
		Linear		Quadrático		Cúbico	
		Valor p	R <sup>2</sup>	Valor p	R <sup>2</sup>	Valor p	R <sup>2</sup>
10% de substituição	$f_c$	0,1848	0,1710	0,5179	0,2842	<b>0,1117</b>	<b>0,4064</b>
10% de substituição	$f_{ct,sp}$	0,6396	0,0484	0,1495	0,3255	<b>0,4258</b>	<b>0,3564</b>
10% de adição	$f_c$	0,5743	0,0598	0,5554	0,1781	<b>0,4159</b>	<b>0,2174</b>
10% de adição	$f_{ct,sp}$	0,4252	0,0906	0,5643	0,2028	<b>0,3122</b>	<b>0,2609</b>

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

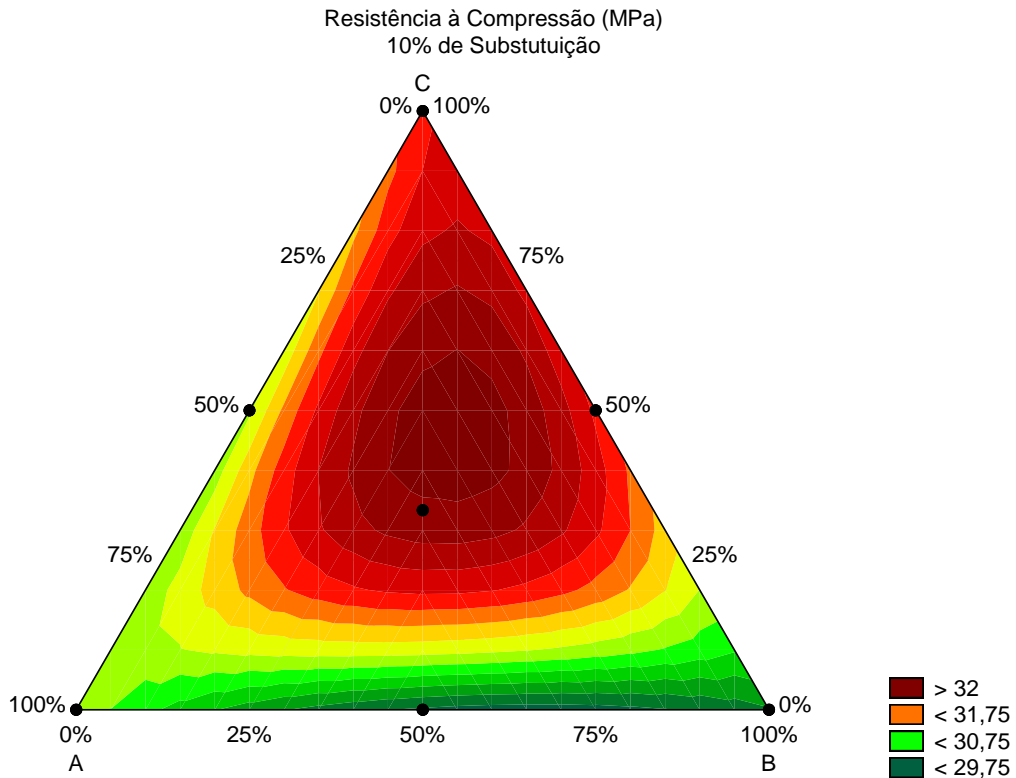
Fonte: Do Autor, 2016.

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 6 a 9 demonstram as superfícies de resposta para os modelos propostos. A Equação 2 e a Figura 6 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 7) reduz a medida em que a composição se aproxima da central.

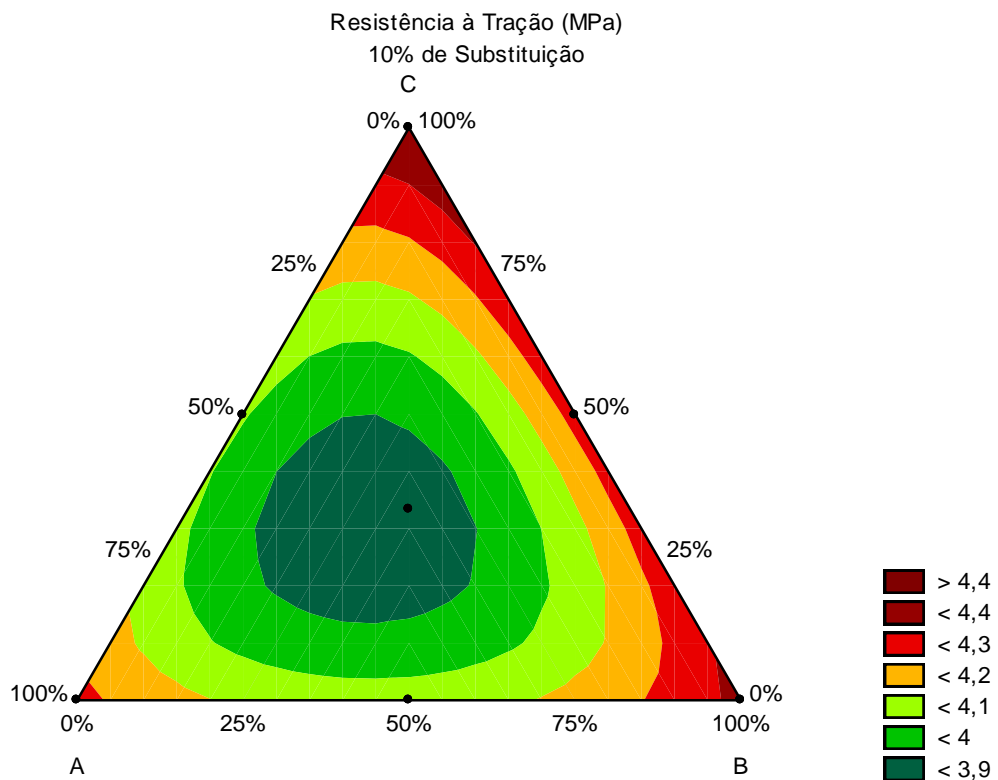
Comparando as Figuras 6 e 7, verifica-se que a substituição composta apenas pelo resíduo C concilia valores superiores de resistência mecânica – compressão e tração.

Figura 6 - Superfície de resposta do modelo 1.



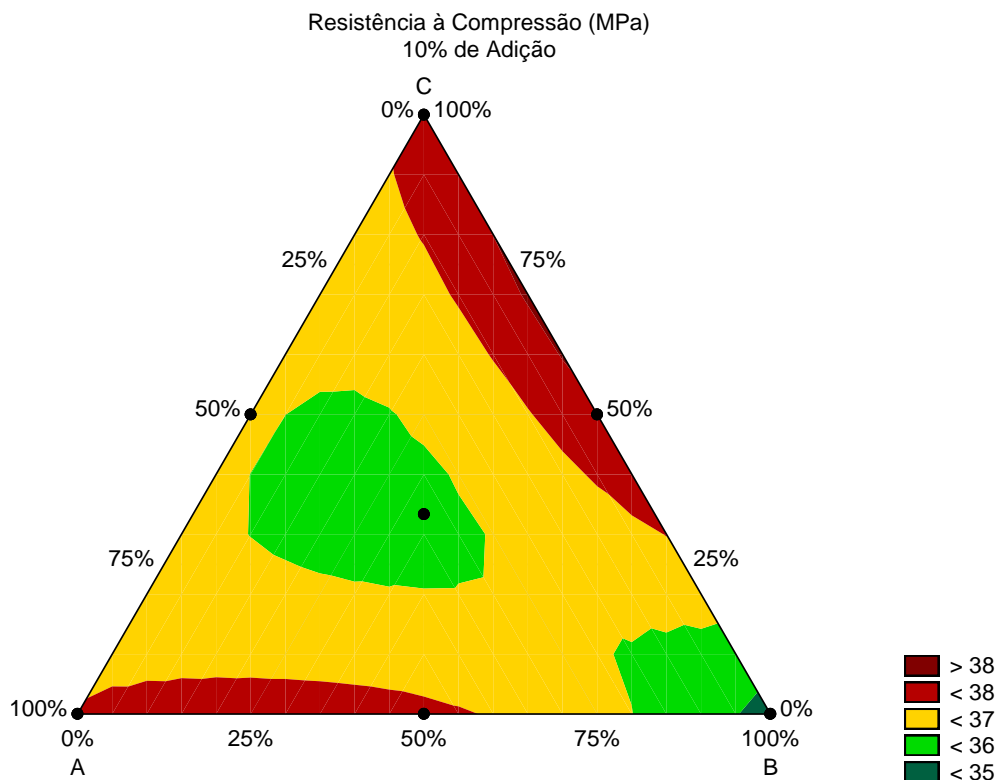
Fonte: Do Autor, 2016.

Figura 7 - Superfície de resposta do modelo 2.



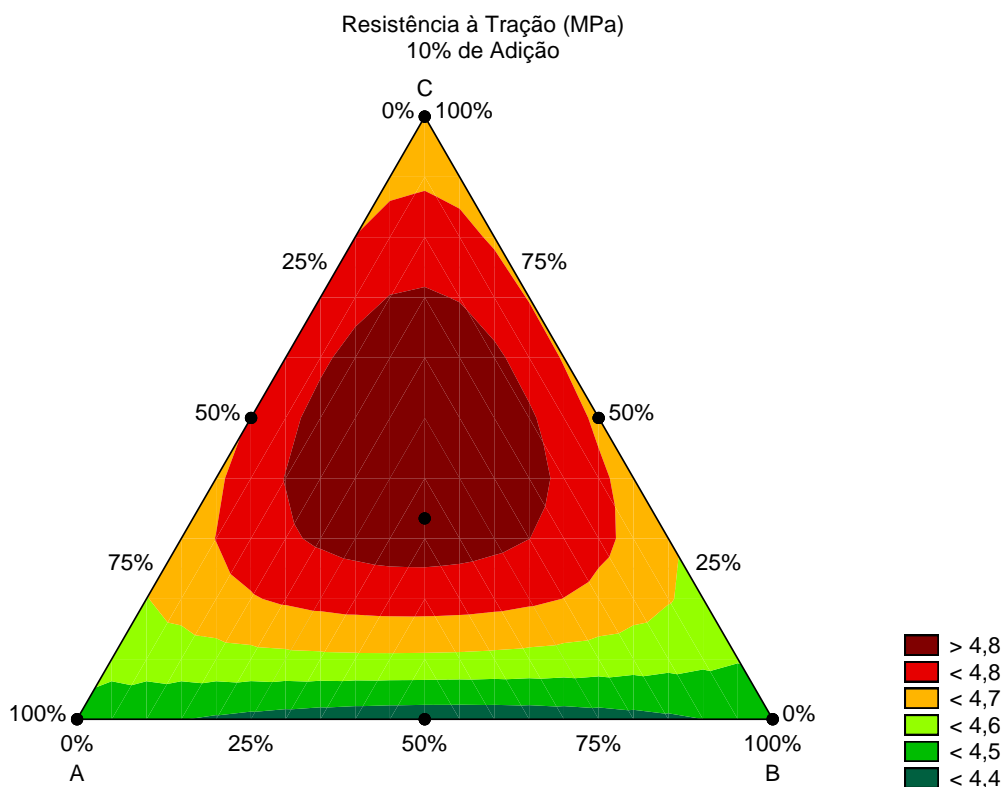
Fonte: Do Autor, 2016.

Figura 8 - Superfície de resposta do modelo 3.



Fonte: Do Autor, 2016.

Figura 9 - Superfície de resposta do modelo 4.



Fonte: Do Autor, 2016.



A Equação 4 e a Figura 8 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  $\geq$  50) + B com baixo teor de C ou B + C (%C  $\geq$  30) com baixo teor de A. Já a resistência à tração (Equação 5 e Figura 9) 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 8 e 9, 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 (GARCIA et al., 2014), comprovado nos difratogramas de raios X da Figura 4.

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 (MEHTA E MONTEIRO, 2008) 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<sub>0</sub>:  $S_1 = S_2$ ; a variância da resistência mecânica da amostra de referência ( $S_1$ ) é igual à variância da resistência mecânica da amostra com adição/substituição ( $S_2$ ).

H<sub>1</sub>:  $S_1 \neq S_2$ ; a variância da resistência mecânica da amostra de referência ( $S_1$ ) é diferente da variância da resistência mecânica da amostra com adição/substituição ( $S_2$ ).

## Teste t

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

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

Tabela 11 - Teste F: duas amostras para variâncias.

S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	F	Valor p (F ≤ f) bi-caudal
Referência	10% de substituição (compressão)	2,9859	<b>0,5018</b>
	10% de substituição (tração)	0,0699	<b>0,1307</b>
	10% de adição (compressão)	0,9370	<b>0,9675</b>
	10% de adição (tração)	0,0272	<b>0,0530</b>

$\alpha = 0,05$ .

Fonte: Do Autor, 2016.

Na Tabela 11, para todas as comparações o Valor p (F ≤ f) >  $\alpha$ , 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.

$\mu_1$	$\mu_2$	T	Valor p (T ≤ t) bi-caudal
Referência	10% de substituição (compressão)	2,3195	<b>0,0812</b>
	10% de substituição (tração)	2,1365	<b>0,0995</b>
	10% de adição (compressão)	-3,4771	<b>0,0254</b>
	10% de adição (tração)	0,3255	<b>0,7611</b>

$\alpha = 0,05$ .

Fonte: Do Autor, 2016.

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 ± 1,75) MPa – é superior à de referência, (32,33 ± 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.

#### 4. CONCLUSÃO

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 equivaleram-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. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliar a influência de outros percentuais de adição e substituição do resíduo de cerâmica vermelha na resistência à compressão e tração;
- Realizar outros ensaios para o percentual de 10% de adição e substituição;
- Estudar novos traços com a incorporação do resíduo;
- Verificar a influência do resíduo de cerâmica vermelha na resistência à compressão e tração mantendo fixa a relação água/cimento;
- Realizar ensaio de análise química e microestrutural na argamassa com incorporação do resíduo;
- Realizar ensaios para analisar a argamassa com adição do resíduo exposta a intempéries.

## 6. REFERÊNCIAS

ASHWORTH, Allan. Estimating the life expectancies of building components in life-cycle costing calculations. **Structural Survey**, v. 14, p. 4-8, 1996.

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

\_\_\_\_\_. **NBR 7222**: Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

\_\_\_\_\_. **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.

DAL MOLIN, Denise Carpena Coitinho. Adições Minerais. In: ISAIA, Geraldo Cechella. **Concreto: ciência e tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011. p. 261-309.

GARCIA, Eduardo; CABRAL JUNIOR, Marsis; QUARCIONI, Valdecir Ângelo; CHOTOLI, Fabiano Ferreira. Resíduo de Cerâmica Vermelha (RCV): Uma alternativa como Material Pozolânico. **Cerâmica Industrial**, v. 19, n. 4, p. 31-38, jul./ago. 2014.

KAZMIERCZAK, Claudio de Souza. Produtos de Cerâmica Vermelha. In: ISAIA, Geraldo Cechella. **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São Paulo: IBRACON, 2007. p. 563-585.

MACHADO JUNIOR, Olavo; TORQUETTI, Zuleika Stela Chiacchio. **Guia técnico ambiental da indústria de cerâmica vermelha**. Belo Horizonte, 2013.

MEDEIROS, E. N. M. de; SPOSTO, R. M.; NEVES, G. de A.; MENEZES, R. R. Incorporação de cinza de lenha, lodo de estação de tratamento de água e cinza de casca de arroz em massa cerâmica. **Cerâmica**, v. 56, n. 340, p. 399-404, 2010.

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

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Anuário estatístico do setor de transformação de não metálicos**. 2015.

PAGNAN, Sérgio. Mensagem para: Elen Machado de Oliveira. 18 abr. 2016.

PONTES, Jorge; SILVA, António Santos; Faria, Paulina. Contributos para a melhoria da durabilidade e sustentabilidade de argamassas e betões – avaliação da reatividade de pozolanas artificiais. In: CONGRESSO CONSTRUÇÃO, 4., 2012, Coimbra. **Anais...** Coimbra: 2012. p. 12.

SALES, Angela Teresa Costa; ALFERES FILHO, Ricardo dos Santos. Efeito do pó de resíduo cerâmico como adição ativa para o concreto. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 1, jan./mar. 2014.

TIRONI, Alejandra; TREZZA, Monica A.; SCIAN, Alberto N.; IRASSAR, Edgardo F. Assessment of pozzolanic activity of different calcined clays. **Cement & Concrete Composites**, v. 37, p. 319-327, 2013.