

## Statistical analysis of mechanical properties of mortars with fly ash and waste tire rubber

### *Análise estatística de propriedades mecânicas de argamassas com cinza volante e resíduo de borracha de pneus*



**A. PCZIECZEK**<sup>a</sup>  
[adriane\\_sbs@hotmail.com](mailto:adriane_sbs@hotmail.com)  
<https://orcid.org/0000-0003-1349-9480>

**C. EFFTING**<sup>a</sup>  
[carmeane.effting@udesc.br](mailto:carmeane.effting@udesc.br)  
<https://orcid.org/0000-0001-5457-5457>

**I. R. GOMES**<sup>a</sup>  
[itamar.gomes@udesc.br](mailto:itamar.gomes@udesc.br)  
<https://orcid.org/0000-0002-2663-9123>

**A. SCHACKOW**<sup>a</sup>  
[adilson.schackow@udesc.br](mailto:adilson.schackow@udesc.br)  
<https://orcid.org/0000-0003-2561-5231>

**E. HENNING**<sup>b</sup>  
[elisa.henning@udesc.br](mailto:elisa.henning@udesc.br)  
<https://orcid.org/0000-0002-7754-9451>

#### Abstract

This article aims to perform statistical analysis on the inclusion effects of waste tire rubber and fly ash from thermoelectric plants as mortar components for coating buildings. Reference mortars and mortars containing 5% and 10% rubber with a maximum grain size of 0.71 mm and mortars containing fly ash particles with a diameter of 45  $\mu\text{m}$  were produced. Mortars containing rubber replaced 5% and 10% of the fine aggregate mass by this material and fly ash was added in 10% and 20% proportions compared to the cement volume. A  $3^2$  factorial experiment was performed on the mechanical properties of the compressive strength of mortars, applying analysis of variance (ANOVA) and surface response. The rubber waste material contributed to the decrease in compressive strength of the mortar and that factor displayed the highest significance in the response variable.

**Keywords:** coating mortar, waste tire rubber, fly ash, compressive strength, statistical analysis.

#### Resumo

Este artigo tem como objetivo efetuar a análise estatística dos efeitos da inclusão da borracha de pneus inservíveis e cinza volante oriunda de usinas termelétricas como componentes da argamassa para revestimento de edificações. Foram produzidas argamassas de referência e argamassas contendo borracha com dimensão máxima dos grãos de 0,71 mm e cinza volante com granulometria de 45  $\mu\text{m}$ . As argamassas contendo borracha tiveram 5% e 10% da massa do agregado miúdo substituído por esse material e a cinza volante adicionada em proporções de 10% e 20% em relação ao volume de cimento. Foi realizado um projeto fatorial  $3^2$  para os resultados referentes à propriedade mecânica de resistência à compressão das argamassas, aplicando a análise da variância (ANOVA) e de superfície de resposta. O resíduo de borracha contribuiu para a diminuição da resistência à compressão das argamassas e foi o fator que apresentou maior significância na variável resposta.

**Palavras-chave:** argamassa de revestimento, resíduo de pneus, cinza volante, resistência mecânica à compressão, análise estatística.

<sup>a</sup> Santa Catarina State University, Technology Science Center, Civil Engineering Department, Joinville, SC, Brazil;  
<sup>b</sup> Santa Catarina State University, Technological Science Center, Mathematics Department, Joinville, SC, Brazil.

## 1. Introdução

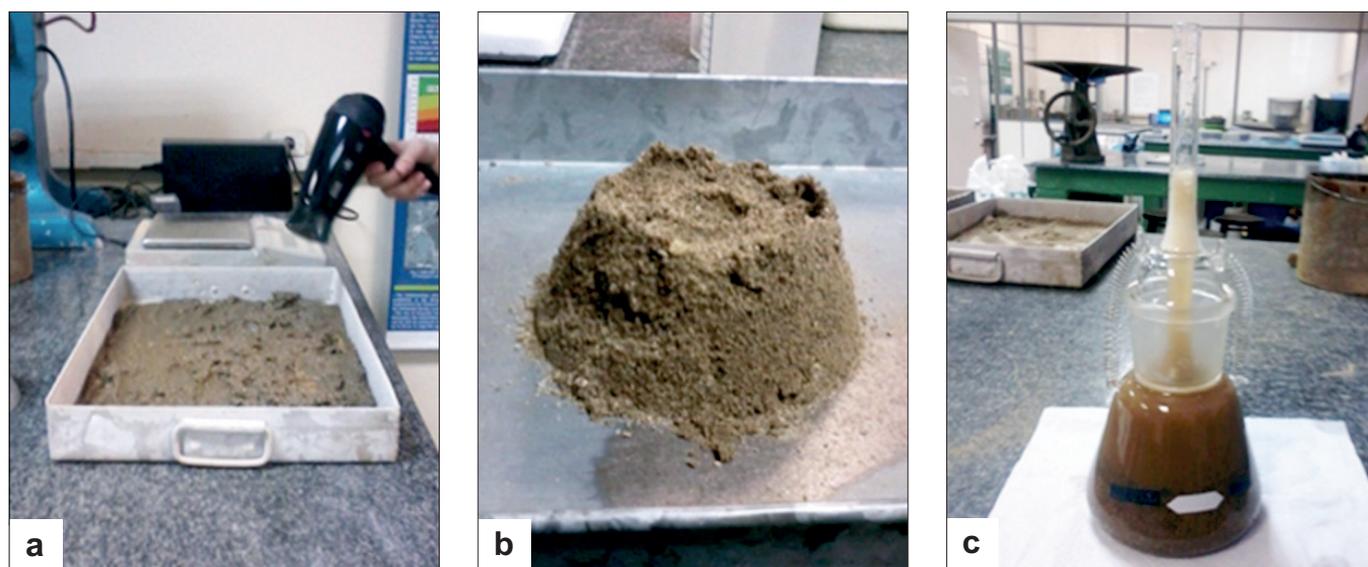
Com o crescente desenvolvimento urbano, o acúmulo de resíduos sólidos tem sido objeto de pesquisas para o aproveitamento desses resíduos em materiais alternativos. A busca pela sustentabilidade, além de ser uma preocupação ambiental, é também uma preocupação econômica que proporciona o desenvolvimento de novas tecnologias e economia financeira. Neste aspecto, a construção civil é um dos setores que têm absorvido grandes quantidades de resíduos sólidos reciclados em componentes de edificações [1].

Uma das grandes preocupações das cidades é o descarte inadequado de pneus inservíveis, por ser um produto não biodegradável e de grande durabilidade. Além disso, quando armazenados de maneira incorreta, servem de criadouros de insetos e roedores. De acordo com [2], algumas alternativas foram propostas para resolver o problema de descarte de pneus inservíveis, como em obras de contenções das margens de rios e construção de quebra-mares. Outra forma é a reciclagem de resíduos de pneus por meio do corte ou da raspagem, sendo esse material reutilizado em muitas áreas industriais e também na pavimentação asfáltica como ligante para fins rodoviários. Na área da construção civil, pesquisas realizadas por [3] e [4] mostraram a possibilidade do uso de resíduos de pneus na aplicação de concretos sem função estrutural, apresentando bom desempenho térmico e acústico. O efeito da incorporação de pó de borracha em argamassas para revestimento foi verificada por [5] e [6]; conforme as pesquisas realizadas, argamassas contendo esse resíduo apresentaram menores incidências de fissuração visíveis e aumento de absorção de água por capilaridade. Segundo [7], o uso de borracha reciclada de pneus em proporções de 30% em substituição da areia em argamassas de alta resistência contribuiu para a diminuição da resistência à tração na flexão e à compressão; verificou-se também

a presença de poros irregulares e esferoidais em sua morfologia. Por outro lado, o crescente uso de usinas termelétricas e o consumo de carvão mineral como combustível geram volumes consideráveis de resíduos na forma de cinza leve ou volante e cinza pesada ou cinza de fundo. Esses resíduos são formados devido à combustão incompleta do carvão [8]. O elevado custo de estocagem e a preocupação com o descarte adequado desses resíduos têm incentivado alternativas na gestão dos resíduos em diversas aplicações, como na fabricação de cimento pozolânico, nas misturas de concretos e argamassas, entre outros [9].

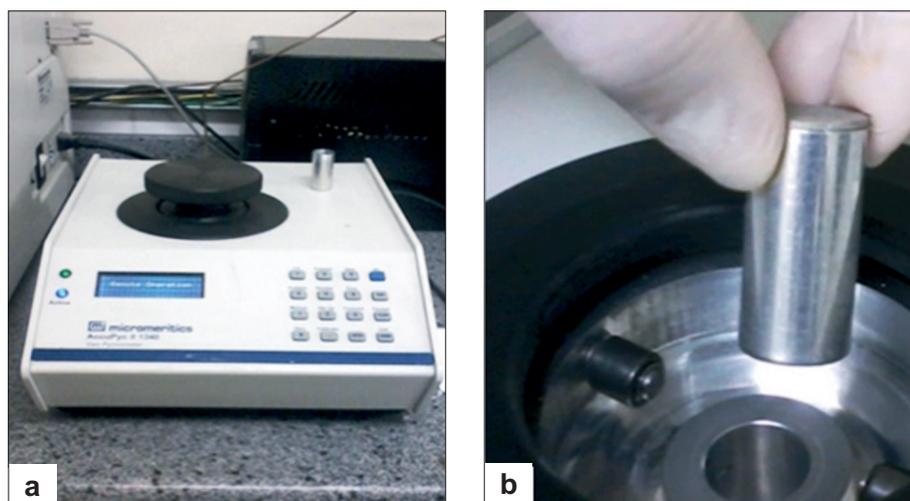
A mineralogia das cinzas é bastante diversificada, pois varia de acordo com a composição do carvão, condições de calcinação e ambiente de armazenamento. A superfície da cinza volante, a variação de dimensão das partículas e a morfologia influenciam consideravelmente na trabalhabilidade e na velocidade de desenvolvimento da resistência da pasta de cimento [10].

Pesquisas realizadas por [11], [12] e [13] mostraram que a cinza volante possui características pozolânicas vantajosas quando adicionadas ao cimento, garantindo aumento na resistência à compressão, impermeabilidade e durabilidade das argamassas e de estruturas em concreto, além de vantagens econômicas e ambientais. Sendo assim, o objetivo geral deste trabalho consiste em analisar estatisticamente as propriedades físicas e mecânicas dos resultados da resistência à compressão das argamassas para revestimento de paredes, aplicando os métodos de análise da variância (ANOVA) e superfície de resposta. Essas argamassas tiveram como adição a cinza volante e a substituição parcial do agregado miúdo por borracha de pneus inservíveis. Nesta pesquisa, foi estudado o efeito desses dois resíduos presentes na mesma argamassa, ao contrário de pesquisas anteriores cuja análise foi realizada usando os resíduos separadamente. Quando se deseja estudar o efeito de duas ou mais variáveis de influência em um determinado experimento, o uso do planejamento



**Figura 1**

Ensaio para a determinação da massa específica da areia; (a) secagem do material pela passagem de corrente de ar; (b) condição saturada da superfície seca; (c) frasco calibrado com a amostra após a eliminação das bolhas de ar



**Figura 2**  
Picnômetro de gás hélio; (a) equipamento utilizado; (b) câmara da amostra

fatorial é a técnica mais aconselhável. Em cada tentativa ou réplica, todas as combinações possíveis dos níveis de cada variável são investigadas. Se o efeito de uma variável depender do nível de outras variáveis, pode-se dizer que existirá interação entre eles [14].

Segundo [15], a análise da variância, ou ANOVA, constitui um procedimento estatístico adequado para a avaliação de respostas quantitativas em experimentos planejados. A ANOVA é utilizada para aceitar ou rejeitar as hipóteses investigadas de um experimento cujo objetivo é analisar a variação média dos resultados dos testes e identificar quais são os fatores que realmente produzem efeitos significativos nas respostas de um determinado experimento.

A análise de regressão linear também é muito útil no caso de experimentos planejados que incluem fatores em níveis contínuos. Nesse caso, a análise de variância é usada para identificar os fatores significativos e, em seguida, a análise de regressão é usada para construir um modelo que incorpore esses fatores. Planejamentos fatoriais de dois níveis, completos e fracionários, permitem estimar os efeitos principais e interações, enquanto delineamentos fatoriais completos de três níveis possibilitam estimar o grau de curvatura na variável resposta [16].

## 2. Materiais e programa experimental

Os materiais utilizados para a execução das argamassas foram: areia fina lavada de rio, cimento Portland CP II Z-32, cal hidratada do tipo CH-III e água fornecida pela concessionária local. O resíduo de borracha de pneus foi obtido pelo processo de trituração de pneus inservíveis. A cinza volante consiste em um resíduo (cinza leve) proveniente de usinas termoeletricas que utilizam carvão mineral como combustível. Inicialmente, foram realizados ensaios nas argamassas contendo a cinza sem ter passado por processos de moagem. Posteriormente, foram produzidas e ensaiadas novas argamassas contendo cinza volante moída em sua composição, cujo tempo de moagem foi de dez minutos em um moinho de bolas.

As características físicas do cimento Portland CP II Z-32 e da cal hidratada CH-III foram fornecidas pelo fabricante desses produtos.

O cimento Portland CP II Z-32 foi escolhido por ser largamente utilizado na construção civil e por apresentar diversas possibilidades de aplicação. Embora esse tipo de cimento já possua em sua composição de 6% a 15% de pozzolana, a adição de cinza volante na composição da argamassa se justifica por ser um material abundante no estado de Santa Catarina, principalmente devido à instalação de grandes usinas termelétricas na região Sul do país. As características físicas do agregado miúdo (Figura 1) foram determinadas conforme a NBR NM 52 [17] e a NBR NM 248 [18]. De acordo com os ensaios experimentais, o agregado miúdo utilizado nesta pesquisa possui módulo de finura de 2,09, diâmetro máximo dos grãos de 2,36 mm e massa específica de 2,55 g/cm<sup>3</sup>. A borracha consiste em um resíduo com dimensão máxima dos



**Figura 3**  
Corpos de prova para atividade pozolânica

**Tabela 1**

Propriedades da argamassa no estado fresco

Materiais	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	Massa unitária	Diâmetro máximo dos grãos (mm)
Cimento Portland CP II Z-32	2,98	1,08	<0,074
Cal hidratada CH III	2,40	0,75	0,074
Agregado miúdo	2,55	1,43	2,36
Borracha	1,19	0,36	0,71
Cinza volante	2,17	0,90	0,045

grãos de 0,71 mm e massa específica de 1,1953 g/cm<sup>3</sup>, valores determinados por meio do ensaio de peneiramento utilizando um conjunto de peneiras de série normal e por meio da picnometria de gás hélio (Figura 2). A cinza leve, sem ter passado por processo de moagem, apresenta como característica uma massa específica de 2,1680 g/cm<sup>3</sup>, granulometria de 45 µm e índice de desempenho de atividade pozolânica de 75,2%. Já a cinza moída, possui um índice de desempenho de atividade pozolânica de 77,6%, conforme as recomendações da NBR 12653 [19], representada na Figura 3. A cinza leve, após moagem, apresentou um aumento de 2,5% no índice de atividade pozolânica do material. Esse aumento ocorreu devido à diminuição das partículas da cinza que aumentaram a sua

superfície específica, possibilitando maior contato entre os elementos reativos da mistura. Os resultados dos ensaios referentes às características físicas dos materiais encontram-se na Tabela 1.

A composição química dos resíduos foi analisada por meio da espectroscopia de energia dispersiva (EDS). Nas Figuras 4 e 5 estão representados os pontos 1 e 2 selecionados para a aplicação da análise EDS da borracha e cinza volante e nas Tabelas 2 e 3 estão apresentados os resultados das análises químicas

**Tabela 2**

Composição química da borracha

Determinação	Teor em massa (%)
C	72,77
O	20,81
S	0,55
Zn	5,87

**Tabela 3**

Composição química da cinza volante

Determinação	Teor em massa (%)	Determinação	Composição (%)
C	40,93	C	40,93
O	25,58	O	0,00
Mg	0,90	MgO	1,50
Al	5,50	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,39
Si	12,83	SiO <sub>2</sub>	27,45
K	1,48	K <sub>2</sub> O	1,78
Ca	10,42	CaO	14,58
Fe	2,35	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,36

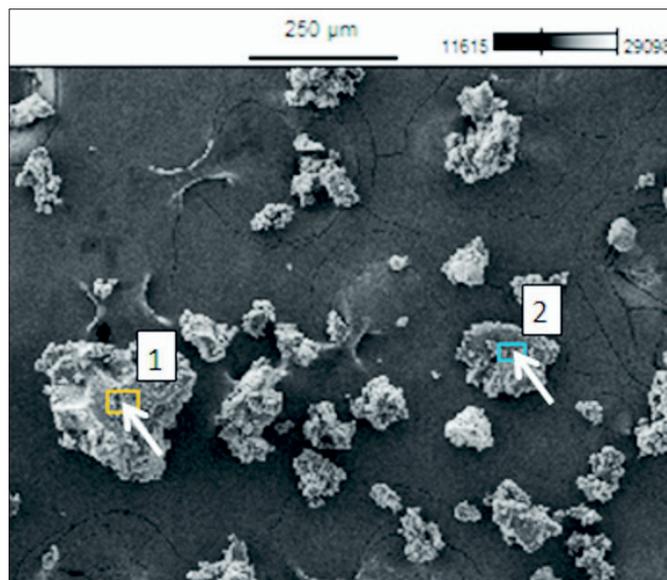

**Figura 4**

Imagem MEV do pó de borracha e pontos selecionados para aplicação de EDS

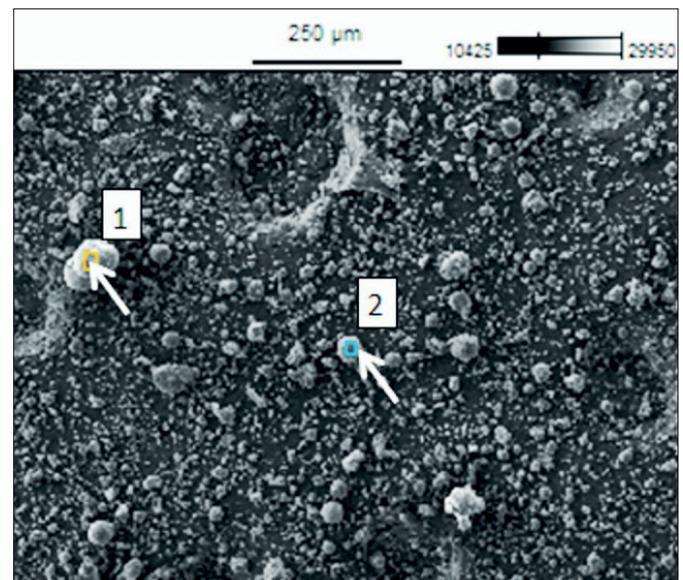

**Figura 5**

Imagem MEV da cinza volante e pontos selecionados para aplicação de EDS

**Tabela 4**

Propriedades da argamassa no estado fresco

Mistura	Componentes das argamassas (*) (g)						Índice de consistência (mm)
	Cimento	Cinza	Cal	Areia	Borracha	Água	
REF	720	-	496	5720	-	1468	253
B5	720	-	496	5434	71,6	1392	255
B10	720	-	496	5148	143,2	1320	250
C10	720	60	496	5720	-	1468	263
C10B5	720	60	496	5434	71,6	1392	258
C10B10	720	60	496	5148	143,2	1320	250
C20	720	120	496	5720	-	1480	257
C20B5	720	120	496	5434	71,6	1400	260
C20B10	720	120	496	5148	143,2	1340	251

Nota: (\*) Para preparar o mesmo volume de argamassa (3,33 dm<sup>3</sup> ou 12 corpos de prova de 40 x 40 x 160 mm)

semiquantitativas dos resíduos. Por meio dos espectros de EDS obtidos nos pontos analisados (Figura 4), é possível observar que a borracha é composta principalmente de carbono (C), oxigênio (O), zinco (Zn), sódio (Na) e enxofre (S). A cinza volante (Figura 5) apresenta em sua composição maiores concentrações de carbono (C), oxigênio (O), silício (Si) e compostos químicos de sílica (SiO<sub>2</sub>), alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), óxido férrico (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) e cal (CaO).

A argamassa de referência foi produzida com cimento, cal e areia na proporção 1:1:6 (em volume). As argamassas contendo borracha tiveram 5% e 10% da massa do agregado miúdo substituído pelo resíduo e as argamassas contendo cinza volante tiveram 10% e 20% da cinza adicionada na mistura em relação ao volume de cimento. As composições das argamassas estão apresentadas na Tabela 4, sendo REF a argamassa de referência, B5 e B10 a argamassa com 5% e 10% de borracha, C10 e C20 a argamassa com 10% de cinza e argamassa com 20% de cinza, C10B5 e C10B10 a argamassa com 10% de cinza + 5% de borracha e argamassa com 10% de cinza + 10% de borracha, C20B5 e C20B10 a argamassa contendo 20% de cinza + 5% de borracha e argamassa com 20% de cinza + 10% de borracha. Argamassas contendo cinza volante moída foram produzidas com a mesma composição da argamassa que obteve o melhor desempenho usando os dois resíduos em sua composição.

A consistência das argamassas foi avaliada de acordo com a NBR 13276 [20] que permitiu caracterizar a trabalhabilidade conferida a cada mistura e identificar a sua adequação à utilização como revestimento. Também foram analisados a retenção de água conforme a NBR 13277 [21], a massa específica e o teor de ar incorporado nas argamassas de acordo com a NBR 13278 [22].

A resistência à compressão das argamassas foi avaliada aos 28 dias de cura, em corpos de prova prismáticos com dimensões de 40 x 40 x 160 mm, conforme a NBR 13279 [23].

Os resultados foram submetidos a testes estatísticos para verificar a influência dos fatores borracha e cinza volante na resistência à compressão, utilizando o software STATISTICA 13.0 [24]. Para este estudo, foi realizado um experimento fatorial completo 3<sup>2</sup> com seis réplicas, considerando os fatores borracha e cinza volante com três níveis diferentes para cada fator, resultando em um projeto com 54 experimentos.

A análise da variância (ANOVA) é um teste estatístico usada para testar a igualdade dos efeitos dos tratamentos, permitindo identificar se existe diferença significativa entre as médias e se os fatores (variáveis independentes) influenciam a variável dependente [16].

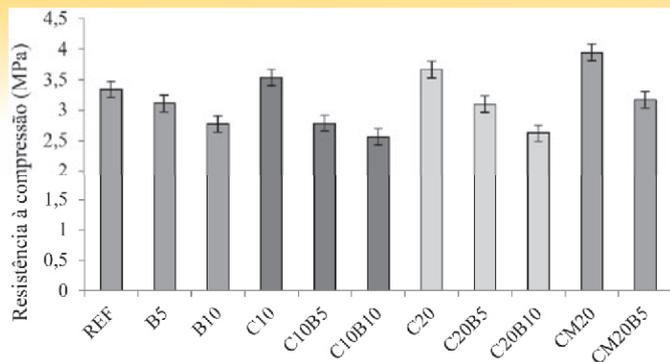
Os fatores propostos podem ser quantitativos ou qualitativos, que é o caso deste trabalho. A variável resposta deve ser quantitativa contínua. Para validar as conclusões a inferir da ANOVA, é necessário verificar seus pressupostos, ou seja, os resíduos do modelo devem ser independentes, com variância constante e normalmente distribuídos [16]. Nesse trabalho, o teste de Bartlett foi aplicado para analisar a homogeneidade da variância e um gráfico de probabilidade normal para verificar a normalidade dos resíduos.

A magnitude das diferenças entre as médias foi avaliada por meio de um teste de comparação múltipla, o teste de Tukey. Esse teste é necessário quando existe diferença significativa entre as médias, pois completa a análise de variância, comparando o resultado de todos os pares de médias. Os gráficos de Pareto e de efeitos complementam a análise. Esses gráficos permitem visualizar a magnitude e a importância dos efeitos. O gráfico de contorno, resultante

**Tabela 5**

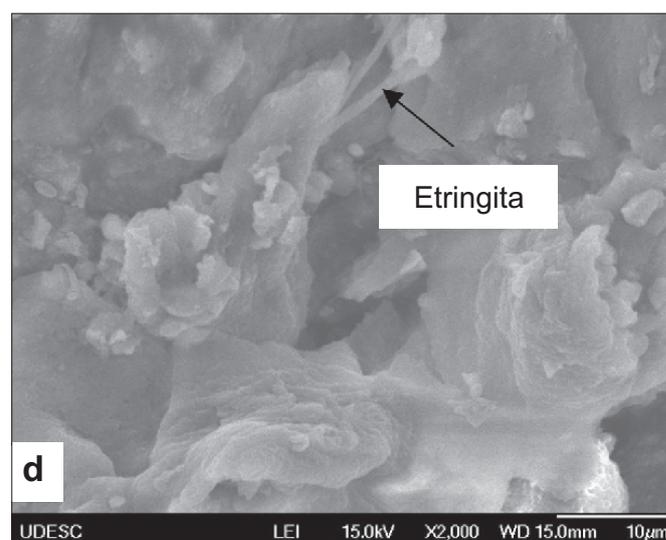
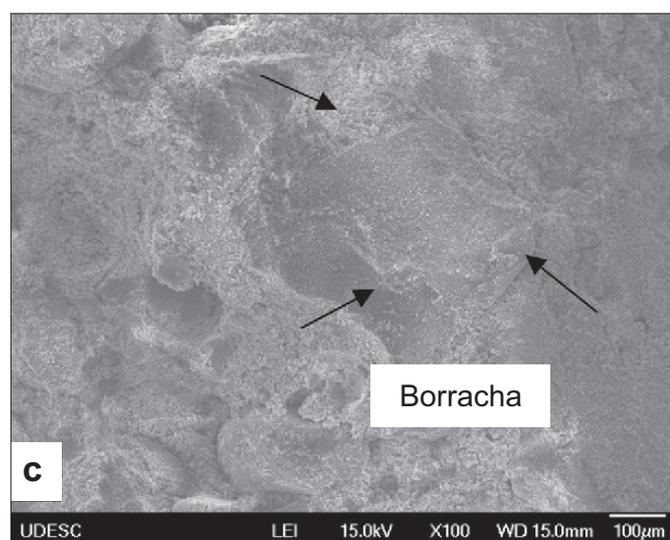
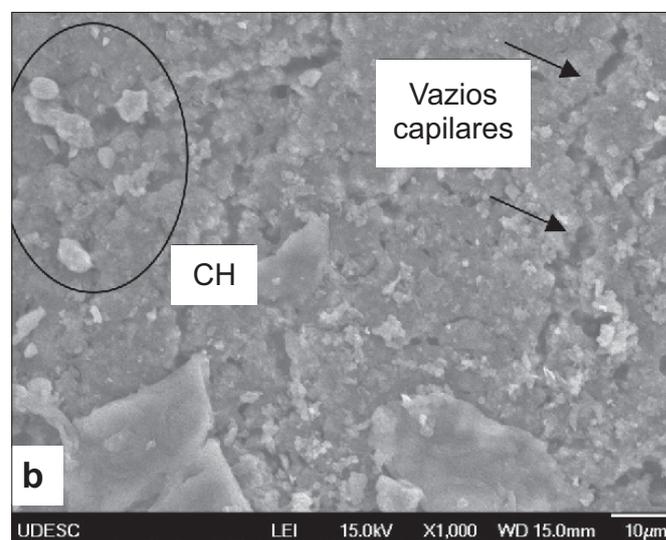
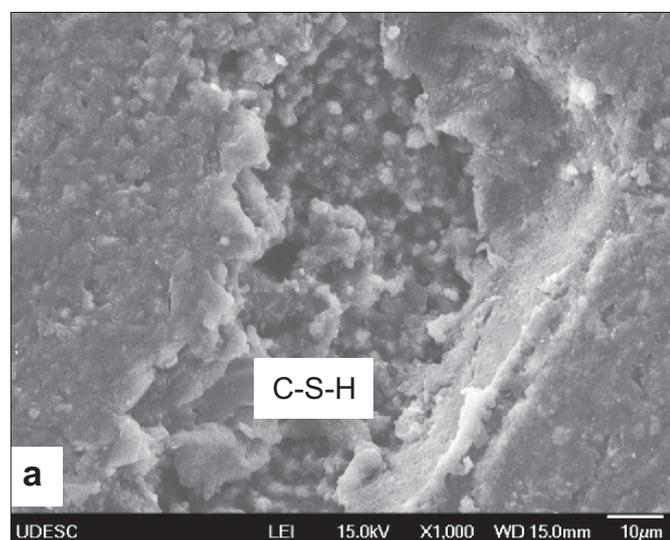
Composição das argamassas

Argamassa	Relação água/cimento	Índice de consistência (mm)	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	Teor de ar incorporado (%)	Retenção de água (%)
REF	2,04	253	1,995	2	80
B5	1,93	255	1,920	5	81
B10	1,83	250	1,805	10	82
C10	2,04	263	1,982	2	79
C10B5	1,93	258	1,879	7	82
C10B10	1,83	250	1,785	11	84
C20	2,06	257	2,008	1	82
C20B5	1,94	260	1,954	3	83
C20B10	1,86	251	1,859	10	85
CM20	2,05	265	1,993	1	80
CM20B5	1,94	262	1,920	5	81



**Figura 6**  
Resistência à compressão média das argamassas

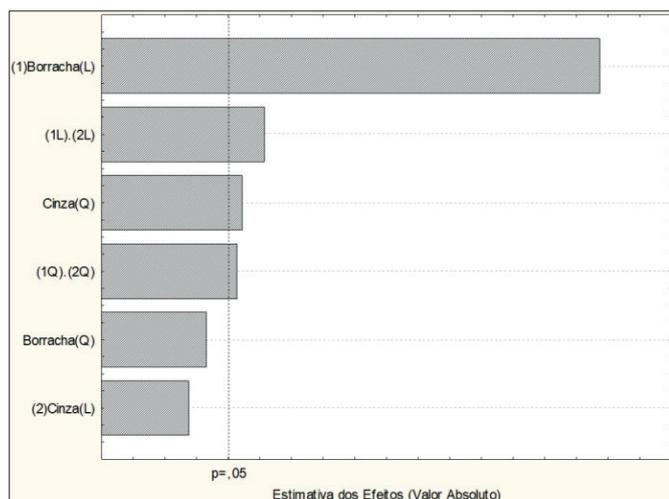
da aplicação da metodologia de superfície de resposta, auxiliará na determinação das condições dos fatores (percentual de cinzas e de pneus) que levam à obtenção de um valor ótimo para a variável resposta (resistência à compressão). Para a análise estatística, foi adotado um nível de significância ( $\alpha$ ) de 5% em todos os testes realizados.



**Figura 7**  
Micrografia da argamassa: (a) formação de C-S-H; (c) formação de hidróxido de cálcio (CH); (c) partícula de borracha; (d) formação de cristais de etringita tardia ( $C_6ASH_{31}$ )

### 3. Resultados e discussões

Os resultados referentes aos ensaios realizados nas argamassas no estado fresco estão apresentados na Tabela 5. Verificou-se que houve redução da massa específica à medida que foi aumentando a quantidade de borracha na argamassa. Esse fato se deve em função da baixa massa unitária e da massa específica dos resíduos utilizados. Argamassas contendo 10% de borracha apresentaram aumento no teor de ar incorporado, cujos valores não ultrapassaram 11%, o que contribuiu também para a trabalhabilidade da argamassa. De acordo com a ASTM C 270 [25], argamassas contendo cal devem apresentar no máximo 14% de teor de ar incorporado, caso contrário poderá ocorrer redução na resistência de aderência à tração no substrato. A adição de borracha também contribuiu para o aumento na retenção de água nas argamassas, provavelmente ocasionado pelo aumento no teor de ar incorporado. Segundo a ASTM C 270 [25], a retenção de água nas argamassas não deve ser inferior a 75%, pois a perda acelerada de água pode reduzir a resistência, a adesão e a capacidade de absorver deformações, além de diminuir a durabilidade e a impermeabilidade da argamassa. Logo, todas as argamassas estudadas apresentaram retenção de água superior a 80%, o que



#### Notas

Fator 1 – Borracha; Fator 2 – Cinza; L – termo linear: 1L ( $x_1$ ) e 2L ( $x_2$ ); Q – termo quadrático: 1Q ( $x_1^2$ ) e 2Q ( $x_2^2$ )

#### Figura 8

Diagrama de Pareto para o efeito borracha e cinza volante

indica que argamassas contendo borracha mantêm a trabalhabilidade por mais tempo quando sujeitas a solicitações que provocam perda de água de amassamento.

A resistência média à compressão das argamassas aos 28 dias está apresentada na Figura 6. Pode-se verificar que a adição de

20% de cinza volante moída (CM20) ocasionou um aumento na resistência média à compressão aos 28 dias da argamassa. Comparando com a argamassa de referência, esse aumento foi de aproximadamente 18%. Em relação à argamassa contendo 20% de cinza sem ser moída (C20), a resistência média à compressão aumentou 7%. Isto comprova que a cinza leve, quando submetida a um processo de moagem, aumenta a atividade pozolânica do material devido ao seu aumento na superfície específica. Além disso, a moagem do resíduo não alterou outras propriedades da argamassa, como retenção de água e teor de ar incorporado.

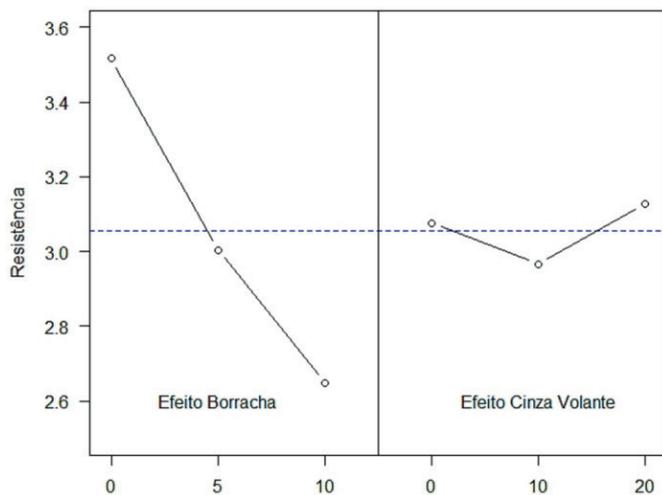
O aumento da resistência à compressão em argamassas contendo cinza leve pode estar relacionado à atividade pozolânica da cinza, proporcionando a formação de maiores quantidades de silicatos de cálcio hidratado (C-S-H), principais responsáveis pelo aumento da resistência à compressão de concretos e argamassas, ao contrário da zona de transição, onde há presença de etringita ( $C_6ASH_{31}$ ) e hidróxido de cálcio (CH), como pode ser observado por meio da imagem obtida pela microscopia eletrônica de varredura (MEV) nas Figuras 7 (a), (b) e (d). Já, argamassas contendo borracha apresentaram diminuição na resistência à compressão. Essa redução pode estar relacionada ao aumento no teor de ar incorporado no estado fresco e pelo fato de os resíduos apresentarem baixa massa específica, sendo essa situação presenciada, também, por [5] e [26]. Além disso, a diminuição da resistência à compressão das argamassas está relacionada pela ausência de aderência entre a borracha com a matriz da pasta de cimento, como pode ser observado na Figura 7 (c); fato presenciado, também, por [25].

A ASTM C 270 [25] estabelece resistências mínimas para alguns tipos de argamassa. Segundo a norma, a resistência aos 28 dias para

#### Tabela 6

Misturas do projeto fatorial  $3^2$  e resultado da resistência à compressão das argamassas

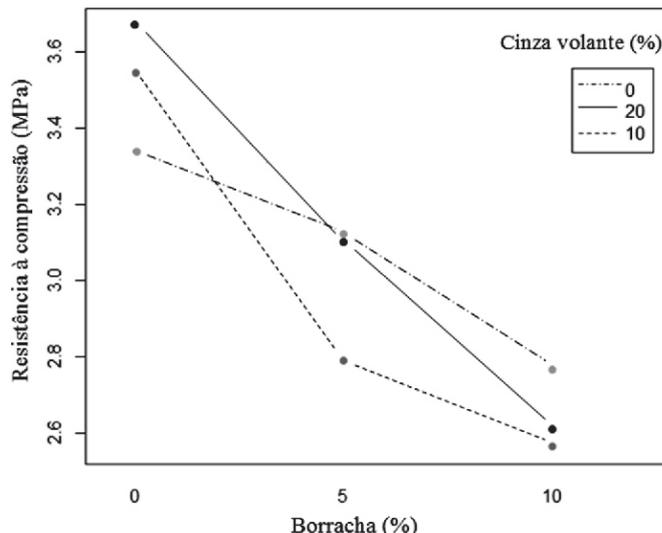
Mistura	Borracha (%)	Cinza volante (%)	Réplica	Resistência à compressão (MPa)	Mistura	Borracha (%)	Cinza volante (%)	Réplica	Resistência à compressão (MPa)	Mistura	Borracha (%)	Cinza volante (%)	Réplica	Resistência à compressão (MPa)
1	0	0	1	3,56±0,15	19	0	0	3	3,25±0,14	37	0	0	5	3,45±0,35
2	0	10	1	3,80±0,29	20	0	10	3	3,66±0,07	38	0	10	5	3,30±0,14
3	0	20	1	3,86±0,07	21	0	20	3	3,45±0,07	39	0	20	5	3,86±0,22
4	5	0	1	2,74±0,26	22	5	0	3	3,35±0,14	40	5	0	5	2,95±0,07
5	5	10	1	2,74±0,07	23	5	10	3	3,10±0,18	41	5	10	5	2,74±0,07
6	5	20	1	2,95±0,14	24	5	20	3	3,25±0,14	42	5	20	5	3,25±0,21
7	10	0	1	2,95±0,22	25	10	0	3	3,00±0,25	43	10	0	5	2,54±0,07
8	10	10	1	2,74±0,21	26	10	10	3	2,84±0,21	44	10	10	5	2,44±0,07
9	10	20	1	2,54±0,07	27	10	20	3	2,54±0,14	45	10	20	5	2,84±0,21
10	0	0	2	3,35±0,07	28	0	0	4	3,45±0,08	46	0	0	6	2,95±0,21
11	0	10	2	3,45±0,15	29	0	10	4	3,56±0,22	47	0	10	6	3,45±0,07
12	0	20	2	3,76±0,22	30	0	20	4	3,55±0,15	48	0	20	6	3,45±0,07
13	5	0	2	3,25±0,07	31	5	0	4	3,15±0,14	49	5	0	6	3,25±0,21
14	5	10	2	2,64±0,14	32	5	10	4	2,84±0,07	50	5	10	6	2,64±0,14
15	5	20	2	3,15±0,07	33	5	20	4	3,05±0,14	51	5	20	6	2,95±0,07
16	10	0	2	2,64±0,03	34	10	0	4	2,95±0,08	52	10	0	6	2,54±0,14
17	10	10	2	2,44±0,28	35	10	10	4	2,44±0,07	53	10	10	6	2,44±0,07
18	10	20	2	2,44±0,07	36	10	20	4	2,54±0,21	54	10	20	6	2,74±0,14



**Figura 9**  
Gráfico dos efeitos principais

argamassas contendo cal deve ser superior a 2,40 MPa. De acordo com os resultados obtidos, todas as argamassas estudadas apresentaram valores superiores a 2,40 MPa, porém a argamassa com melhor desempenho contendo os dois resíduos em sua composição foi a argamassa com 20% de cinza moída + 5% de borracha (CM20B5), apresentando resistência média à compressão de 3,17±0,25 MPa. Conforme o projeto experimental definido, a Tabela 6 apresenta os resultados da resistência à compressão das argamassas estudadas, incluindo as réplicas das misturas contendo teores variados de borracha e cinza volante.

O efeito dos fatores borracha e cinza volante na resistência à compressão foi analisado por meio do diagrama de Pareto (Figura 8) e pelo gráfico dos efeitos principais e das interações (Figuras 9 e 10). O diagrama de Pareto determina a magnitude e a importância dos efeitos. Assim, a borracha apresenta ser o efeito mais significativo, pois seu valor ultrapassa a linha de referência para o nível de significância de 5%. Já o gráfico dos efeitos principais apresenta graficamente as médias de cada grupo, e quanto maior a inclinação da linha, maior será a magnitude do efeito principal. Logo, a borracha apresenta maior efeito



**Figura 10**  
Gráfico dos efeitos das interações

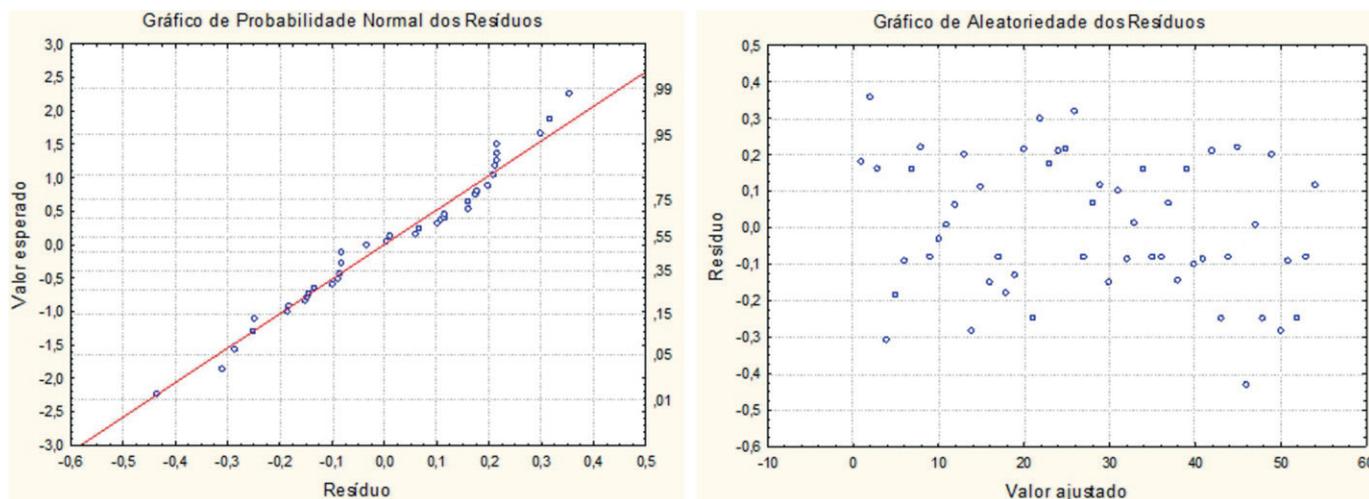
na resistência à compressão quando comparada com a cinza volante. O efeito da interação entre os fatores está associado à mudança de comportamento do fator borracha nos diferentes níveis do fator cinza volante, evidenciando o seu efeito na variável resposta analisada.

A análise de variância para os resultados da resistência à compressão das argamassas do projeto fatorial está apresentada na Tabela 7. Para a análise estatística, foi adotada um nível de significância ( $\alpha$ ) de 5% para o teste de hipóteses, considerando a hipótese nula de que todas as médias da variável resposta são iguais e para a hipótese alternativa considerando que pelo menos uma média dos níveis de fatores é diferente. Logo,  $p$ -valor  $< \alpha$  a hipótese nula deve ser rejeitada. Também, mediante o “Teste F”, é possível determinar quais variáveis e qual interação entre variáveis proporcionam o maior impacto na variação da resistência, pois quanto maior o valor desse teste, maior será a sua significância. Assim, os fatores borracha e cinza volante são significativos. A borracha é o efeito mais importante na resistência à compressão das argamassas estudadas, pois apresenta  $p$ -valor baixo e a soma dos quadrados é maior comparado com

**Tabela 7**  
Análise de variância da resistência à compressão das argamassas

Fator	Soma dos quadrados	Grau de liberdade	Média dos quadrados	F <sub>0</sub>	F <sub>c</sub>	p
Borracha (1L)	<b>6,7254</b>	<b>1</b>	<b>6,725378</b>	<b>188,5796</b>		<b>0,000000</b>
Borracha (1Q)	0,061633	1	0,061633	1,7282		0,195302
Cinza (2L)	0,020069	1	0,020069	0,5627	4,06	0,457060
Cinza (2Q)	<b>0,210675</b>	<b>1</b>	<b>0,210675</b>	<b>5,9073</b>		<b>0,019128</b>
(1L).(2L)	<b>0,350417</b>	<b>1</b>	<b>0,350417</b>	<b>9,8257</b>		<b>0,003028</b>
(1Q).(2Q)	<b>0,183750</b>	<b>1</b>	<b>0,183750</b>	<b>5,1524</b>		<b>0,028054</b>
Falta de ajuste	0,077511	2	0,038756	1,0867	3,20	0,346013
Erro puro	1,604850	45	0,035663	-	-	-
Total	9,234283	53	-	-	-	-

Notes: L – termo linear: 1L ( $x_1$ ) e 2L ( $x_2$ ); Q – termo quadrático: 1Q ( $x_1^2$ ) e 2Q ( $x_2^2$ ); F<sub>0</sub> – F calculado; F<sub>c</sub> – valores críticos de F para o nível de significância de 5% obtidos com o software R [29]. Fatores significativos em negrito.



**Figura 11**  
Gráfico de normalidade e aleatoriedade dos resíduos

outros fatores. A proporção de variabilidade dos dados explicada pelos fatores estudados (borracha e cinza volante) foi de 0,81 ( $R^2$ ), indicando que os fatores e seus efeitos representam 81% da variabilidade das medidas. Os resultados mostraram que a variabilidade entre as réplicas não apresentou falta de ajuste, considerando termos de segunda ordem (função quadrática), pois  $p$ -valor (0,346)  $>$   $\alpha$  (0,05), o que significa que as medidas são iguais nas réplicas.

A Figura 11 apresenta o comportamento dos resíduos (diferença entre os valores experimentais e os preditos pela equação do modelo da análise de variância) a respeito das distribuições quanto à normalidade e à aleatoriedade. Logo, pode-se afirmar que o modelo é adequado para descrever o comportamento da resistência à compressão das argamassas como função dos fatores borracha e cinza volante, pois os resíduos encontram-se distribuídos, aproximadamente, ao longo de uma linha reta e de forma aleatória.

De acordo com o teste de Bartlett, os erros devidos aos efeitos dos fatores borracha e cinza volante possuem variância constante. O teste em questão é caracterizado pelas seguintes hipóteses: a hipótese nula afirma que as variâncias são constantes e a hipótese alternativa afirma que as variâncias não apresentam homogeneidade. Como o

valor- $p$  (0,8115) encontrado para esse teste foi maior que o nível de significância de 5%, a suposição de homogeneidade é válida.

A magnitude das diferenças entre as médias foi avaliada por meio do teste de Tukey. De acordo com a Tabela 8, é possível verificar que as argamassas contendo apenas cinza volante (Grupo a) são diferentes significativamente das demais, apresentando maiores médias para a resistência à compressão. Argamassas contendo 10% de borracha (Grupo d) são consideradas iguais entre si, ou seja, as médias não diferem significativamente entre elas; o mesmo ocorre para o grupo das argamassas contendo 5% de borracha (Grupo c).

Por meio dos resultados obtidos para a resistência à compressão das argamassas, foi obtida uma equação de regressão para representar o efeito dos fatores (resíduos de borracha e cinza volante) estudados para essa propriedade. A equação final ajustada para a resistência à compressão está representada pela Equação 1, na qual  $x_1$  representa a quantidade de borracha na mistura em %,  $x_2$ , a quantidade de cinza volante na mistura em %,  $Y$ , a resistência à compressão da argamassa em MPa.

$$Y = 3,340 - 0,0304x_1 + 0,0239x_2 - 0,0297x_1x_2 + 0,0013x_1x_1^2 \quad (1)$$

**Tabela 8**

Resultado do teste de Tukey para a resistência à compressão das argamassas

	Grupo Tukey			Tratamentos		Médias
				Borracha (%)	Cinza volante (%)	
a	-	-	-	0	20	3,66
a	-	-	-	0	10	3,54
a	b	-	-	0	0	3,34
-	b	c	-	5	0	3,11
-	b	c	-	5	20	3,10
-	-	c	d	5	10	2,78
-	-	c	d	10	0	2,76
-	-	-	d	10	20	2,61
-	-	-	d	10	10	2,56

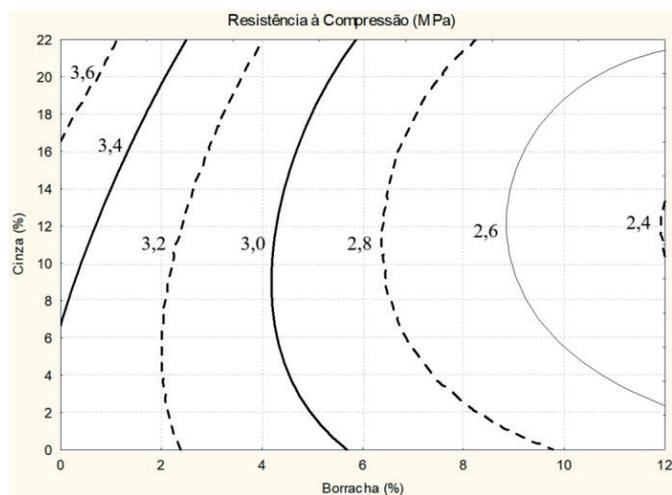

**Figura 12**

Gráfico de contorno da resistência à compressão em função dos fatores borracha e cinza volante

Segundo a Equação 1, a borracha contribui para diminuir a resistência à compressão das argamassas, enquanto o fator cinza volante contribui para aumentar o valor dessa propriedade.

O efeito dos fatores borracha e cinza volante na resistência à compressão também pode ser analisado por meio de um gráfico de contorno, a partir da Eq. 1. De acordo com a Figura 12, é possível verificar que maiores concentrações de borracha diminuem a resistência à compressão, embora a cinza volante contribua para aumentar essa propriedade quando adicionada em maiores quantidades.

Os resultados desse trabalho concordam com os encontrados por [3] [5] e [26], que verificaram a redução na resistência à compressão de argamassas com o aumento da concentração de borracha, aplicando outras abordagens de análise. Também está de acordo com pesquisas realizadas por [27] e [28], que revelaram a presença de maior quantidade de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) na matriz da pasta de cimento em compósitos contendo cinza volante, ao contrário da zona de transição, onde teve a presença de etringita e hidróxido de cálcio. Estão de acordo também com os resultados de [1]. Em seu trabalho, os autores verificaram que a inclusão de componentes cimentantes (cimento, cal e microssilica) pode explicar o aumento na resistência à compressão, compensando a diminuição causada pela inclusão dos resíduos de borracha. No presente trabalho, a diminuição na resistência à compressão, causada pela inserção da borracha, foi balanceada pela presença de cinza volante.

## 4. Conclusões

- A utilização de resíduo de borracha de pneus inservíveis na substituição parcial do agregado miúdo e a adição de cinza leve oriunda de termelétricas, incorporadas na argamassa de revestimento, são alternativas viáveis de material para aplicação na construção civil;

- Foi possível identificar, visualmente, algumas partículas de borracha presentes nas argamassas, embora em pequenas quantidades, o que não comprometeu o aspecto final do produto;
- A resistência à compressão diminuiu com o aumento de teor de borracha na argamassa, principalmente pelo fato de o resíduo apresentar pouca adesão à pasta de cimento. Já a adição de cinza na argamassa aumentou a resistência à compressão em relação à argamassa de referência devido à maior formação de silicato de cálcio hidratado (C-S-H);
- A cinza leve, após moagem, apresentou um aumento no índice de atividade pozolânica do material. Esse aumento ocorreu devido à diminuição das partículas da cinza que aumentaram a sua superfície específica, possibilitando maior contato entre os elementos reativos da mistura;
- Por meio da análise estatística, considerando um nível de significância de 5%, foi possível verificar que tanto a borracha quanto a cinza volante afetaram a resistência média à compressão das argamassas, embora a borracha seja o fator que apresentou maior efeito;
- O método do projeto fatorial possibilitou o cálculo de um modelo de regressão, descrevendo, em função de teores de borracha e cinza volante, a resistência à compressão das argamassas após os 28 dias de idade. Já o gráfico de contorno permitiu determinar as condições necessárias do uso dos resíduos estudados, em porcentagem, na obtenção de um valor ótimo para a resistência à compressão.

## 5. Agradecimentos

Os autores agradecem à empresa Engisul Borrachas Ltda. o fornecimento do resíduo de borracha de pneus inservíveis e à Termelétrica Jorge Lacerda o fornecimento da cinza volante.

## 6. Referências bibliográficas

- [1] CINTRA, C. L. D.; PAIVA, A. E. M.; BALDO, J. B. Argamassas de revestimento para alvenaria contendo vermiculita expandida e agregados de borracha reciclada de pneus – propriedades relevantes. *Cerâmica*, v. 60, p. 69-76, 2014.
- [2] GANIRON JR, T. Pelletized cut rubber: an alternative coarse aggregate for concrete mixture. *International Journal of Advanced Science and Technology*, v. 64, p. 21-30, 2014.
- [3] FIORE, A.; MARANO G. C.; MARTI, C.; MOLFETTA, M. On the fresh/hardened properties of cement composites incorporating rubber particles from recycled tires. *Advances in Civil Engineering*, p. 1-12, 2014.
- [4] ALIABDO, A.A.; ELMOATY, A. E. M.; ABDELBASET, M. M. Utilization of waste rubber in non-structural applications. *Construction and Building Materials*, v. 91, p. 195-207, 2015.
- [5] CANOVA, J. A.; BERGAMASCO, R.; ANGELIS NETO, G. de. A utilização de resíduos de pneus inservíveis em argamassa de revestimento. *Acta Scientiarum. Technology*, v. 29, n. 2, p. 141-149, 2007.
- [6] CANOVA, José Aparecido; ANGELIS NETO, Generoso de; BERGAMASCO, Rosângela. Dry ripened mortar with quarry waste and rubber powder from unserviceable tires *Acta Scientiarum. Technology*, v. 37, n. 1, p. 25-31, 2015.

- [7] ANGELIN, F. Andressa; LINTZ, Rosa C.; GACHET-BARBO-SA, Luísa A.; OSÓRIO, Wislei R. The effects of porosity on mechanical behavior and water absorption of in environmentally friendly cement with recycled rubber. *Construction and Building Materials*, v. 151, p. 534-545, 2017.
- [8] KREUZ, A. L.; CHERIAF, M.; ROCHA, J. C. Estudo das propriedades dos concretos utilizando cinza pesada como parte da areia. In: IX Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente construído. Foz do Iguaçu, Paraná. 2002.
- [9] ROHDE, G. M.; MACHADO, C. S. Quantificação das cinzas de carvão fóssil produzidas no Brasil. *Boletim Técnico* 36, Porto Alegre: Cientec, 2016.
- [10] MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: estrutura, propriedades e materiais*. 2 ed. São Paulo: IBRACON, 2008.
- [11] YILDIRIM, K.; SÜMER, M. Effects of sodium chloride and magnesium sulfate concentration on the durability of cement mortar with and without fly ash. *Composites Part B: Engineering*, v. 52, p.56-61, 2013.
- [12] SUPIT, S. W. M.; SHAIKH, F. U. A.; SAKER, P. K. Effect of ultrafine fly ash on mechanical properties of high volume fly ash mortar. *Construction and Building Materials*, v. 51, p. 278-286, 2014.
- [13] YU, J.; LU, C.; LEUNG, C. K. Y.; LI, Gengying. Mechanical properties of green structural concrete with ultrahigh-volume fly ash. *Construction and Building Materials*, v. 147, p. 510-518, 2017.
- [14] BUTTON, S. T. Metodologia para planejamento experimental e análise de resultados. Universidade Estadual de Campinas, 2005. Disponível em: < <http://www.fem.unicamp.br> > Acesso em: 26 out. 2016.
- [15] DEVORE, J. L.; *Probabilidade e estatística para engenharia e ciências*. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2006.
- [16] MONTGOMERY, D.C. *Design and Analysis of Experiments*. 5th Ed. New York: John Wiley & Sons, 2009.
- [17] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 52: Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.
- [18] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 248: Agregados – Determinação composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.
- [19] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12653: Materiais pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2015.
- [20] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016.
- [21] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13277: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação de retenção de água. Rio de Janeiro, 2005.
- [22] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13278: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 2005.
- [23] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13279: Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.
- [24] STATSOFT Inc. *STATISTICA Ultimate Academic*, v. 13.0; Licence Number 135-726-299. Disponível em: <http://www.statsoft.com.br>.
- [25] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. C-270: Standard specification for mortar for unit masonry. United States, 2007.
- [26] SU, H.; YANG, J.; LING, T.; GHATAORA, G. S.; DIRAR, S. Properties of concrete prepared with waste tyre rubber particles of uniform and varying sizes. *Journal of Cleaner Production*, v.91, p. 288-296, 2015.
- [27] CAMPOS, Marco Antonio; PAULON, Vladimir Antonio. Utilização de agregados alternativos de isoladores elétricos de porcelana em concretos. *Concreto y cemento. Investigación y desarrollo*, v. 7, n. 1, p. 30-43, 2015.
- [28] CHEW, S. H.; KAMRUZZAMAN, A. H.; LEE, F. H. Physico-chemical and engineering behavior of cement treated clays. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, p. 53-71, 2004.
- [29] R CORE TEAM. 2017. R: A language and environment for statistical computing. Versão 3.4.2. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Disponível em: <https://www.R-project.org/>. Acesso em 22/07/2018.