



UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA  
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS – CCT  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**ANÁLISE DAS PROPRIEDADES  
FÍSICAS E MECÂNICAS DE  
ARGAMASSA PARA  
REVESTIMENTO UTILIZANDO  
CINZA VOLANTE E RESÍDUOS DE  
BORRACHA DE PNEUS INSERVÍVEIS**

ADRIANE PCZIECZEK

JOINVILLE, 2017

**ADRIANE PCZIECZEK**

**ANÁLISE DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE ARGAMASSA PARA  
REVESTIMENTO UTILIZANDO CINZA VOLANTE E RESÍDUOS DE BORRACHA  
DE PNEUS INSERVÍVEIS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro de Ciências Tecnológicas, da Universidade do Estado de Santa Catarina como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadora: Dra. Carneane Effting.  
Coorientador: Dr. Itamar Ribeiro Gomes.

**JOINVILLE**

**2017**

Pczieczek, Adriane

Análise das propriedades físicas e mecânicas de argamassa para revestimento utilizando cinza volante e resíduos de borracha de pneus inservíveis / Adriane Pczieczek. - Joinville, 2017.

147 p.

Orientadora: Carneane Effting

Co-orientador: Itamar Ribeiro Gomes

Dissertação (Mestrado) - Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Joinville, 2017.

1. Argamassa de revestimento. 2. Resíduo de pneus. 3. Cinzas volantes. 4. Resistência mecânica. I. Effting, Carneane. II. Ribeiro Gomes, Itamar. III. Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas, Programa de PósGraduação em Engenharia Civil. IV. Título.

**Análise das Propriedades Físicas e Mecânicas de Argamassa para  
Revestimento Utilizando Cinza Volante e Resíduos de Borracha de Pneus  
Inservíveis**

por

**Adriane Pczieczek**

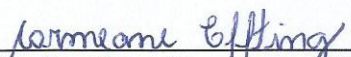
Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de

**MESTRA EM ENGENHARIA CIVIL**

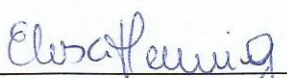
Área de concentração em “Engenharia Urbana e da Construção Civil”  
e aprovada em sua forma final pelo


CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL  
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS DA  
UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA.

Banca Examinadora:

  
\_\_\_\_\_  
Profa. Dra. Carmeane Eftting  
CCT/UDESC (Orientador/Presidente)

*Video Conferência*  
\_\_\_\_\_  
Profa. Dra. Janaíde Cavalcante Rocha  
UFSC

  
\_\_\_\_\_  
Profa. Dra. Elisa Henning  
CCT/UDESC

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Luiz Veriano Oliveira Dalla  
Valentina - CCT/UDESC

**Joinville, SC, 30 de agosto de 2017.**

Aos meus pais, Erico e Teresinha, e minha  
irmã Maurene, pelo apoio, incentivo e  
compreensão durante esta importante  
etapa de minha vida.

## **AGRADECIMENTOS**

À Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil pela oportunidade da realização do presente trabalho.

Aos meus pais, Erico e Teresinha, por todo apoio e incentivo oferecido e por acreditarem em meus sonhos.

À minha irmã, Maurene, pela amizade e por sempre ter acreditado em mim, pelas horas dedicadas em me ouvir e por entender os vários momentos em que a graduação e o mestrado não permitiram que pudéssemos estar juntas.

À minha orientadora, Prof. Dra. Carmeane Effting, pela orientação, dedicação, paciência, confiança e, principalmente, pela amizade durante o mestrado.

Ao coorientador Prof. Dr. Itamar Ribeiro Gomes, por compartilhar seus conhecimentos, pelo incentivo e entusiasmo na elaboração deste trabalho.

À Prof. Dra. Elisa Henning (UDESC), à Prof. Dra. Janaíde Cavalcante Rocha (UFSC) e ao Prof. Dr. Luiz Veriano Oliveira Dalla Valentina por aceitarem o convite para participar da banca de avaliação dessa dissertação.

Aos amigos, professores e funcionários do Departamento de Engenharia Civil, em especial ao Dr. Adilson Schackow do laboratório de Materiais de Construção Civil, pela ajuda na realização dos ensaios realizados nesta pesquisa.

À Promop, pela bolsa de estudo concedida.

À empresa Engisul Borrachas Ltda pela doação de resíduos de borracha e ao Complexo Termelétrico Jorge Lacerda pela doação de cinza leve para a realização desta pesquisa.

Aos meus amigos do mestrado, pelo carinho, companheirismo, pela troca de conhecimentos e pelos momentos divertidos que passamos juntos nesta jornada.

A todos os professores que passaram pela minha formação, meu sincero agradecimento pelos conhecimentos e ensinamentos transmitidos.

Agradeço principalmente a Deus, por ser possível mais esta importante conquista em minha vida.

A maior recompensa para o trabalho do  
homem não é o que ele ganha com isso,  
mas o que ele se torna com isso.  
(John Ruskin)

## RESUMO

A construção civil é um dos setores que causam grande impacto ambiental, pois consome grandes quantidades de recursos naturais e gera volumes consideráveis de resíduos. Por outro lado, a indústria da construção civil tem capacidade de reaproveitar os resíduos gerados tanto por ela quanto por outros setores. Este trabalho teve como objetivo analisar as propriedades físicas e mecânicas da argamassa com adição de cinza volante e diferentes concentrações de borracha para revestimento de edificações. Foram produzidas argamassas de referência, argamassas contendo borracha com dimensão máxima dos grãos de 0,71 mm e cinza volante com granulometria de 45  $\mu\text{m}$ . A argamassa de referência foi preparada com cimento, cal hidratada e areia com módulo de finura de 2,08 e dimensão máxima dos grãos de 2,36 mm. As outras argamassas tiveram 5% e 10% da massa do agregado miúdo substituído pela borracha e, a cinza volante adicionada em proporções de 10% e 20% em relação ao volume de cimento. Avaliou-se a consistência, a massa específica, o teor de ar incorporado e a retenção de água nas argamassas no estado fresco. No estado endurecido, foi avaliada a resistência à tração na flexão e na compressão, a absorção de água e o índice de vazios. Também foi avaliada a resistência de aderência à tração e a durabilidade das argamassas ao ataque por sulfato de sódio. A cinza leve, após moagem, apresentou maior atividade pozolânica, pois permitiu que ocorresse maior superfície específica de contato entre os elementos reativos da mistura, proporcionando um aumento na resistência mecânica. A substituição do agregado miúdo pela borracha contribuiu para o aumento no teor de ar incorporado e na redução da massa específica, tornando a argamassa mais leve e trabalhável. Já a adição de cinza volante moída na argamassa proporcionou um aumento na resistência à compressão aos 28 dias de 18% em relação à argamassa de referência e garantiu maior durabilidade ao ataque por sulfatos, apresentando menor perda de massa durante o período de exposição ao sulfato de sódio. A argamassa contendo 20% de cinza volante moída e 5% de borracha apresentou resistência de aderência à tração aos 65 dias de 0,33 MPa, sendo, portanto, possível a sua aplicação como revestimento em paredes internas e externas de edificações. Por meio da análise estatística, foi possível verificar que, para um nível de significância de 5%, tanto a borracha quanto a cinza volante influenciaram na resistência à compressão das argamassas, sendo a borracha o fator que apresentou maior efeito significativo.

**Palavras-chave:** Argamassa de revestimento. Resíduo de pneus. Cinzas volantes. Resistência mecânica.



## ABSTRACT

Civil construction is one of the sectors that cause great environmental impact because it consumes large amounts of natural resources and generates considerable volumes of waste. On the other hand, the construction industry has the capacity to reuse the waste generated by it and by other sectors. The purpose of this study was to analyze the physical and mechanical properties of the mortar with the addition of fly ash and different concentrations of rubber for coating of buildings. Were produced mortars reference, mortars containing rubber with a maximum grain size of 0,71 mm and fly ash with a grain size of 45  $\mu\text{m}$ . The reference mortar was prepared with cement, hydrated lime and sand with a fineness modulus of 2,08 and maximum grain of 2,36 mm. The other mortars had 5% and 10% of the mass of the small aggregate replaced by rubber and the fly ash added in proportions of 10% and 20% with respect to the volume of cement. The consistency, the specific gravity, the incorporated air content and the retention of water in the fresh mortars were evaluated. In the hardened state, the tensile strength in flexion and compression, the water absorption and the voids index were evaluated. It was also evaluated the strength of adhesion to the traction and durability of mortars to attack by sodium sulfate. The light ash, after grinding, presented higher pozzolanic activity, because it allowed a higher specific contact surface to occur between the reactive elements of the mixture, providing an increase in mechanical resistance. The replacement of the small aggregate by the rubber contributed to the increase in the incorporated air content and the reduction of the specific mass, making the mortar lighter and workable. Already the addition of ground fly ash in the mortar provided an increase in the compressive strength to 28 days of 18% in relation to the reference mortar and ensured greater durability to attack by sulfates, presenting a lower weight loss during the period of exposure to sodium sulfate. The mortar containing 20% of ground fly ash and 5% of rubber showed traction adhesion strength at 65 days of 0,33 MPa, being therefore possible to apply it to the internal and external walls of buildings. By means of statistical analysis, it was possible to verify that, for a significance level of 5%, both the rubber as fly ash influenced the compressive strength of the mortars, with rubber being the factor that presented the greatest significant effect.

**Keywords:** Coating mortar. Tire residue. Flying ashes. Mechanical resistance.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Destinação dos pneus inservíveis .....	31
Figura 2 - Depósito de pneus no Kuwait, (a) vista aérea; (b) vista “in loco” .....	32
Figura 3 - Esquema simplificado do processo de geração de energia termelétrica .....	36
Figura 4 - Estrutura do revestimento de paredes .....	44
Figura 5 - Fluxograma resumido para o planejamento experimental .....	63
Figura 6 - Fluxograma para a etapa de caracterização da borracha, cinza volante e areia .....	64
Figura 7 - Fluxograma para a etapa dos ensaios nas argamassas no estado fresco e endurecido .....	65
Figura 8 - Pó de borracha de pneus inservíveis .....	67
Figura 9 - Cinza volante .....	67
Figura 10 - Ensaio para a determinação da massa específica da areia, (a) secagem do material pela passagem de corrente de ar; (b) condição saturada superfície seca; (c) frasco calibrado com a amostra após a eliminação das bolhas de ar .....	70
Figura 11 - Picnômetro de gás hélio, (a) equipamento utilizado; (b) câmara da amostra .....	72
Figura 12 - Deslocamento do líquido no frasco Le Chatelier .....	73
Figura 13 - Corpos de prova para atividade pozolânica .....	75
Figura 14 - Preparação da argamassa e moldagem dos corpos de prova, (a) misturador mecânico, (b) nivelamento da argamassa no molde, (c) mesa de adensamento por queda .....	77
Figura 15 - Ensaio de consistência da argamassa, (a) mesa <i>Flow Table</i> , (b) espalhamento ....	78
Figura 16 - Ensaio da retenção de água, (a) Funil de Buchner com bomba de vácuo, (b) adensamento da argamassa, (c) prato com a argamassa sob o funil .....	80
Figura 17 - Ensaio da absorção de água, índice de vazios e massa específica, (a) amostras secas em estufa, (b) amostras imersas em água, (c) balança hidrostática .....	82
Figura 18 - Equipamentos usados nos ensaios de resistência à tração na flexão (a) e à compressão (b) .....	83
Figura 19 - Ensaio da resistência de aderência à tração, (a) e (b) corte no substrato das paredes revestidas com argamassa de referência e argamassa com borracha e cinza volante, (c) pastilhas coladas no painel, (d) equipamento utilizado no ensaio, (e) e (f) ruptura dos corpos de prova da argamassa de referência e argamassa com borracha e cinza volante .....	85
Figura 20 - Formas de ruptura dos corpos de prova para a resistência de aderência à tração .	86
Figura 21 - Esquema básico do posicionamento da amostra para determinação do módulo de elasticidade pelo método de excitação por impulso .....	87
Figura 22 - Amostras imersas em solução de sulfato de sódio .....	88
Figura 23 - Amostras das argamassas embutidas em resina epóxi e polidas, (a) argamassa de referência, (b) argamassa com 20% de cinza volante e 5% de borracha .....	89
Figura 24 - Curva granulométrica do agregado miúdo .....	93
Figura 25 - Micrografias do pó de borracha .....	95
Figura 26 - Imagem MEV do pó de borracha e pontos selecionados para aplicação de EDS .	96

Figura 27 - Espectros de EDS para a análise química dos pontos 1 e 2 da Figura 26 .....	96
Figura 28 - Micrografias da cinza volante.....	97
Figura 29 - Imagem MEV da cinza volante e pontos selecionados para aplicação de EDS ....	98
Figura 30 - Espectros de EDS para a análise química dos pontos 1 e 2 da Figura 29 .....	98
Figura 31 - Variação da massa específica das argamassas com a quantidade de borracha....	101
Figura 32 - Variação do teor de ar incorporado das argamassas com a quantidade de borracha .....	101
Figura 33 - Variação da retenção de água das argamassas com a quantidade de borracha ...	102
Figura 34 - Absorção das argamassas .....	103
Figura 35 - Índice de vazios das argamassas.....	104
Figura 36 - Resistência à tração na flexão das argamassas .....	105
Figura 37 - Resistência à compressão das argamassas .....	106
Figura 38 - Diagrama de Pareto para o efeito borracha e cinza volante .....	109
Figura 39 - Gráfico dos efeitos principais .....	109
Figura 40 - Gráfico dos efeitos das interações .....	110
Figura 41 - Gráfico de normalidade e aleatoriedade dos resíduos.....	111
Figura 42 - Gráfico de contorno da resistência à compressão em função dos fatores borracha e cinza volante.....	113
Figura 43 - Resistência à compressão das argamassas com cinza volante moída .....	117
Figura 44 - Diagrama de Pareto para o efeito borracha e cinza volante moída.....	120
Figura 45 - Gráfico dos efeitos principais .....	120
Figura 46 - Gráfico dos efeitos das interações .....	121
Figura 47 - Gráfico de normalidade e aleatoriedade dos resíduos.....	122
Figura 48 - Gráfico de contorno da resistência à compressão em função dos fatores borracha e cinza volante moída .....	123
Figura 49 - Ruptura dos corpos de prova no teste de resistência de aderência à tração, (a) argamassa de referência, (b) argamassa contendo cinza volante moída + borracha .....	126
Figura 50 - Resistência de aderência à tração das argamassas .....	127
Figura 51 - Gráfico de normalidade e aleatoriedade dos resíduos.....	127
Figura 52 - Resistência das argamassas ao ataque por sulfato de sódio em função do número de ciclos de exposição.....	131
Figura 53 - Aspecto dos corpos de prova após (a) 6, (b) 10, (c) 15, (d) 21, (e) 25 e (f) 31 ciclos de molhagem e secagem.....	131
Figura 54 - Micrografia da argamassa de referência (continua).....	132
Figura 55 - Micrografia da argamassa contendo cinza volante moída e borracha (CM20B5) .....	134

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Composição química dos pneus .....	30
Tabela 2 - Destino dos pneus reciclados .....	32
Tabela 3 - Quantificação dos resíduos gerados das termelétricas .....	37
Tabela 4 - Classificação das argamassas segundo as suas funções na construção .....	43
Tabela 5 - Espessuras admissíveis para camada de revestimento de argamassa.....	45
Tabela 6 - Características da areia .....	47
Tabela 7 - Classificação das argamassas por meio da retenção de água.....	49
Tabela 8 - Classificação das argamassas quanto à massa específica no estado fresco .....	50
Tabela 9 - Limites de resistência de aderência à tração .....	53
Tabela 10 - Classificação das argamassas por meio da resistência de aderência à tração .....	53
Tabela 11 - Exigências mecânicas e reológicas para argamassas.....	55
Tabela 12 - Tabela ANOVA para projeto fatorial com dois fatores.....	60
Tabela 13 - Classificação dos agregados miúdos segundo o módulo de finura .....	68
Tabela 14 - Classificação do agregado miúdo segundo a curva granulométrica.....	69
Tabela 15 - Características físicas do cimento Portland CP II Z-32.....	91
Tabela 16 - Características físicas da cal hidratada CH III .....	91
Tabela 17 - Características físicas do agregado miúdo.....	92
Tabela 18 - Características físicas da borracha .....	93
Tabela 19 - Características físicas da cinza .....	94
Tabela 20 - Resultados dos ensaios para atividade pozolânica .....	94
Tabela 21 - Resultado da análise química semi-quantitativa por EDS dos pontos 1 e 2 da Figura 27 .....	97
Tabela 22 - Resultados da análise química semi-quantitativa por EDS dos pontos 1 e 2 da Figura 30 .....	99
Tabela 23 - Composição das argamassas .....	99
Tabela 24 - Propriedades da argamassa no estado fresco .....	100
Tabela 25 - Massa específica, absorção de água e índice de vazios das argamassas .....	103
Tabela 26 - Resistência à tração na flexão e resistência à compressão das argamassas .....	105
Tabela 27 - Misturas do projeto fatorial 3 <sup>2</sup> e resultado da resistência à compressão das argamassas.....	107
Tabela 28 - Estimativa dos efeitos para a resistência à compressão das argamassas .....	108
Tabela 29 - Análise de variância da resistência à compressão das argamassas .....	111
Tabela 30 - Resultados do teste de Tukey para a resistência à compressão.....	112
Tabela 31 - Resultados dos ensaios para atividade pozolânica da cinza moída.....	114
Tabela 32 - Propriedades da argamassa no estado fresco contendo cinza moída.....	115
Tabela 33 - Massa específica, absorção de água e índice de vazios das argamassas contendo cinza volante moída .....	116

Tabela 34 - Resistência à tração na flexão e resistência à compressão das argamassas com cinza volante moída .....	116
Tabela 35 - Módulo de elasticidade das argamassas.....	117
Tabela 36 - Misturas do projeto fatorial 2 <sup>2</sup> e resultado da resistência à compressão das argamassas.....	118
Tabela 37 - Estimativa dos efeitos para a resistência à compressão das argamassas contendo cinza volante moída .....	119
Tabela 38 - Análise de variância da resistência à compressão das argamassas contendo cinza volante moída .....	122
Tabela 39 - Resultados do ensaio de resistência de aderência à tração da argamassa de referência.....	124
Tabela 40 - Resultados do ensaio de resistência de aderência à tração da argamassa MC205M .....	125
Tabela 41 - Análise de variância da resistência de aderência à tração das argamassas .....	127
Tabela 42 - Resultado das variações de massa da argamassa de referência durante o ensaio de ataque por sulfato de sódio.....	129
Tabela 43 - Resultado das variações de massa da argamassa contendo 20% de cinza volante moída + 5% borracha durante o ensaio de ataque por sulfato de sódio .....	130

## LISTA DE SÍMBOLOS

%	porcentagem
mm	milímetro
ton	tonelada
e	espessura
°C	graus Celsius
$\rho$	massa específica
g	grama
cm <sup>3</sup>	centímetro cúbico
g/cm <sup>3</sup>	grama por centímetro cúbico
psig	libras por polegada quadrada manométrica
kg/m <sup>3</sup>	kilograma por metro cúbico
MPa	mega Pascal
GPa	giga Pascal
N	Newton
N/s	Newton por segundo
#200	abertura de 200 $\mu$ m da malha da peneira
$\mu$ m	micrometro
cm	centímetro
nm	nanômetro
C <sub>3</sub> S	silicato tricálcico
C <sub>2</sub> S	silicato dicálcico
C <sub>3</sub> A	aluminato tricálcico
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	sulfato de sódio
Ca(OH) <sub>2</sub>	hidróxido de cálcio
C <sub>3</sub> A.CS.H <sub>18</sub>	monosulfoaluminato
C <sub>3</sub> A.3CS.H <sub>32</sub>	trissulfoaluminato ou sulfoaluminato hidratado de cálcio ou etringita
CaSO <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O	sulfato de cálcio di-hidratado ou gipsita
C-S-H	silicato de cálcio hidratado
CH	hidróxido de cálcio
C <sub>6</sub> ASH <sub>31</sub>	etringita tardia
pH	potencial de hidrogênio (indica a acidez, neutralidade ou alcalinidade de uma solução aquosa)
$\alpha$	nível de significância
p-valor	valor do teste da hipótese
R <sup>2</sup>	proporção de variabilidade na propriedade medida ocasionada pelos fatores estudados

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>25</b>
1.1	JUSTIFICATIVA	26
1.2	OBJETIVOS	27
1.2.1	Objetivo geral	27
1.2.2	Objetivos específicos	27
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>29</b>
2.1	RESÍDUOS DE PNEUS INSERVÍVEIS	29
2.1.1	Histórico da borracha empregada em pneus	30
2.1.2	Reciclagem de pneus inservíveis	30
2.1.3	Programas de reciclagem	33
2.1.4	Reutilização de pneus inservíveis na engenharia	33
2.2	CINZAS VOLANTES	35
2.2.1	Usinas termelétricas e cinzas do carvão mineral	36
2.2.2	Características das cinzas volantes	38
2.2.3	Regulamentação e Legislação ambiental	39
2.2.4	Aplicação de resíduos de cinzas na construção civil	40
2.3	ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO	42
2.4	MATERIAIS COMPONENTES DAS ARGAMASSAS	45
2.4.1	Cimento Portland	45
2.4.2	Água	46
2.4.3	Areia (agregado)	46
2.4.4	Cal hidratada	47
2.5	PROPRIEDADES DA ARGAMASSA NO ESTADO FRESCO	48
2.5.1	Trabalhabilidade	48
2.5.2	Consistência e plasticidade	48
2.5.3	Retenção de água	49
2.5.4	Massa específica e teor de ar incorporado	50
2.5.5	Adesão inicial	51
2.6	PROPRIEDADES DA ARGAMASSA NO ESTADO ENDURECIDO	51
2.6.1	Retração	51
2.6.2	Resistência de aderência à tração	52
2.6.3	Capacidade de absorver pequenas deformações	54
2.6.4	Resistência à tração na flexão e à compressão	55
2.6.5	Durabilidade ao ataque por sulfatos	56
2.7	PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS E ANÁLISE DA VARIÂNCIA	58
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>63</b>
3.1	MATERIAIS UTILIZADOS	65

<b>3.1.1 Cimento Portland CP II Z-32 .....</b>	<b>66</b>
<b>3.1.2 Agregado miúdo .....</b>	<b>66</b>
<b>3.1.3 Cal hidratada.....</b>	<b>66</b>
<b>3.1.4 Água.....</b>	<b>66</b>
<b>3.1.5 Resíduo de borracha de pneus .....</b>	<b>66</b>
<b>3.1.6 Cinza volante .....</b>	<b>67</b>
<b>3.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS .....</b>	<b>68</b>
<b>3.2.1 Determinação da composição granulométrica .....</b>	<b>68</b>
<b>3.2.2 Determinação da massa específica e massa específica aparente.....</b>	<b>69</b>
<b>3.2.3 Determinação da massa específica do resíduo de borracha .....</b>	<b>71</b>
<b>3.2.4 Determinação da massa específica da cinza volante .....</b>	<b>73</b>
<b>3.2.5 Determinação da massa unitária .....</b>	<b>74</b>
<b>3.2.6 Determinação da atividade pozolânica .....</b>	<b>74</b>
<b>3.3 PREPARAÇÃO DA ARGAMASSA.....</b>	<b>76</b>
<b>3.4 ENSAIOS DA ARGAMASSA NO ESTADO FRESCO .....</b>	<b>77</b>
<b>3.4.1 Determinação do índice de consistência .....</b>	<b>77</b>
<b>3.4.2 Determinação da massa específica e do teor de ar incorporado .....</b>	<b>78</b>
<b>3.4.3 Determinação da retenção de água .....</b>	<b>79</b>
<b>3.5 ENSAIOS DA ARGAMASSA NO ESTADO ENDURECIDO .....</b>	<b>81</b>
<b>3.5.1 Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica .....</b>	<b>81</b>
<b>3.5.2 Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão.....</b>	<b>83</b>
<b>3.5.3 Determinação da resistência de aderência à tração .....</b>	<b>84</b>
<b>3.5.4 Determinação do módulo de elasticidade .....</b>	<b>86</b>
<b>3.5.5 Ataque por sulfatos .....</b>	<b>87</b>
<b>3.5.6 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) .....</b>	<b>88</b>
<b>3.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA.....</b>	<b>89</b>
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>91</b>
<b>4.1 ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS .....</b>	<b>91</b>
<b>4.1.1 Atividade pozolânica .....</b>	<b>94</b>
<b>4.1.2 Micrografia dos resíduos.....</b>	<b>95</b>
<b>4.2 COMPOSIÇÃO DA ARGAMASSA.....</b>	<b>99</b>
<b>4.3 ANÁLISE DAS PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO .</b>	<b>100</b>
<b>4.4 ANÁLISE DAS PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO .....</b>	<b>102</b>
<b>4.4.1 Análise estatística da resistência à compressão das argamassas.....</b>	<b>106</b>
<b>4.5 ANÁLISE DAS ARGAMASSAS CONTENDO CINZA VOLANTE MOÍDA .....</b>	<b>114</b>
<b>4.5.1 Atividade pozolânica da cinza volante moída.....</b>	<b>114</b>
<b>4.5.2 Análise das argamassas no estado fresco.....</b>	<b>114</b>
<b>4.5.3 Análise das propriedades das argamassas no estado endurecido .....</b>	<b>115</b>



4.5.4	Análise estatística da resistência à compressão das argamassas contendo cinza volante moída .....	118
4.5.5	Resistência de aderência à tração e análise estatística dos resultados .....	123
4.5.6	Resistência das argamassas ao ataque por sulfatos .....	128
4.5.7	Análise da micrografia das argamassas .....	132
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	137
5.1	CONCLUSÕES .....	137
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	138
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	139



## 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 tem absorvido grandes quantidades de resíduos sólidos reciclados em componentes de edificações (CINTRA; PAIVA; BALDO, 2014).

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 Ganiron Jr (2014), algumas alternativas já 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 através do corte ou da raspagem, sendo este material reutilizado em muitas áreas industriais e também na pavimentação asfáltica como ligante, para fins rodoviários. Na área da construção civil, pesquisas realizadas por Fiore *et al.* (2014) e Aliabdo *et al.* (2015) mostraram a possibilidade do uso de resíduos de pneus na aplicação de concretos sem função estrutural, apresentando bom desempenho térmico e acústico.

O crescente uso de usinas termelétricas e o consumo de carvão mineral como combustível geram volumes consideráveis de resíduos na forma de cinza. 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 (RHODE; MACHADO, 2016).

A argamassa de revestimento tem como principal característica absorver pequenas deformações. Quando aplicadas como revestimento, as argamassas estão sujeitas a variações dimensionais, ocasionando o surgimento de fissuração, que pode ser decorrente da elasticidade, da retração térmica e das ações externas ao revestimento (CANOVA; BERGAMASCO; ANGELIS NETO, 2007).

Segundo Freitas, Carasek e Cascudo (2014), os fenômenos climáticos como o vento, a chuva e a insolação, influenciam na durabilidade dos revestimentos de fachada reduzindo a vida útil das construções. Algumas manifestações patológicas nas fachadas, devido à

influência dos fenômenos atmosféricos, comprometem a estética da edificação, como as fissuras, infiltrações, manchas, descolamento e deslocamento dos revestimentos.

Como a grande maioria dos materiais empregados na construção civil utiliza cimento na sua composição, o produto final está suscetível ao aparecimento de trincas devido a elevada rigidez e retração, comprometendo a durabilidade do material. Estudos mostram a possibilidade de melhorar algumas propriedades de compósitos cimentícios com a incorporação de resíduos que muitas vezes são simplesmente descartados (CINTRA, 2013).

Assim, a borracha, por ser um material elástico, pode contribuir no desempenho em relação à fissuração das argamassas, além de poder contribuir na diminuição da absorção de água dos revestimentos, evitando assim o possível surgimento de patologias. A cinza volante pode contribuir na durabilidade das argamassas, aumentando a sua resistência à compressão e aumentando a proteção contra o ataque por sulfatos. Neste contexto, o assunto se mostra importante, pois o uso desses resíduos como componentes da argamassa pode-se apresentar como um material alternativo na construção civil, contribuindo para a diminuição do consumo de recursos naturais e reduzindo os impactos ambientais.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

O reaproveitamento dos resíduos de pneus inservíveis apresenta grandes benefícios ambientais, contribuindo para a redução de grandes espaços ocupados em aterros, diminuindo a proliferação de insetos e roedores quando armazenados incorretamente, reduzindo possíveis alagamentos e enchentes quando jogados em rios e córregos, além de contribuir com a diminuição de gases poluentes emitidos na atmosfera provocada pela queima de pneus.

Considerando a grande quantidade de pneus descartados anualmente, o grande volume de cinzas produzido pelas usinas termelétricas, o crescente uso de recursos naturais para a produção de compósitos cimentícios e a possibilidade de melhorias na qualidade do produto final para a construção civil, presume-se que a incorporação de borracha de pneus e cinza volante pode contribuir significativamente na durabilidade e no comportamento mecânico das argamassas.

Por outro lado, percebe-se que o uso simultâneo de borracha de pneus inservíveis e cinza volante em argamassas para revestimento ainda não foi abordado, evidenciando, assim, a importância desta pesquisa.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho consiste em analisar as propriedades físicas e mecânicas da argamassa para revestimento de paredes interna e externa com adição de cinza volante e substituição parcial do agregado miúdo por borracha de pneus inservíveis.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar os resíduos (borracha e cinza volante) quanto às propriedades físicas, químicas e morfológicas;
- Avaliar as propriedades das argamassas no estado fresco e endurecido com adição de 10% e 20% de cinza volante e substituição de 5% e 10% do agregado miúdo pela borracha;
- Aplicar métodos estatísticos e de superfície de resposta para análise de resultados da resistência à compressão das argamassas.



## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo será abordado um breve histórico sobre a origem da borracha utilizada na fabricação de pneus e o processo de reciclagem quando for necessário o seu descarte. A destinação adequada de pneus inservíveis é descrita através das recomendações impostas pela legislação ambiental e abordada por meio dos programas nacionais existentes. Também será abordada neste capítulo a produção e o aproveitamento de resíduos provenientes do consumo de carvão em usinas termelétricas. Será, também, apresentado algumas propriedades da argamassa tanto no estado fresco, como no estado endurecido, além das definições dos materiais constituintes. O Planejamento de Experimentos (DOE) também será abordado neste capítulo, assim como alguns métodos utilizados para analisar os efeitos dos fatores estudados.

### 2.1 RESÍDUOS DE PNEUS INSERVÍVEIS

Com o aumento considerável de veículos nas cidades, o acúmulo de pneus inservíveis tornou-se um grande problema de gestão de resíduos. Segundo Kanso (2014), depositar um resíduo no solo não está apenas adiando a resolução de um problema, mas contribuindo para um problema ainda maior no futuro. A contaminação provocada pelos resíduos não restringe apenas ao local de descarte; além da poluição do solo, gases poluentes devido à queima dos materiais podem se espalhar pela atmosfera; como por exemplo, o acúmulo de pneus e outros resíduos de borracha em uma mesma área tendem a produzir incêndios espontâneos.

Segundo Andrietta (2002), o pneu é constituído por borracha natural, borracha sintética, negro de fumo, tecido de nylon, fibras de aço e aditivos, como tintas e óleos. A borracha representa cerca de 40% do peso de um pneu, sendo, portanto, os hidrocarbonetos os constituintes básicos e em maior quantidade em sua composição. Principalmente devido à sua composição química, os pneus queimam em temperaturas elevadas, produzindo grandes quantidades de fumaça negra e óleos que penetram no solo e nos lençóis freáticos. A Tabela 1 apresenta a composição química de pneus para automóveis.

Tabela 1- Composição química dos pneus

Elemento / Composto	Quantidade (%)
Carbono	70,0
Hidrogênio	7,0
Óxido de Zinco	1,2
Enxofre	1,3
Ferro	15,0
Outros	5,5

Fonte: Andrietta (2002).

### 2.1.1 Histórico da borracha empregada em pneus

De acordo com a Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos - ANIP (2015), foi a partir do século XIX que o pneu teve sua origem. Nessa época, a borracha era usada para impermeabilizar tecidos e quando exposta a temperaturas elevadas apresentava o risco de se dissolver.

Por volta de 1830, Charles Goodyear descobriu o processo da vulcanização da borracha, misturando acidentalmente borracha e enxofre. Goodyear percebeu que elevando a temperatura dessa mistura, a elasticidade da borracha continuava preservada. Em 1845, os irmãos Michelin foram os primeiros a patentear o pneu para automóveis, e dois anos mais tarde, Robert Thompson inseriu um invólucro repleto de ar no interior dos pneus de borracha sólida (ANIP, 2015).

Em 1888, quarenta e três anos após a invenção de Thompson, John Boyd Dunlop, veterinário escocês, reinventou o pneu ao improvisar uma câmara de ar de borracha flexível, envolvendo-a em uma lona e montando-a em um aro de madeira para o triciclo do seu filho, para que ele pudesse andar nas ruas de pedra da Escócia. Devido ao excelente resultado, Dunlop obteve da rainha Vitória a patente de número 10607 pela invenção do pneu (MÖDERLER, 2012).

### 2.1.2 Reciclagem de pneus inservíveis

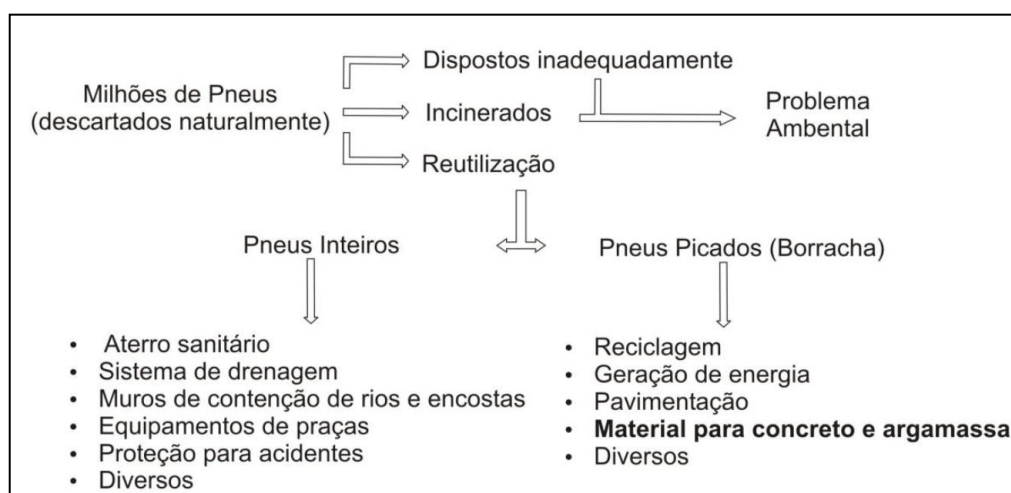
A reciclagem consiste em transformar produtos que não apresentam mais nenhuma utilidade ao consumidor em matéria-prima para a fabricação de outros produtos. Além de ser ecologicamente correta, a reciclagem pode ser economicamente viável, tanto para os



recicladores quanto para as indústrias de transformação, como é o caso da borracha utilizada na fabricação de pneus (GOMES FILHO, 2007).

O processo de reciclagem varia de acordo com aspectos técnicos, econômicos e quanto à disposição do resíduo. Os pneus podem ser reaproveitados mantendo a sua forma original ou passar por processamento químico, como a pirólise, a gaseificação e a hidrogenação (GOMES FILHO, 2007). A utilização como subproduto dos pneus inservíveis (Figura 1) é bastante atrativo, pois apresenta alta resistência ao intemperismo, é de fácil transporte e seu manuseio não oferece grandes riscos para quem o manipula (GRANZOTTO, 2010).

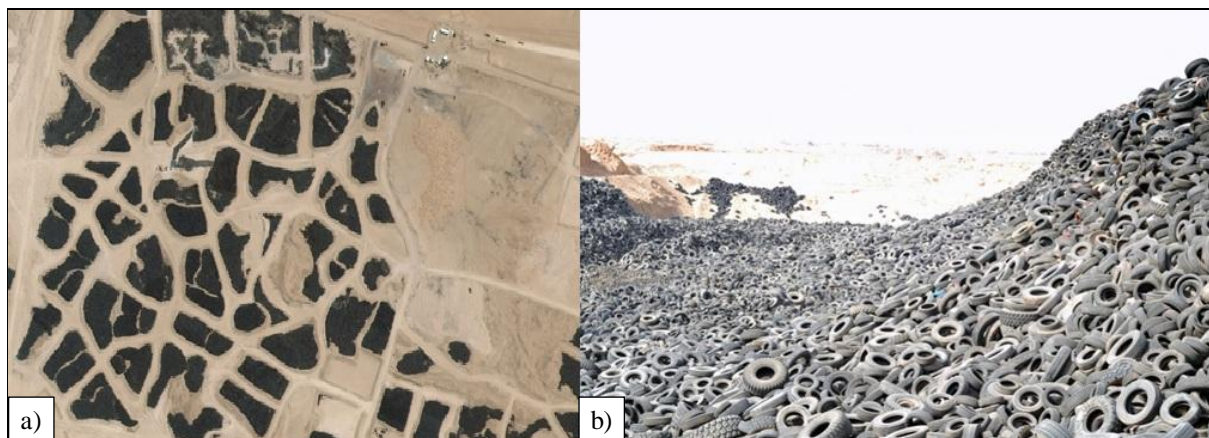
Figura 1 - Destinação dos pneus inservíveis



Fonte: Granzotto (2010).

De acordo com a Japan Automobile Tyre Manufactures Association - JATMA (2017), a produção mundial de pneus em 2015 foi de 15,86 milhões de toneladas, sendo que a Ásia e a Oceania foram responsáveis por aproximadamente 65% da produção de pneus mundialmente. No Japão, durante o ano de 2016, foram produzidos 94 milhões de unidades de pneus, equivalente a 997 mil toneladas e foram reciclados cerca de 903 mil toneladas, onde aproximadamente 65% teve como destino final a produção de energia. Segundo a Rubber Manufactures Association – RMA (2016), nos Estados Unidos, em 2015, foram reciclados 3.548,84 mil toneladas de pneus inservíveis, o equivalente a 216,54 milhões de pneus, sendo que, aproximadamente 445,5 mil toneladas foram enviados para aterros, o equivalente a 27,19 milhões de pneus. De acordo com Kanso (2014), alguns países, como os Estados Unidos, exportam pneus para o Kuwait onde são descartados em um imenso aterro que pode ser vista do espaço. Este depósito fica localizado na região desértica de Sulaibiya (Figura 2), sendo que neste lugar existem mais de sete milhões de pneus com tendência de aumento a cada ano.

Figura 2 - Depósito de pneus no Kuwait, (a) vista aérea; (b) vista “in loco”



Fonte: Kanso (2014).

Segundo a ANIP (2017) foram produzidos cerca de 67,8 milhões de unidades de pneus no Brasil em 2016, sendo o sétimo maior produtor de pneus do mundo. Durante todo o ano de 2016 foram reciclados mais de 457,5 mil toneladas de pneus inservíveis, equivalente a 91,5 milhões de unidades de pneus de carros de passeio retirados das ruas e rios. A Tabela 2 mostra o destino dos pneus recolhidos no Brasil.

Tabela 2- Destino dos pneus reciclados

Combustível Alternativo	69,70%
Material granulado	17,8% (aproveitado em pisos e gramados, produção de artefatos de borracha, asfalto de borracha e construção civil)
Material laminado	6,00%
Aço recuperado	6,50%

Fonte: ANIP (2017).

De acordo com a Tabela 2, cerca de 69% do total de pneus reciclados são utilizados como combustível alternativo em fornos da indústria de cimento, gerando energia para a fabricação de clínquer. O restante tem como destino final a reciclagem, originando novos produtos como pisos de quadras esportivas, grama sintética, tapetes de automóveis, entre outros (ANIP, 2017).

### 2.1.3 Programas de reciclagem

De acordo com a classificação de resíduos sólidos pela NBR 10.004 (ABNT, 2004), o rejeito de borracha de pneus é considerado como resíduo inerte não perigoso de Classe II.

O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), através da sua Resolução nº416/2009, traz recomendações sobre a destinação adequada dos pneus inservíveis e a prevenção quanto à degradação ambiental.

Segundo a Resolução nº416 (CONAMA, 2009),

Art. 1º Os fabricantes e os importadores de pneus novos, com peso unitário superior a 2,0 kg (dois quilos), ficam obrigados a coletar e dar destinação adequada aos pneus inservíveis existentes no território nacional, na proporção definida nesta Resolução.

Art. 8º Os fabricantes e os importadores de pneus novos, de forma compartilhada ou isoladamente, deverão implementar pontos de coleta de pneus usados, podendo envolver os pontos de comercialização de pneus, os municípios, borracheiros e outros.

§ 1º Os fabricantes e os importadores de pneus novos deverão implantar, nos municípios acima de 100.000 (cem mil) habitantes, pelo menos um ponto de coleta [...].

Em 2007, a ANIP criou a Reciclanip, voltada para a coleta e destinação de pneus inservíveis no Brasil. Originária do Programa Nacional de Coleta e Destinação de Pneus Inservíveis, de 1999, a Reciclanip recolhe e dá destinação correta dos pneus descartados em parceria com as prefeituras. Desde a sua fundação, a Reciclanip já coletou e destinou de forma ambientalmente correta, mais de 3,8 milhões de toneladas de pneus, o que equivale a 760 milhões de unidades de pneus de carros de passeio (ANIP, 2017).

Diferente da gestão de empresas europeias, onde os consumidores de pneus são obrigados a pagar uma taxa para a sua reciclagem, os fabricantes de pneus no Brasil representados pela ANIP, pagam todos os custos referentes à coleta e a destinação dos pneus inservíveis (ANIP, 2017).

### 2.1.4 Reutilização de pneus inservíveis na engenharia

A borracha obtida pela reciclagem de pneumáticos é um material promissor, com algumas aplicações interessantes na indústria da construção civil devido a sua leveza, elasticidade, absorção, capacidade de absorver energia e apresentar bom isolamento térmico e acústico (FIORE *et al.*, 2014).

Na engenharia, a aplicação de resíduos de pneus reciclados destaca-se na pavimentação asfáltica como ligante, melhorando as propriedades relacionadas à resistência da pavimentação quanto à deformação e ao surgimento de trincas por fadiga (SHU; HUANG, 2013). Os pneus reciclados podem ser usados como combustível para fornos de cimento substituindo os combustíveis convencionais, em obras de muro de contenção, em sistemas de drenagem e em aplicações não estruturais na construção civil (MAVROULIDOY; FIGUEIREDO, 2010).

O comportamento da borracha em pasta cimentícia foi estudada por Segre *et al.* (2006). A existência ou ausência de fissuras na pasta cimentícia depende da adesão entre partículas de borracha e o tipo de cimento usado. Partículas de borracha que passaram por tratamento com NaOH apresentaram menor propagação de fissuração na pasta de cimento em relação àquela que não possuía nenhum tipo de tratamento.

Canova *et al.* (2007) desenvolveram um estudo sobre a argamassa de revestimento contendo resíduos de pneus inservíveis. Os resultados obtidos pelos autores apresentaram menores incidências de fissuração no revestimento para a argamassa que recebeu 8% de adição de pó de borracha.

Partala (2009) investigou a resistência à compressão de concretos contendo resíduos particulares de borracha como substituto parcial do agregado miúdo. Segundo a sua pesquisa, concretos que continham 15% em volume de resíduos de borracha obtiveram resistência à compressão de até 28 MPa, sendo possível seu uso na construção civil com função estrutural.

Segundo Nacif *et al.* (2013), o tamanho das partículas de borracha, a quantidade de borracha incorporada em relação a massa de cimento e o fator água/cimento afetam significativamente a massa específica e a resistência à compressão de compósitos cimentícios. Partículas de borracha com tamanho de 0,28/0,18 mm resultam em materiais cimentícios com baixa massa específica e porosidade aparente, além de apresentar maior resistência à compressão.

Cintra (2013) incluiu agregados de borracha reciclada de pneus em argamassas leves substituindo parte da areia e de vermiculita. Os resultados mostraram que a inclusão da borracha diminuiu a retração, melhorou a resistência à compressão uniaxial e diametral, aumentou a resistência de aderência das argamassas leves sem apresentar alterações na condutividade térmica e absorção acústica.

Fiore *et al.* (2014) verificaram que compostos cimentícios contendo resíduo de borracha tiveram a resistência à compressão reduzida e apresentaram vulnerabilidade ao ataque de sulfato. Mas, misturas contendo até 50% de borracha, apresentaram boas

características como: baixa condutibilidade térmica, resistência ao degelo e à penetração de íons cloreto, além de reduzir a sua densidade. Mavroulidoys e Figueiredo (2010) também verificaram que a resistência do concreto diminui com a adição de borracha, podendo ser utilizado em aplicações estruturais que requerem baixa resistência à compressão. Aliabdo *et al.* (2015) verificaram que a condutividade térmica reduz significativamente com o aumento de borracha no concreto, embora ocorra diminuição na resistência à compressão e à flexão.

Faria (2015) avaliou o efeito da incorporação de borracha de pneus inservíveis na cerâmica vermelha. O alto poder calorífico do resíduo possibilita a economia de energia no processo de queima das peças cerâmicas. A incorporação de até 1% de pó de borracha na cerâmica melhora a plasticidade e não altera a resistência mecânica; concentrações maiores de borracha podem aumentar a porosidade do material por apresentar elevado teor de carbono.

Argamassa contendo pó de borracha e resíduo de pedra foi estudado por Canova *et al.* (2015). Segundo a pesquisa, o uso desses resíduos contribuiu para o aumento de vazios e retenção de água, absorção de água por capilaridade e reduziu significativamente o aparecimento de fissuras visíveis.

Angelin *et al.* (2017) analisaram o efeito da borracha em relação a porosidade e a resistência mecânica em argamassas de cimento de alta resistência. O uso da borracha reciclada de pneus em proporções de 30% em substituição da areia resultou na diminuição da resistência à tração na flexão e à compressão; também foi constatada a presença de poros irregulares e esferoidais em sua morfologia.

## 2.2 CINZAS VOLANTES

As cinzas oriundas das usinas termelétricas são formadas a partir de componentes não combustíveis de carvão e de partículas não queimadas devido à combustão incompleta do carvão. Estas cinzas são classificadas em cinzas leves ou volantes e cinzas pesadas. Embora parte considerável do volume de cinza leve seja empregada na produção de cimento Portland composto, a destinação atual da cinza pesada é muito restrita e agrega baixo valor ao material, representando elevados custos de manipulação e destinação às usinas produtoras de energia elétrica (KREUZ; CHERIAF; ROCHA, 2002).

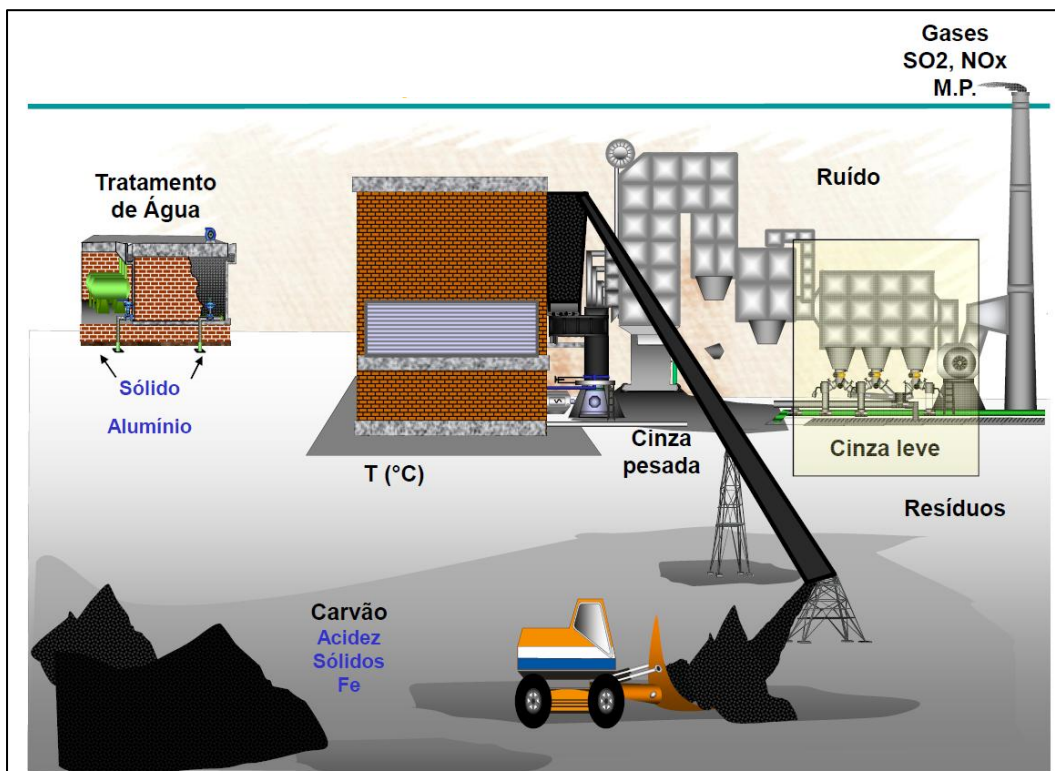
O uso de cinzas volantes em concretos e argamassas apresenta vários benefícios às propriedades do concreto em relação à sua reologia no estado fresco e, principalmente, em relação a sua durabilidade no estado endurecido (NETTO, 2006).

### 2.2.1 Usinas termelétricas e cinzas do carvão mineral

As usinas termelétricas brasileiras em atividade que empregam carvão fóssil como combustível estão localizadas próximas às jazidas carboníferas situadas no sul do país, nos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná. As maiores reservas de carvão fóssil do país concentra-se no Rio Grande do Sul, representando cerca de 89% do total, seguida de Santa Catarina com aproximadamente 10% e Paraná com cerca de 1% das reservas nacionais conhecidas (RHODE; MACHADO, 2016). Outras regiões do país, como o sudeste e o nordeste, estão sendo instaladas usinas termelétricas cujo carvão empregado será importado da Colômbia com baixo teor de cinzas (MALLMANN; ZWONOK, 2011).

O processo de geração de energia de uma termelétrica está representado na Figura 3. A captação da cinza leve é realizada por meio de precipitadores eletrostáticos, sendo a cinza transportada pneumaticamente para silos de armazenamento. A cinza que se deposita no fundo das fornalhas, ou seja, a cinza pesada, é misturada em um jato de água, transportada via úmida e conduzida à bacia de sedimentação (POZZOBON, 1999).

Figura 3 - Esquema simplificado do processo de geração de energia termelétrica



Fonte: Tractebel Energia (2015).

As cinzas pesadas são originadas no processo de queima do carvão em forma pulverizada e da queima ou gaseificação do carvão em leito fluidizado, contendo cinzas de granulometria mais grossa. Este resíduo contém entre 5% a 10% de teores de carbono não queimado e geralmente é retirado do fundo das fornalhas por um fluxo de água. As cinzas volantes são constituídas de partículas muito finas (menor que 0,15 mm) e são arrastadas pelos gases de combustão das fornalhas ou pelos gases gerados em gaseificadores industriais. A retirada deste resíduo é realizada por um sistema de captação, como filtros de tecido, ciclones, precipitadores eletrostáticos, entre outros (RHODE; MACHADO, 2016).

Segundo Siqueira (2011), em média, 1 kg de carvão produz cerca de 150 g de cinza, que por sua vez contém entre 6 e 24 g de carvão incombustível. Aproximadamente 20% dos resíduos precipitam-se no fundo da câmara de combustão (cinza pesada) e os 80% restante são compostos de partículas muito finas (cinza leve).

As quantidades de resíduos produzidas anualmente nas termelétricas nos estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná estão apresentadas na Tabela 3. O total de cinzas de fundo ou cinzas pesadas, aproximadamente 1.092.288 ton/ano, é atualmente descartada retornando para as cavas de mineração. Já as cinzas leves ou volantes são, na sua grande maioria, comercializadas pelas indústrias cimenteiras.

Tabela 3 - Quantificação dos resíduos gerados das termelétricas

Termelétrica	Quantidades produzidas em ton/ano	
	Cinza volante	Cinza de fundo
CMPC (RS)	66.000	13.200
BRASKEM (RS)	96.000	13.200
UTCH (RS)	132.000	42.000
CTCandiotá (RS)	1.359.600	688.800
Jorge Lacerda (SC)	1.324.800	331.200
Figueira (PR)	20.412	3.888
Total	2.998.812	1.092.288

Fonte: Rhode e Machado (2016).

Considerando novas unidades de usinas termelétricas a serem implantadas na região sul do país, haverá um aumento considerável na produção de cinzas em cerca de seis milhões de toneladas e mais dois milhões de toneladas de resíduos da dessulfuração (MALLMANN; ZWONOK, 2011).

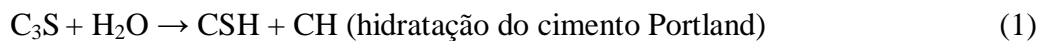
### 2.2.2 Características das cinzas volantes

Em geral, as cinzas são minerais alumino-silicatos constituídos pelas fases amorfa e cristalina. A fase amorfa é constituída por um pó de partículas finas com propriedades pozolânicas, composto principalmente por partículas vítreas e esféricas (QUEROL *et al.*, 2002).

De acordo com a NBR 12653 (ABNT, 2014b), as cinzas volantes são resíduos finamente divididos oriundos da combustão de carvão mineral pulverizado ou granulado que apresentam características pozolânicas. Segundo a ASTM C 125 (ASTM, 2003), a pozolana é um material silicoso ou silicoaluminoso que, por si só, possui pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas com a presença de água, reage com hidróxido de cálcio à temperatura ambiente formando compostos com propriedades aglomerantes.

A principal propriedade da pozolana consiste na sua capacidade de reagir e combinar com o hidróxido de cálcio, gerando compostos estáveis e com características aglomerantes. No cimento Portland, o hidróxido de cálcio liberado durante a hidratação dos silicatos reage com a pozolana incorporada no cimento, o que faz gerar uma produção extra de silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) que possuem mais estabilidade que o cimento hidratado (CASTRO, 2008).

Segundo Mehta (1987) apud Netto (2006) a reação pozolânica ocorre devido à reação entre a cal (básica) e os óxidos (ácidos) da pozolana, que são responsáveis pela melhora das características técnicas no concreto. A principal reação pozolânica envolve a formação de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), similar ao produzido pela hidratação dos silicatos de cálcios do cimento Portland, como o  $C_3S$  (silicato tricálcico). As reações podem ser descritas como apresentado nas equações 1e 2:



onde, C = CaO, S = SiO<sub>2</sub>, H = H<sub>2</sub>O.

O hidróxido de cálcio (CH) necessário à reação pozolânica é gerado juntamente com o silicato de cálcio hidratado (C-S-H) através das reações de hidratação do silicato tricálcico ( $C_3S$ ) e silicato dicálcico ( $C_2S$ ) presentes no cimento Portland. O silicato de cálcio hidratado não tem composição fixa e é responsável pela resistência do cimento, enquanto o hidróxido de



cálcio influencia na durabilidade da pasta, principalmente sujeita a meios ácidos (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A reatividade de uma pozolana é influenciada principalmente pelo teor de vidro apresentado. A grande maioria das partículas das cinzas volantes são constituídas por esferas sólidas de vidro e a minoria de esferas ocas (MEHTA; MONTEIRO, 2008). As esferas ocas podem estar vazias ou preenchidas com outras esferas menores. Os diâmetros das esferas variam de 1  $\mu\text{m}$  até 100  $\mu\text{m}$ , sendo que a grande maioria das esferas apresentam diâmetro inferior a 20  $\mu\text{m}$ . Para uma cinza volante ser considerada de boa qualidade, ela deve apresentar de 70% a 80% da fase vítrea, apresentando fases cristalinas como quartzo, mulita, hematita e magnetita (ISAIA, 2007).

Segundo Mehta e Monteiro (2008), a mineralogia das cinzas é 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.

De acordo com Andrade (1991), partículas menores de cinza correspondem a uma maior superfície específica, que conduz a um maior número de pontos de contato entre os elementos reativos da mistura gerando um aumento na resistência. Contudo, o controle da finura do material pela superfície só deve ser utilizado em materiais oriundos de uma mesma fonte, pois materiais de outras procedências apresentam diferentes propriedades (massa específica, teor de carbono, distribuição e morfologia das partículas) que afetam o desenvolvimento das reações pozolânicas. Portanto, além da superfície específica deve-se também utilizar granulometria e porcentagem de material passante para correlacionar-se a atividade pozolânica do material.

### **2.2.3 Regulamentação e Legislação ambiental**

Ao contrário de outros países, no Brasil não existe regulamentação para o uso de cinzas oriundas da queima do carvão mineral. Contudo, existem ensaios normalizados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) para avaliação de atividade pozolânica e adição de cinza do carvão mineral ao cimento Portland. De acordo com a NBR 12653 (ABNT, 2014b), as cinzas originadas pela combustão de carvão mineral de usinas termelétricas são classificadas como materiais pozolânicos de classe C.

As exigências e a fiscalização submetidas às usinas termelétricas decorrem da legislação de controle da poluição, que busca controlar a poluição aérea, os resíduos sólidos e a poluição hídrica através dos termos dispostos pelas resoluções do CONAMA.

A Resolução 008 (CONAMA, 1990) estabelece padrões de emissão de gases e material particulado para fontes fixas, cuja combustão seja realizada para a geração e uso de energia térmica, incineradores e gaseificadores.

A Resolução 020 (CONAMA, 1986) estabelece padrões de qualidade de água e padrões de emissão para efluentes líquidos, ou seja, concentrações máximas de poluentes permitidas na água que conduz a cinza pesada das usinas à bacia de sedimentação, e da bacia de sedimentação aos cursos d'água.

#### **2.2.4 Aplicação de resíduos de cinzas na construção civil**

Pesquisas realizadas com cinza volante mostraram que este resíduo possui características pozolânicas vantajosas quando adicionadas ao cimento, garantindo aumento na resistência à compressão, impermeabilidade e durabilidade das estruturas em concreto, além de vantagens econômicas e ambientais.

De acordo com Mehta e Monteiro (2008), cimentos com cinza volante em percentuais de substituição contendo 10, 20 e 30% desenvolvem resistência à compressão um pouco mais lentamente comparada com os cimentos de referência, mas ao longo do tempo, após 90 dias de idade, cimentos contendo cinza volante atingem resistência final superior aos cimentos sem adições.

Netto (2006) verificou que o uso de pozolanas em misturas de concreto e argamassa melhora o desempenho da microestrutura da interface com o agregado, diminui a exsudação devido o efeito microfíler, minimiza ou retarda a reação álcali-agregado e melhora o comportamento ao ataque de sulfatos e cloretos devido à diminuição dos poros da pasta hidratada.

Jaimes, Choi e Abu-Lebdeh (2011) estudaram o comportamento de pavimentos de concreto contendo cinzas volantes e agregados reciclados. Os resultados dessa pesquisa mostraram que a adição de 25% de agregado reciclado e 15% de cinza volante não apresentou diferenças significativas comparado com o concreto de referência.

Os efeitos da concentração de cloreto de sódio e sulfato de magnésio na durabilidade da argamassa contendo cinzas volantes foram estudas por Yildirim e Sümer (2013). Os ataques à base de sulfato causam uma expansão no volume da argamassa como resultado da

reação entre a cal e a reação de sulfato. A cinza volante preenche os espaços vazios da pasta de cimento e cria um gel C-S-H adicional, reduzindo a permeabilidade e a entrada de íons sulfato. Assim, as cinzas volantes fornece proteção contra o ataque de sulfatos em concretos e argamassas.

Karasin e Dogruiyol (2014) investigaram a durabilidade de estruturas de concreto contendo cinza leve. A diferença de redução da resistência em concretos com cinza leve foi de apenas 1% no final de um período de cinco meses de análise experimental. A substituição do cimento Portland por 20% de cinza volante causou uma ligeira diferença nas propriedades relacionadas com a resistência do concreto nas fases iniciais, mas ao longo do tempo a cinza volante ganhou resistência rapidamente.

O efeito de cinzas volantes ultrafinas em argamassas foi estudado por Supit, Shaikh e Sarker (2014). De acordo com a pesquisa realizada, argamassas contendo 8% de cinzas volantes em substituição parcial de cimento, apresentou aumento de 27% na resistência à compressão aos sete dias em comparação com a argamassa de controle. O uso de cinzas volantes contribuiu para que a pasta de cimento ficasse mais densa, o que levou à melhora na resistência à compressão, além de reduzir o volume de poros da argamassa.

Billir, Gencel e Topcu (2015) estudaram o efeito de cinzas volantes como agregado miúdo em argamassas. Observou-se que a substituição de areia por cinzas volantes na proporção de 60-70% não alterou significativamente as propriedades das argamassas. Verificou-se também que o uso de cinzas volantes nas misturas contribuiu na redução da trabalhabilidade, na diminuição do módulo de elasticidade e aumento na capacidade de deformação.

Paula (2016) avaliou o impacto da moagem de cinza volante no aumento da resistência à compressão de misturas contendo cinza volante e cal de carbureto. Foi constatado que a moagem da cinza volante por 2 horas proporcionou ganhos significativos de resistência à compressão simples, principalmente devido ao aumento da superfície específica da cinza, proporcionando uma maior quantidade de silicatos e aluminatos. O acréscimo de 4 horas de moagem não proporcionou ganhos na resistência à compressão, provavelmente devido ao aumento da quantidade de água necessária nas misturas, atribuídas ao aumento das partículas irregulares com o excesso de moagem.

Pesquisa realizada por Rafieizonooz *et al.* (2016) em misturas de concreto contendo cinza de fundo e cinza volante, mostrou que é possível utilizar cinza de fundo como substituto da areia natural. Os resultados indicaram aumento na resistência à flexão em cerca de 5% e aumento na resistência à tração em aproximadamente 24% comparada com o concreto de

referência. Essas misturas de concreto podem ser utilizadas em fundações, sub-bases, passeios e em outros tipos de estruturas, minimizando custos, energia e problemas ambientais.

Yu *et al.* (2017) estudaram o comportamento da argamassa e do concreto estrutural em concentrações elevadas de cinza volante. Os resultados mostraram que uma proporção adequada da mistura, mesmo com 80% do cimento substituído por cinzas volantes, a resistência à compressão do concreto pode atingir mais de 40 MPa nos primeiros 7 dias de idade e mais de 60 MPa aos 28 dias. Comparado com o concreto comercial, o concreto estudado apresentou redução de 70% na emissão de CO<sub>2</sub> e redução de 15% no custo do material.

De acordo com Repette *et al.* (2011), a cinza pesada quando moída apresenta atividade pozolânica, sendo possível utilizá-la também na produção de concretos autoadensáveis.

Segundo Shearer e Kurtis (2015), o potencial de uma cinza para ser utilizado como material suplementar ao cimento está relacionado com as propriedades químicas e físicas das cinzas, e não necessariamente à sua origem (carvão ou co-combustão).

### 2.3 ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO

De acordo com Fiorito (2009, p. 29), “as argamassas são definidas como sendo a mistura de aglomerantes e agregados com água, possuindo capacidade de endurecimento e aderência”.

As argamassas podem ser classificadas com relação a vários critérios, quanto ao tipo de aglomerante, plasticidade e consistência ou quanto à forma de preparo e fornecimento. Segundo Fiorito (2009), a aplicação de uma argamassa é determinada pelo tipo de aglomerante a ser usado na mistura. Por exemplo, a argamassa mista de cimento e cal é utilizada em alvenarias estruturais ou não, em contrapisos, no preparo das paredes e pisos para receberem revestimento cerâmico e aplicado como emboço de paredes. Já as argamassas de cimento são utilizadas nos revestimentos onde são exigidas condições de impermeabilidade, como é o caso de obras hidráulicas e no interior de reservatórios de água.

A classificação das argamassas de acordo com as funções que desempenham associados as suas finalidades e aplicações, está representada de forma resumida na Tabela 4.

Tabela 4 – Classificação das argamassas segundo as suas funções na construção

Função	Tipos
Para construção de alvenarias	Argamassa de assentamento (elevação da alvenaria)
	Argamassa de fixação (ou encunhamento) – alvenaria de vedação
Para revestimento de paredes e tetos	Argamassa de chapisco
	Argamassa de emboço
	Argamassa de reboco
	Argamassa de camada única
	Argamassa para revestimento decorativo monocamada
Para revestimento de pisos	Argamassa de contrapiso
	Argamassa de alta resistência para piso
Para revestimentos cerâmicos (paredes / pisos)	Argamassa de assentamento de peças cerâmicas – colante
	Argamassa de rejuntamento
Para recuperação de estruturas	Argamassa de reparo

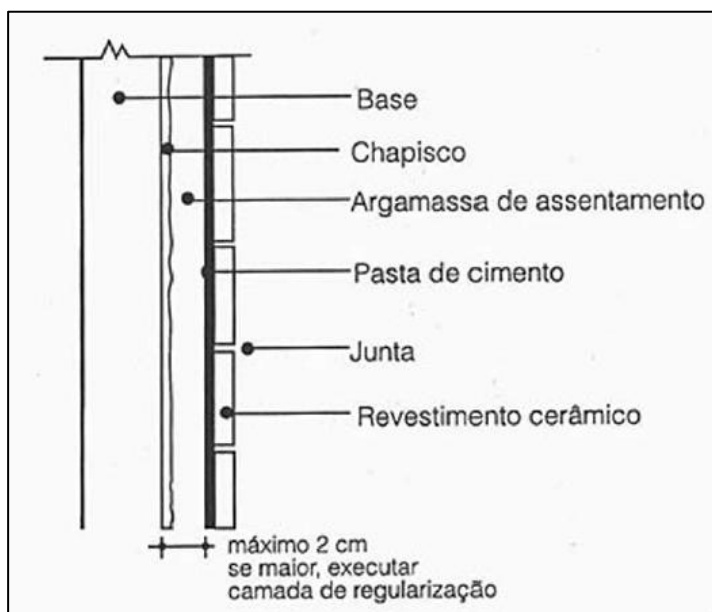
Fonte: Carasek (2010).

A argamassa de revestimento, utilizada para revestir paredes, apresenta algumas funções relacionadas quanto a sua finalidade e aplicação. Essas funções podem ser de: regularizar a superfície servindo como base para acabamentos finais; proteger a edificação contra a ação do intemperismo; servir como isolamento térmico (até 30%), acústico (até 50%), estanqueidade à água (entre 70% a 100%) e resistência ao desgaste superficial (CARASEK, 2010).

De acordo com Carasek (2010, p. 903), “o revestimento de argamassa deve apresentar capacidade de absorver pequenas deformações, para se deformar sem ruptura ou por meio de microfissuras, de maneira a não comprometer a sua aderência, estanqueidade e durabilidade”.

O revestimento de argamassa pode ser constituído por várias camadas, representadas de forma genérica na Figura 4. A base é constituída normalmente por elementos de alvenaria e estrutura de concreto. O substrato pode influenciar na qualidade final do revestimento, principalmente quando não for aplicado chapisco, devido as suas características e texturas (SANTOS, 2008).

Figura 4 - Estrutura do revestimento de paredes



Fonte: Fiorito (2009).

De acordo com a NBR 7200 (ABNT, 1998), as bases de revestimentos devem atender as exigências de planeza, prumo e nivelamento. Quando for composta por diferentes materiais e submetida a esforços que gerem deformações diferenciais consideráveis, como é o caso das platibandas, balanços e últimos pavimentos, utilizar tela metálica ou de outro material na junção destes materiais, criando assim uma zona capaz de suportar essas movimentações. É possível também criar juntas para separar o revestimento aplicado sobre os outros materiais, fazendo com que cada parte se movimente separadamente.

O chapisco é uma camada de preparo da base e tem como objetivo uniformizar a superfície quanto à absorção e melhorar a aderência do revestimento. Já o emboço tem como função cobrir e regularizar a base, permitindo com que a superfície receba outra camada, podendo ser de reboco ou de revestimento decorativo (CARASEK, 2010).

A camada de argamassa de assentamento ou reboco deve ser executada diretamente sobre o chapisco se a base estiver bem aprumada, ou sobre a camada de regularização (emboço). Esta camada permite receber o revestimento decorativo, como por exemplo, a pintura ou ainda constituir o acabamento final (FIORITO, 2009).

A NBR 13749 (ABNT, 2013) especifica quais as espessuras que devem ser executadas para revestimento de argamassa externo e interno de paredes e tetos (Tabela 5).

Tabela 5- Espessuras admissíveis para camada de revestimento de argamassa

Revestimento	Espessura (mm)
Parede interna	$5 \leq e \leq 20$
Parede externa	$20 \leq e \leq 30$
Tetos	$e \leq 20$

Fonte: NBR 13749 (ABNT, 2013).

## 2.4 MATERIAIS COMPONENTES DAS ARGAMASSAS

Segundo a NBR 13281 (ABNT, 2005a), a argamassa é uma mistura homogênea de agregados inorgânicos e água, contendo ou não aditivos ou adições. Apresenta propriedades de aderência e endurecimento, podendo ser dosada em obra ou em instalações próprias, como é o caso das argamassas industrializadas.

### 2.4.1 Cimento Portland

O cimento Portland é composto de clínquer e adições minerais. A flexibilidade da sua composição possibilita a produção de diversos tipos de cimentos com diferentes propriedades químicas e mecânicas. O clínquer é o produto da fusão entre 1400°C a 1500°C das matérias primas usadas na composição do cimento (argila + calcário + óxido de ferro). Existem vários compostos presentes no clínquer como os silicatos de cálcio, aluminato de cálcio e alumino ferritas (BAÍA; SABBATINI, 2000).

De acordo com Guimarães (2002, p. 250),

O cimento Portland, assim como a cal, é um produto de origem mineral. O produto se origina da calcinação de misturas bem proporcionadas de calcário com alto teor em cálcio e baixo em magnésio, e argilas (com ou sem adições de minérios portadores de óxido de ferro). A mistura calcinada – “clínquer”, é moída com uma pequena porcentagem de gipsita (sulfato de cálcio hidratado natural), que modifica suas propriedades, resultando no produto final.

### 2.4.2 Água

De acordo com Silva Júnior (2014, p. 32),

A água é responsável por ativar as reações químicas do aglomerante, e deve atender a certas qualidades, não podendo conter impurezas e ainda estar dentro dos parâmetros recomendados pelas normas técnicas a fim de que garantam a homogeneidade da mistura.

Segundo Guimarães (2002, p. 245), “a água utilizada nas argamassas não pode conter matéria orgânica e colóides em suspensão, e tampouco “resíduo a 180°C” (que reflete sua salinidade), acima dos tolerados pelos índices de potabilidade”.

### 2.4.3 Areia (agregado)

Segundo Guimarães (2002, p. 245), “o agregado ou areia, componente das argamassas, é o material particulado de origem mineral, onde predomina o quartzo, de diâmetros entre 0,06 e 2,0 mm”.

Os agregados influenciam o comportamento da argamassa tanto no seu estado fresco quanto no desempenho do revestimento, além de apresentar cerca de 60% a 80% do consumo dos materiais da argamassa pronta (CARASEK, 2010).

De acordo com Silva Júnior (2014, p. 29),

“Os agregados podem afetar a coesão, consistência e trabalhabilidade, em compósitos cimentícios no estado fresco, e a resistência à compressão, estabilidade dimensional, durabilidade, resistência à abrasão e aspecto visual no estado endurecido”.

Na Tabela 6 podem ser visualizadas as propriedades da argamassa influenciadas de acordo com a granulometria da areia.



Tabela 6 - Características da areia

Propriedades	Características da Areia		
	Quanto menor o módulo de finura	Quanto mais descontínua for a granulometria	Quanto maior o teor de grãos angulosos
Trabalhabilidade	Melhor	Pior	Pior
Retenção de água	Melhor	Variável	Melhor
Elasticidade	Pior	Pior	Pior
Retração na secagem	Aumenta	Aumenta	Variável
Porosidade	Variável	Aumenta	Variável
Aderência	Pior	Pior	Melhor
Resist. Mecânicas	Variável	Pior	Variável
Impermeabilidade	Pior	Pior	Variável

Fonte: Guimarães (2002).

#### 2.4.4 Cal hidratada

Segundo a NBR 7175 (ABNT, 2003a), a cal hidratada é um pó seco obtido pela hidratação adequada da cal virgem, constituído essencialmente pela mistura de hidróxido de magnésio e hidróxido de cálcio, ou da mistura de hidróxido de magnésio, hidróxido de cálcio e óxido de magnésio.

A cal é um aglomerante que endurece devido à reação da carbonatação da cal com o gás carbônico presente no ar, originando o carbonato de cálcio. A cal possui propriedades plastificantes e de retenção de água, proporcionando melhor trabalhabilidade e maior produtividade na execução do revestimento. A cal também influencia em algumas propriedades físico-mecânicas das argamassas no estado endurecido, melhorando a resistência à compressão e a aderência à tração (RAGO; CINCOTTO, 1999).

Segundo Guimarães (2002, p. 265),

As argamassas com cal têm flexibilidade para absorver as pequenas deslocamentos provocadas pelos movimentos de acomodação desiguais da estrutura. [...] elas têm versatilidade para auto-refazer muitas das pequenas fissuras que ocorrem no decorrer do tempo, graças à sua atividade química que só se extingue após muito tempo.

De acordo com Guimarães (2002), a cal quando adicionada à argamassa, aumenta a resistência à penetração de água, garantindo maior durabilidade das construções. A

capacidade de retenção de água das argamassas está relacionada com a quantidade de cal hidratada adicionada a mistura.

## 2.5 PROPRIEDADES DA ARGAMASSA NO ESTADO FRESCO

Para a argamassa no estado plástico, devem ser avaliadas algumas propriedades importantes que interferem na qualidade final da argamassa, que são: a consistência, a trabalhabilidade, a plasticidade, a retenção de água, o teor de ar incorporado, a massa específica e a adesão inicial.

### 2.5.1 Trabalhabilidade

A trabalhabilidade determina a facilidade de manuseamento da argamassa ao ser misturada, transportada e aplicada. É resultante de outras propriedades, como a consistência, a plasticidade, a retenção de água, a exsudação, a densidade e a adesão inicial (CARASEK, 2010).

De acordo com Baía e Sabbatini (2000), uma argamassa pode ser considerada trabalhável quando, ao ser lançada na parede, pode ser distribuída com facilidade, não endurecer e nem aderir na ferramenta de quem esteja manuseando, além de não apresentar segregação ao ser transportada e permanecer plástica durante o tempo da sua aplicação.

### 2.5.2 Consistência e plasticidade

A consistência está associada à capacidade da argamassa deformar-se sob a ação de cargas. É influenciada pela quantidade de água na mistura. Argamassas de consistência mais fluidas apresentam menor tensão de escoamento. Já a plasticidade está relacionada com a capacidade da argamassa manter-se deformada após a redução das tensões de deformação (CARASEK, 2010).

De acordo com Rago e Cincotto (1999), a plasticidade e a consistência são propriedades que efetivamente caracterizam a trabalhabilidade e são influenciadas pelo teor de água, teor de ar incorporado e pelo processo da mistura.

A consistência da argamassa é determinada pela medida do espalhamento de uma porção de argamassa realizada por meio de ensaios de mesa de consistência (Flow Table),

seguindo os princípios da NBR 13276 (ABNT, 2005b). De acordo com Rocha (2014), quanto menor for o diâmetro de espalhamento, mais difícil será da argamassa se deformar.

### 2.5.3 Retenção de água

A retenção de água está associada à capacidade da argamassa manter a sua trabalhabilidade quando sujeita a solicitações que provocam perda de água de amassamento, que pode ser por evaporação e por absorção de água da base, interferindo no processo de acabamento e na retração plástica. A retenção de água também afeta as propriedades da argamassa no estado endurecido, como a aderência, a resistência mecânica e a durabilidade do material. (CARASEK, 2010).

De acordo com ASTM C-270 (ASTM, 2007), a retenção de água das argamassas não deve ser inferior a 75%. A Tabela 7 apresenta a classificação das argamassas por meio da retenção de água segundo a NBR 13281 (ABNT, 2005a).

Tabela 7 – Classificação das argamassas por meio da retenção de água

Classe	Retenção de água (%)
U1	$\leq 78$
U2	72 a 85
U3	80 a 90
U4	86 a 94
U5	91 a 97
U6	95 a 100

Fonte: NBR 13280 (ABNT, 2005a).

Segundo Baía e Sabbatini (2000), a retenção permite que as reações químicas de endurecimento dos aglomerantes ocorram de maneira mais gradativa, proporcionando adequada hidratação do cimento e consequentemente aumento de resistência. A quantidade de água utilizada para garantir a trabalhabilidade na argamassa de revestimento é maior que a necessária para gerar as reações de endurecimento, por isso esse excesso de água pode ser perdida por evaporação ou para a base onde será aplicada a argamassa.

A argamassa que não possuir capacidade adequada de retenção de água apresentará redução na qualidade do revestimento pronto, pois as reações de hidratação do cimento e carbonatação ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) da cal ficarão comprometidas. A retenção de água pela argamassa depende da capacidade de aprisionamento do líquido pelas partículas finas com elevada

atividade de superfície, por isto, a natureza e as características dos materiais utilizados são importantes (BAÍA; SABBATINI, 2000).

A determinação da retenção de água segue o método proposto pela NBR 13277 (ABNT, 2005c), que consiste na medida da massa de água retida pela argamassa após a sucção realizada por meio de uma bomba a vácuo em um funil de filtragem.

#### 2.5.4 Massa específica e teor de ar incorporado

A massa específica ou densidade de massa varia com os materiais constituintes da argamassa e com o teor de ar incorporado, que é a porção de ar contida na argamassa. Quanto menor a massa específica, mais leve será a argamassa, consequentemente, será mais trabalhável a longo prazo (CARASEK, 2010).

Os ensaios para a determinação da massa específica e do teor de ar incorporado nas argamassas no estado fresco foram realizados conforme a NBR 13278 (ABNT, 2005d). A densidade de massa é representada pela relação entre a massa e o volume do material, sendo expressa em  $\text{g/cm}^3$ .

As argamassas podem ser classificadas quanto à massa específica em leve, normal e pesada conforme demonstrado na Tabela 8.

Tabela 8 - Classificação das argamassas quanto à massa específica no estado fresco

Argamassa	Massa Específica $\rho = (\text{g/cm}^3)$	Principais agregados empregados	Usos / observações
Leve	$< 1,40$	Vermiculita, perlita, argila expandida	Isolamento térmico e acústico
Normal	$2,30 \leq \rho \leq 1,40$	Areia de rio (quartzo) e calcário britado	Aplicações convencionais
Pesada	$> 2,30$	Brita (sulfato de bário)	Blindagem de radiação

Fonte: Carasek (2010).

A ASTM C-270 (ASTM, 2007) recomenda que o teor máximo de ar incorporado em argamassas contendo cal seja de 14%. Segundo Canova, Bergamasco e Angelis Neto (2007), para argamassas contendo teor de ar incorporado acima de 16%, ocorre excessiva redução na resistência de aderência à tração dessas argamassas no substrato.

A porosidade de um revestimento em argamassa está relacionada com os materiais da sua composição, modo de aplicação, processo de cura, textura e porosidade da base onde será aplicada. A porosidade interfere diretamente na durabilidade do revestimento, pois contribui no acúmulo de umidade possibilitando o surgimento de fungos. Caso a argamassa seja submetida à molhagem e secagem, os sais dissolvidos cristalizam provocando expansão e consequentemente a fissuração do revestimento. Por isso, o percentual de porosidade da argamassa, o tipo e a distribuição dos poros em sua microestrutura permitem avaliar o desempenho do revestimento (QUARCIONI *et al.*, 2009).

### **2.5.5 Adesão inicial**

A adesão inicial caracteriza-se pela capacidade da argamassa, no estado fresco, unir-se a uma base. Depende das características de trabalhabilidade da argamassa e do substrato onde ela será aplicada. A redução da tensão superficial da pasta propicia um maior contato com os grãos de agregado e com a base, melhorando a adesão. A cal na argamassa contribui para a diminuição da tensão superficial e consequentemente melhora na adesão da argamassa ao substrato (CARASEK, 2010).

## **2.6 PROPRIEDADES DA ARGAMASSA NO ESTADO ENDURECIDO**

Para as argamassas no estado endurecido, a fim de garantir um bom desempenho ao longo da sua vida útil, é importante verificar a resistência mecânica, a durabilidade, a retração, a capacidade de absorver deformações e a aderência ao substrato.

### **2.6.1 Retração**

A retração em argamassas ocorre devido à perda rápida de água de amassamento e pelas reações na hidratação dos aglomerantes, ocasionando as fissuras nos revestimentos. As argamassas ricas em cimento apresentam maior probabilidade para o surgimento de fissuras durante a secagem (SANTOS, 2008).

Segundo Carasek (2010), a retração também é influenciada pelo teor de materiais pulverulentos e pelo teor de água das argamassas. De uma forma geral, quanto maior o teor de finos, maior a retração, pois requer maior quantidade de água de amassamento. A variação do

volume da pasta aglomerante ocasiona perda de desempenho das argamassas aplicadas, especialmente no que diz respeito à durabilidade e estanqueidade.

A retração inicia no estado fresco da argamassa e prossegue após o endurecimento. Por isso, é importante que a secagem da argamassa ocorra lentamente, para que se tenha tempo suficiente em atingir uma resistência à tração necessária para suportar as tensões internas que surgirem. Se o clima estiver seco, quente e com ventos fortes, a evaporação aumenta e conseqüentemente maior será a perda de água da argamassa, ocasionando as fissuras de retração; o mesmo ocorre quando a argamassa é aplicada sobre uma base muito absorvente (CINTRA, 2013).

No caso de revestimentos, as fissuras de retração formam ângulos próximos a 90° entre elas. Quando duas fissuras formarem ângulos muito agudos entre si, pelo menos uma delas não é de retração. É importante salientar que, quanto maior for a espessura do revestimento, maior será a retração esperada. Logo, a retração é responsável pela maioria das patologias encontradas nos revestimentos, pois ocasiona fissuras que possibilitam a entrada de água, provocando o aparecimento de fungos e bolor, além de provocar o deslocamento do revestimento e do acabamento final (CARASEK, 2007).

### **2.6.2 Resistência de aderência à tração**

A aderência é uma propriedade do revestimento em se manter fixo ao substrato, apresentando resistência às tensões normais e tensões tangenciais que surgem na interface base/revestimento. Esta aderência é resultante da resistência de aderência ao cisalhamento, da aderência à tração e da extensão de aderência da argamassa. (MACIEL; BARROS; SABBATINI, 1998).

Segundo definição da NBR 13528 (ABNT, 2010), a resistência de aderência à tração consiste na tensão máxima suportada por uma área limitada de revestimento, na interface de avaliação, quando submetido a um esforço normal de tração.

De acordo com Carasek (2010), a aderência está diretamente relacionada com a trabalhabilidade da argamassa, com a energia de impacto no processo de execução, além das características e propriedades do substrato e de fatores externos. Argamassas contendo elevado teor de cimento apresentam alta resistência de aderência, mas podem ser menos duráveis por possuir maior tendência ao desenvolvimento de fissuras. Por outro lado, argamassas contendo cal possuem maior extensão de aderência, pois preenchem mais

facilmente e de maneira mais completa toda a superfície do substrato. Por isso, para garantir uma boa aderência, procura-se utilizar argamassas mistas de cimento e cal.

A aderência da argamassa endurecida ao substrato é um fenômeno mecânico, devido, principalmente, à penetração da pasta aglomerante ou da própria argamassa nos poros ou entre a rugosidade do substrato. Também é relevante, para a aderência das argamassas, as ligações secundárias do tipo Van der Waals, pois a argamassa no estado plástico entra em contato com a superfície do substrato e parte da água de amassamento penetra pelos poros e cavidades do substrato, onde ocorrem fenômenos de precipitação dos produtos de hidratação do cimento e da cal. Após algum tempo, esses precipitados intracapilares exercem ação de ancoragem da argamassa à base (SCARTEZINI *et al.*, 2002).

A avaliação de resistência de aderência à tração de revestimentos de argamassa, conhecida também como resistência ao arrancamento, segue os princípios da NBR 13528 (ABNT, 2010), permitindo a análise tanto em laboratório como em obra.

Os limites estabelecidos para a resistência de aderência à tração em paredes e teto estão apresentados na Tabela 9 e são determinados pela NBR 13749 (ABNT, 2013). Os requisitos para a classificação das argamassas por meio da resistência de aderência à tração segue a exigência da NBR 13281 (ABNT, 2005a) descrito na Tabela 10.

Tabela 9 – Limites de resistência de aderência à tração

Local	Acabamento	Ra (MPa)
Parede interna	Pintura ou base para reboco	$\geq 0,20$
	Cerâmica ou laminado	$\geq 0,30$
Parede externa	Pintura ou base para reboco	$\geq 0,30$
	Cerâmica	$\geq 0,30$
Teto		$\geq 0,20$

Fonte: NBR 13749 (ABNT, 2013).

Tabela 10 – Classificação das argamassas por meio da resistência de aderência à tração

Classe	Resistência potencial de aderência à tração (MPa)
A1	$< 0,20$
A2	$\geq 0,20$
A3	$\geq 0,30$

Fonte: NBR 13281 (ABNT, 2005a).

### 2.6.3 Capacidade de absorver pequenas deformações

Segundo Carasek (2010), o revestimento de argamassa deve apresentar capacidade de absorver pequenas deformações de modo a não comprometer a sua aderência, estanqueidade e durabilidade. Esta propriedade da argamassa está associada ao módulo de elasticidade e à resistência mecânica das argamassas, podendo influenciar na fissuração e na aderência dos revestimentos. A resistência mecânica e a capacidade de absorver deformações são inversamente proporcionais, pois a deformabilidade do material para um mesmo carregamento é tanto menor quanto maior for a sua capacidade de resistência.

É de suma importância avaliar a capacidade de deformação da argamassa destinada ao revestimento ou assentamento de componentes de alvenaria. Em todos os casos, a argamassa não se deforma livremente, pois está sujeita às restrições devido às tensões decorrentes da aderência à base em que se encontra aplicada. Caso sua capacidade de deformação não seja compatível ao nível de tensões gerado, a argamassa na forma de revestimento ou junta de assentamento será rompida, podendo ocorrer prejuízos à sua funcionalidade (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

De acordo com Almeida (2012), o módulo de elasticidade é um parâmetro mecânico que proporciona a medida da rigidez de um material e está associado com as propriedades mecânicas, como tensão de escoamento (em metais), tensão de ruptura, temperatura de propagação de trincas etc. É uma propriedade intrínseca dos materiais e depende da composição química, microestrutura e defeitos (poros e trincas). O módulo de elasticidade pode ser considerado como a relação entre a tensão aplicada sobre o concreto ou argamassa e a sua capacidade de suportar as deformações. Quanto maior o valor do módulo de elasticidade, menor a sua deformação e maior a sua capacidade de suportar cargas sem deformações definitivas.

Geralmente a determinação do módulo de elasticidade do concreto é dada pela declividade da curva tensão-deformação sob carga uniaxial, cuja curva para o concreto é não linear. O módulo de deformação do concreto ou argamassa pode ser do tipo dinâmico ou estático. O módulo de elasticidade estático é determinado para uma certa velocidade de carregamento previamente estabelecida, podendo ser de três tipos: módulo tangente na origem; módulo tangente em um ponto especificado, dentro do limite elástico; e módulo secante entre dois pontos da curva, que corresponde uma linha traçada da origem até um ponto da curva que corresponde à tensão de 40% da carga de ruptura. O módulo de elasticidade dinâmico corresponde a uma deformação instantânea muito pequena e equivale



aproximadamente ao módulo tangente na origem, podendo ser obtido por ensaio de ultra-som (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

#### 2.6.4 Resistência à tração na flexão e à compressão

A resistência mecânica das argamassas diz respeito à propriedade dos revestimentos de possuírem um estado de consolidação interna capaz de suportar esforços mecânicos de diversas origens, que são as tensões simultâneas de tração, compressão e cisalhamento (CARASEK, 2010).

A resistência mecânica pode variar dependendo das diferentes solicitações em que a argamassa está submetida. A argamassa deve ter resistência para suportar as movimentações da base, que podem aparecer por diversos motivos, como recalques, variação dimensional por ciclos de umedecimento e secagem, ou ainda, pela dilatação e contração do revestimento devido às variações de temperatura. Estas solicitações podem provocar fissuras ou falha na aderência entre a argamassa e a base, que devem ser combatidas pela resistência mecânica das argamassas (TRISTÃO, 1995).

Os requisitos mecânicos e reológicos das argamassas devem seguir as exigências da NBR 13281 (ABNT, 2005a) descritos na Tabela 11. Segundo a ASTM C 270 (ASTM, 2007), para as argamassas que contém cal em sua composição devem apresentar resistência média à compressão superior a 2,40 MPa.

Tabela 11 - Exigências mecânicas e reológicas para argamassas

Características	Identificação	Limites
Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	I	$\geq 0,1$ e $< 4,0$
	II	$\geq 4,1$ e $\leq 8,0$
	III	$> 8,0$
Capacidade de retenção de água (%)	Normal	$\geq 80$ e $\leq 90$
	Alta	$> 90$
Teor de ar incorporado (%)	A	$< 8$
	B	$\geq 8$ e $\leq 18$
	C	$> 18$

Fonte: NBR 13281 (ABNT, 2005a).

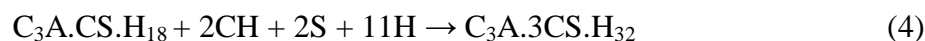
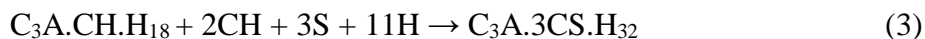
O traço das argamassas influencia na resistência mecânica, de tal forma que a resistência à tração e à compressão evolui com limitadas adições de cal. Porém, quando esse volume cresce significativamente, a resistência à compressão e o módulo de elasticidade decresce. Quanto maior o teor de cimento, maior será a resistência à compressão, tração e rigidez, e, quanto maior a relação água/cimento, menor será a resistência à compressão e à tração das argamassas convencionais mistas de cimento, cal e areia (QUARCIONI; CINCOTTO, 2005).

### 2.6.5 Durabilidade ao ataque por sulfatos

A deterioração do concreto e das argamassas pode ocorrer devido à presença de sais solúveis encontrados na atmosfera (em ambientes marítimos), no terreno (arrastados pela água), nos próprios materiais de construção (areia, brita, tijolos cerâmicos, aglomerantes), em produtos armazenados na construção (pesticidas, produtos alimentares salgados, dejetos de animais) ou ter origem na poluição atmosférica. Os sais, geralmente nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ), cloretos ( $\text{Cl}^-$ ) e sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) são dissolvidos e transportados pela água que circula no interior dos elementos construtivos (GONÇALVES, 1998 apud RODRIGUES, 2004).

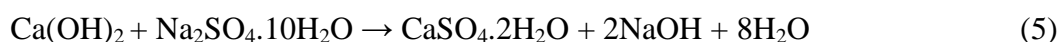
O ataque por sulfato pode se manifestar na forma de expansão e fissuração. Quando o concreto fissura, aumenta a sua permeabilidade, facilitando a entrada da água agressiva em seu interior, o que faz acelerar o processo de deterioração. O ataque por sulfato também pode se manifestar na diminuição progressiva de resistência e perda de massa decorrente da perda de coesão na pasta de cimento hidratada e da perda da adesão entre ela e as partículas de agregado (MEHTA; MONTEIRO, 2014). O concreto atacado por sulfatos tem como característica aparência esbranquiçada. Normalmente, os danos iniciam pelas bordas e cantos; posteriormente ocorre fissuração progressiva e lascamento, resultando em um concreto friável e mole (NEVILLE, 2016).

Segundo Mehta e Monteiro (2014), o hidróxido de cálcio e as fases presentes no cimento Portland hidratado que contém alumina são mais vulneráveis ao ataque por íons sulfato. Se o teor de aluminato tricálcico ( $\text{C}_3\text{A}$ ) do cimento for maior do que 5%, os produtos de hidratação irão conter a maior parte da alumina sob a forma de monossulfato hidratado ( $\text{C}_3\text{A}.\text{CS}.\text{H}_{18}$ ). Caso o cimento apresentar  $\text{C}_3\text{A}$  superior a 8%, os produtos de hidratação também irão conter  $\text{C}_3\text{A}.\text{CH}.\text{H}_{18}$ . Quando o hidróxido de cálcio da pasta de cimento hidratada entrar em contato com os íons sulfato, os hidratados que contêm alumina se transformam em etringita ( $\text{C}_3\text{A}.\text{3CS}.\text{H}_{32}$ ) como mostra as Equações 3 e 4.



O efeito de expansão no concreto causado pela formação de etringita pode ser consequência da pressão exercida pelo crescimento dos cristais ou pela adsorção de água em meio alcalino. A expansão também pode ocorrer devido à formação de gipsita como resultado das reações de troca catiônica. A deterioração da pasta de cimento endurecida pela formação de gipsita ( $\text{CaSO}_4.2\text{H}_2\text{O}$ ) ocorre devido a redução do pH do sistema e perda de rigidez e da resistência, seguida pela expansão e fissuração e, finalmente, pela transformação do concreto em uma massa pastosa e não-coesiva (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

De acordo com Neville (2016), o sulfato de sódio ataca ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) na pasta de cimento hidratada, formando sulfato de cálcio di-hidratado (gipsita) como mostra a Equação 5.



Quando ocorre ataque por sulfato de sódio, a formação de hidróxido de sódio como subproduto da reação preserva a alta alcalinidade no sistema, que é fundamental para a estabilidade do produto da hidratação, C-S-H (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A formação de etringita tardia no concreto ocorre quando a fonte de íons sulfato é interna ao concreto ao invés de externa. Esse fenômeno acontece quando o concreto for produzido com cimento contendo alto teor de sulfato ou quando o agregado estiver contaminado com gipsita (MEHTA; MONTEIRO, 2014). A formação de etringita que ocorre no concreto maduro tende a ser prejudicial e destruidora. A reação química que ocorre resulta na formação de  $3\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3.3\text{CaSO}_4.32\text{H}_2\text{O}$ .

O ataque por sulfatos é uma preocupação importante para a durabilidade do concreto e das argamassas. A adição de pozolanas, como a cinza volante, melhora a resistência ao sulfato. Elas são usadas para consumir quimicamente o hidróxido de cálcio do sistema do cimento hidratado, originando produtos de reação menos vulneráveis ao ataque de sulfatos (BARGER *et al.*, 2001).

A resistência do concreto e argamassa ao ataque por sulfatos pode ser analisada em laboratório colocando corpos de prova em solução de sulfato de sódio ou de magnésio. Ciclos de molhagem e secagem aceleram os danos ocasionados pela cristalização dos sais nos poros

do material. Os efeitos da exposição podem ser estimados pelas alterações do módulo de elasticidade dinâmico, pela perda de massa, expansão, pela diminuição da resistência do corpo de prova e até visualmente (NEVILLE, 2016).

## 2.7 PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS E ANÁLISE DA VARIÂNCIA

O Planejamento Experimental (Design of Experiments, DOE) consiste em uma técnica utilizada para planejar e analisar experimentos. Através dela é possível definir quais dados devem ser coletados durante o experimento, em que quantidades e em que condições, buscando satisfazer dois grandes objetivos: a maior precisão estatística na variável resposta e o menor custo (SAYURI; ROZENFELD, 2014).

Segundo Montgomery (2009), na estatística experimental, o planejamento de experimentos estatísticos refere-se ao processo de realizar um experimento, de tal forma que, os dados obtidos possam ser analisados por meio de métodos estatísticos com conclusões válidas.

Para assegurar que as análises estatísticas sejam válidas, o planejamento de experimentos deve seguir três princípios básicos: a replicagem, a aleatoriedade e a blocagem. Experimentos com réplicas permitem a obtenção do erro experimental e de estimativas mais precisas do efeito analisado. A blocagem tem como objetivo aumentar a precisão de um experimento, usada, como por exemplo, quando a medição experimental for realizada por pessoas diferentes. Os experimentos realizados de forma aleatória garantem a distribuição ponderada de todos os fatores não considerados (MONTGOMERY, 2009).

Quando se deseja estudar o efeito de duas ou mais variáveis de influência em um determinado experimento, o uso do planejamento 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 existe interação entre eles (BUTTON, 2005).

Segundo Devore (2006), a análise da variância ou ANOVA constitui de um procedimento estatístico adequado para a avaliação de respostas quantitativas em experimentos planejados. A análise da variância é utilizada para aceitar ou rejeitar as hipóteses investigadas de um experimento, cujo objetivo é analisar a variação média dos resultados dos testes e demonstrar quais são os fatores que realmente produzem efeitos significativos nas respostas de um determinado experimento.

Nesta pesquisa, os resultados obtidos nos ensaios para a resistência à compressão das argamassas foram submetidos a testes estatísticos para verificar a influência dos fatores borracha e cinza volante sobre a variável resposta. Assim, para este estudo, foi considerado um experimento fatorial com dois fatores (borracha e cinza volante) com três níveis diferentes para cada fator e, também, foi considerado outro experimento fatorial com apenas dois níveis.

Para a análise de variância em projetos fatoriais com dois fatores, segundo Montgomery e Runger (2012), as observações podem ser descritas por meio de um modelo estatístico linear, representado pela Equação 6:

$$y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad (6)$$

$$(i = 1, \dots, a; j = 1, \dots, b; k = 1, \dots, n)$$

onde,  $y$  corresponde ao valor observado para a resposta quando o fator A está no  $i$ -ésimo nível e o fator B no  $j$ -ésimo nível, para uma  $k$ -ésima replica;  $\mu$  corresponde ao efeito da média global;  $\alpha_i$  corresponde ao efeito do  $i$ -ésimo nível do fator A;  $\beta_j$  corresponde ao efeito do  $j$ -ésimo nível do fator B;  $(\alpha\beta)_{ij}$  corresponde ao efeito da interação entre  $\alpha_i$  e  $\beta_j$ ;  $\varepsilon_{ijk}$  representa o erro aleatório.

A análise de variância (ANOVA) testa a importância de um ou mais fatores comparando as médias da variável resposta em diferentes níveis. A hipótese nula parte do princípio que não existe nenhuma diferença significativa entre os fatores analisados e será sempre a hipótese testada no experimento. A hipótese alternativa parte do princípio que pelo menos uma média dos níveis dos fatores é diferente e será considerada verdadeira caso a hipótese nula seja considerada falsa (MONTGOMERY; RUNGER, 2012). Assim, o teste de hipóteses para o efeito dos fatores A e B e a interação entre eles podem ser definidos de acordo com as Equações 7, 8 e 9 respectivamente:

$$H_0: \alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_a = 0$$

$$H_1: \alpha_i \neq 0 \text{ para pelo menos um } i \quad (7)$$

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_b = 0$$

$$H_1: \beta_j \neq 0 \text{ para pelo menos um } j \quad (8)$$

$$\begin{aligned}
H_0: (\alpha\beta)_{ij} &= 0 \\
H_1: (\alpha\beta)_{ij} &\neq 0 \text{ para pelo menos um } ij
\end{aligned}
\tag{9}$$

onde,  $H_0$  é a hipótese nula e  $H_1$  é a hipótese alternativa.

De acordo com Montgomery e Runger (2012), a ANOVA testa essas hipóteses pela decomposição da variabilidade total dos dados em partes componentes, comparando os vários elementos dessa decomposição. A variabilidade é medida através da soma total dos quadrados. Os cálculos realizados são geralmente mostrados em uma tabela de análise de variância, representado na Tabela 12.

Tabela 12 – Tabela ANOVA para projeto fatorial com dois fatores

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Grau de Liberdade	Média Quadrática	$F_0$
Tratamento A	$SQ_A$	$a - 1$	$MQ_A = \frac{SQ_A}{a - 1}$	$\frac{MQ_A}{MQ_E}$
Tratamento B	$SQ_B$	$b - 1$	$MQ_B = \frac{SQ_B}{b - 1}$	$\frac{MQ_B}{MQ_E}$
Interação	$SQ_{AB}$	$(a - 1)(b - 1)$	$MQ_{AB} = \frac{SQ_{AB}}{(a - 1)(b - 1)}$	$\frac{MQ_{AB}}{MQ_E}$
Erro	$SQ_E$	$ab(n - 1)$		
Total	$SQ_T$	$abn - 1$	$MQ_E = \frac{SQ_E}{ab(n - 1)}$	

Fonte: Montgomery e Runger (2012).

De acordo com Montgomery e Runger (2012) e Devore (2006), o efeito de um determinado fator ou da interação entre os fatores sobre a variável resposta analisada é estabelecido pela comparação entre os valores calculados ( $F$  calculado) e os tabelados ( $F$  tabelado) de uma função de distribuição de probabilidade. Os valores  $F$  tabelados são estabelecidos para um determinado nível de significância ( $\alpha$ ). Este nível de significância consiste na probabilidade de estar cometendo o erro tipo I, ou seja, a probabilidade de cometer um erro ao rejeitar a hipótese nula quando ela for verdadeira. A hipótese que um determinado fator influencia significativamente nos resultados é confirmada se o  $F$  calculado for maior do que o  $F$  tabelado. Essa significância também pode ser analisada através do  $p$ -valor, conhecida como probabilidade de significância, que determina a probabilidade de que a estatística do teste apresente valor extremo em relação ao valor observado quando a hipótese nula for

verdadeira, ou seja, o p-valor descreve a probabilidade em se obter o resultado observado se a hipótese nula for verdadeira. Ao adotar um nível de significância nas análises de 5%, 10% ou 20%, fica estabelecido que, se o p-valor calculado for menor que o adotado, o determinado fator ou a interação dos fatores exerce influência significativa sobre a variável resposta analisada.

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 resposta. O modelo utilizado para a análise de variância nesta pesquisa considerou como base um modelo de regressão linear múltipla conforme a Equação 10 (MONTGOMERY; RUNGER, 2012).

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n + \varepsilon \quad (10)$$

onde, y é a variável dependente (variável resposta do experimento);  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_n$  são as variáveis independentes;  $\beta_0$  é a interseção do plano;  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ ,  $\beta_n$  são os coeficientes de regressão;  $\varepsilon$  é o erro aleatório.

Os modelos que incluem termos quadráticos e de interação, segundo Montgomery e Runger (2012), podem produzir uma função formando uma curvatura chamado modelo de segunda ordem (Equação 11). Dependendo dos valores dos coeficientes de regressão, o modelo de segunda ordem com interação considera uma ampla variedade de formas.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_n x_1^2 + \beta_n x_2^2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \dots + \varepsilon \quad (11)$$

Esse modelo de regressão linear múltipla é utilizado como uma função aproximadora, ou seja, a verdadeira relação entre y e  $x_1$ ,  $x_2$ ,... $x_n$  é desconhecida, porém, dentro de certos limites das variáveis independentes, o modelo de regressão linear é uma aproximação adequada. Após a escolha das variáveis consideradas importantes para o modelo, é necessária a verificação das variáveis independentes com relação a variável dependente. Para isso, são realizados testes estatísticos em relação aos parâmetros do modelo para comprovar a sua

adequação. Para tais testes são necessárias fazer as seguintes suposições: os erros são distribuídos independentemente e seguem uma distribuição normal com média zero e variância  $\sigma^2$  (MONTGOMERY; RUNGER, 2012).

Além dos testes de hipóteses, existem medidas de qualidade de ajustamento comparando modelos formados pela variável resposta relacionada a diferentes subconjuntos de variáveis regressoras. Uma dessas medidas é o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) onde explica que o percentual de variação da variável dependente é justificado pela variável independente, ou seja, é a quantidade da variabilidade nos dados explicada pela equação da regressão obtida (MONTGOMERY; RUNGER, 2012).

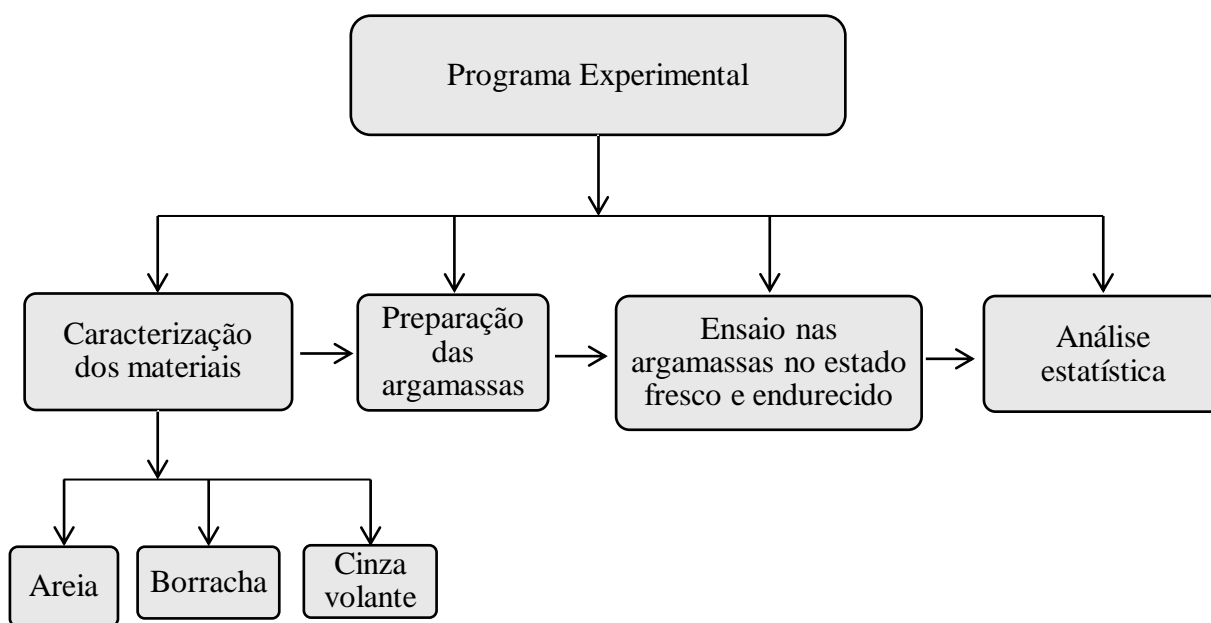
De acordo com Devore (2006) e Montgomery e Runger (2012), a qualidade de ajustamento e confiabilidade dos testes estatísticos realizados para verificar a significância dos parâmetros do modelo têm uma forte relação com os resíduos (diferença entre os valores experimentais e os preditos). Logo, a análise de resíduos desenvolve um papel importante no julgamento do ajuste do modelo. Para isso, os resíduos podem ser analisados graficamente em relação a sua normalidade e aleatoriedade. A distribuição dos resíduos será considerada normal quando os pontos apresentados no gráfico estiverem em torno de uma linha reta, ou seja, quanto mais próximo os pontos estiverem de uma linha reta, maior a confirmação da suposição de normalidade. A aleatoriedade dos resíduos será considerada quando os valores apresentados nos gráficos estiverem distribuídos aleatoriamente, não apresentando nenhum tipo de tendência aparente.



### 3 METODOLOGIA

A metodologia utilizada na parte experimental desta pesquisa compreende as etapas conforme fluxograma da Figura 5. Na apresentação de cada etapa, as atividades executadas são descritas de forma mais detalhada neste capítulo.

Figura 5 – Fluxograma resumido para o planejamento experimental



Fonte: Elaborado pela autora (2016).

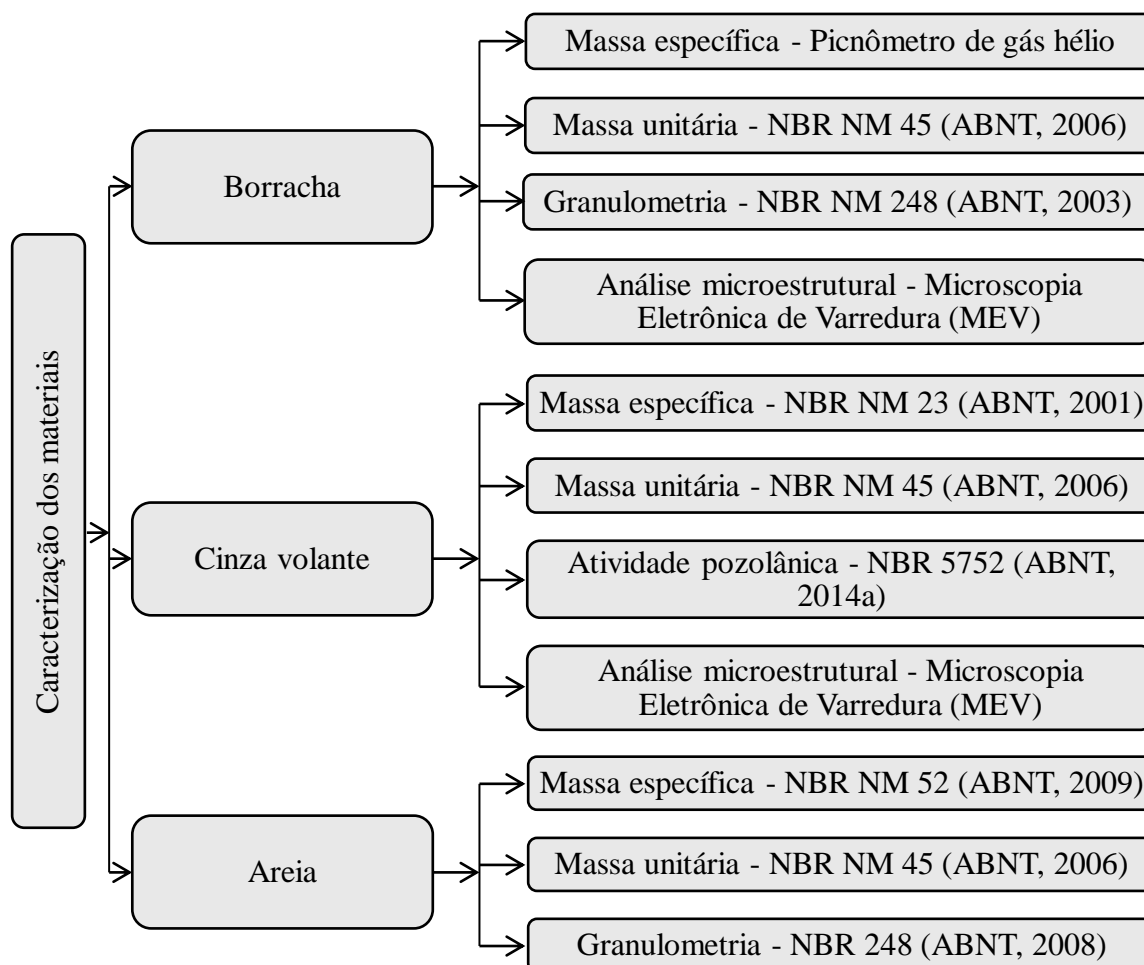
Os ensaios, tanto de caracterização dos materiais quanto das argamassas, foram realizados no Laboratório de Materiais da Construção Civil e no Laboratório da Engenharia Mecânica da Universidade do Estado de Santa Catarina – UDESC, Joinville.

Os materiais e métodos aplicados foram selecionados de modo a atender a normatização técnica brasileira referente a cada uma das características e metodologias de ensaios exigidas.

O procedimento experimental utilizado na caracterização do agregado miúdo, dos resíduos de borracha de pneus inservíveis e da cinza volante está representado no fluxograma da Figura 6.

Para atingir os objetivos propostos neste trabalho, foram moldados 12 corpos de prova para cada amostra estudada. A quantidade de corpos de prova para atender todos os ensaios foi determinada por meio de indicação das normas técnicas.

Figura 6 – Fluxograma para a etapa de caracterização da borracha, cinza volante e areia

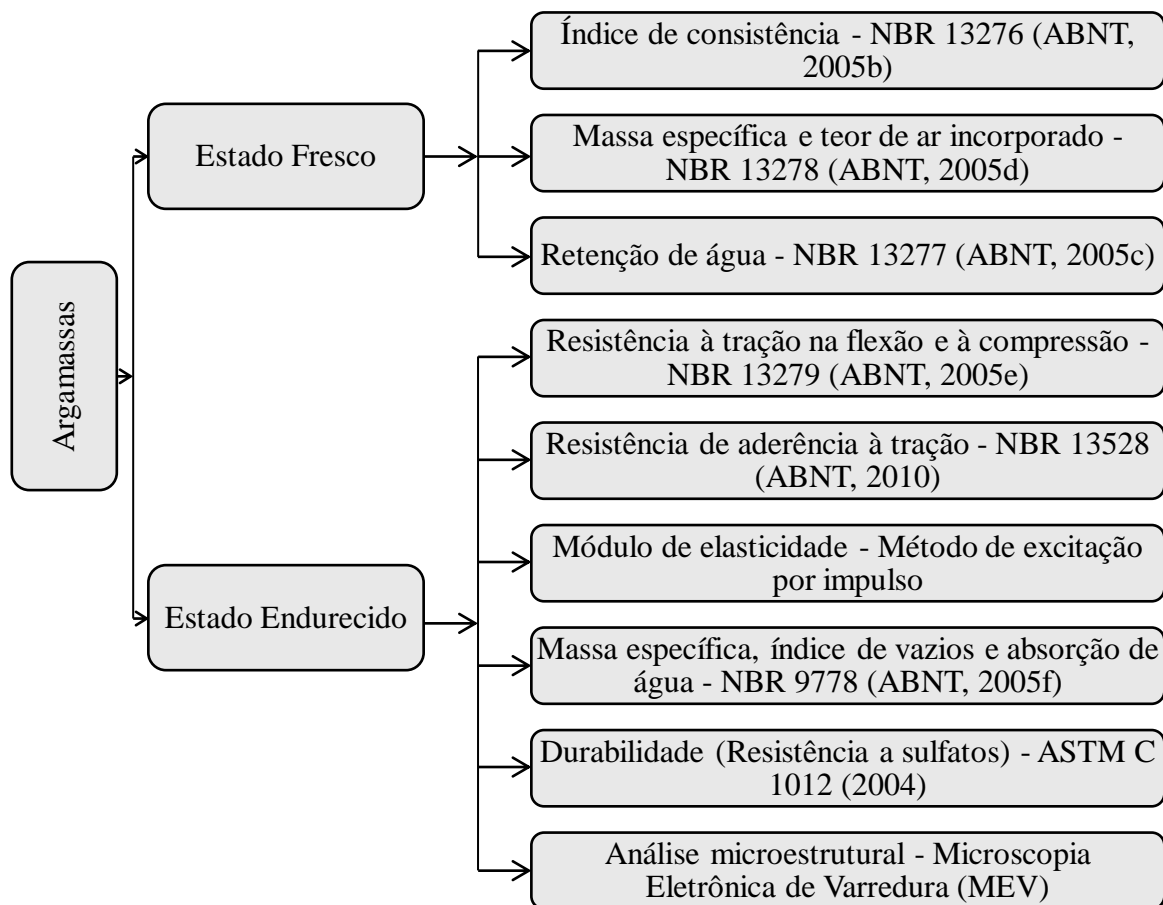


Fonte: Elaborado pela autora (2016).

A argamassa de referência foi produzida com cimento, cal e areia no traço 1:1:6 (em volume). As argamassas contendo borracha tiveram 5% e 10% da massa do agregado miúdo substituído pelo resíduo e, 10% e 20% de cinza volante adicionada na mistura em relação ao volume de cimento. Esses valores foram determinados de acordo com a literatura.

Os ensaios realizados nas argamassas, tanto no estado fresco como no estado endurecido, estão descritos no fluxograma representado pela Figura 7. Esses ensaios tiveram como finalidade, investigar o comportamento mecânico das argamassas produzidas, além da sua aplicação como argamassa de revestimento através do ensaio de resistência de aderência à tração.

Figura 7 – Fluxograma para a etapa dos ensaios nas argamassas no estado fresco e endurecido



Fonte: Elaborado pela autora (2016).

### 3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

Os materiais constituintes da argamassa influenciam nas suas propriedades finais, devido à sua forma e granulometria, e também devido as suas características químicas, físicas e mecânicas (LEAL, 2012).

Os materiais utilizados para a execução das argamassas foram: areia fina de rio (quartzo), cimento Portland CP II Z-32, cal hidratada do tipo CH-III e água. Estes componentes foram utilizados na argamassa de referência e tiveram como adição pó de borracha de pneus e cinza volante.

### **3.1.1 Cimento Portland CP II Z-32**

Este tipo de cimento foi escolhido por ser largamente utilizado na construção civil e por apresentar diversas possibilidades de aplicação, onde não é exigida nenhuma propriedade especial da argamassa ou do concreto.

O CP II Z-32 é composto por pozolana, cuja resistência a ser atingida aos 28 dias é de 32 MPa. Suas propriedades atendem desde estruturas de concreto até argamassas de revestimento e assentamento. Este tipo de cimento apresenta tamanho de partículas menor que 41  $\mu\text{m}$  e possui em sua composição de 6 a 15% de pozolana (VOTORAN, 2016).

### **3.1.2 Agregado miúdo**

Foi utilizado areia fina lavada de rio (quartzo) como agregado miúdo, devido ao seu grande uso em obras para a produção de argamassas.

### **3.1.3 Cal hidratada**

Foi escolhida a cal hidratada do tipo CH-III por ser um produto bastante utilizado na construção civil, devido à garantia de se obter um produto com boa e completa hidratação.

A cal do tipo CH-III é constituída basicamente por uma mistura de hidróxido de cálcio, hidróxido de magnésio e óxido de magnésio, com teor de gás carbônico igual ou menor que 13% (CAL CEM, 2016).

### **3.1.4 Água**

A água utilizada foi fornecida pela concessionária local, com pH entre 6,3 e 6,8, segundo a Companhia Águas de Joinville.

### **3.1.5 Resíduo de borracha de pneus**

O resíduo de borracha de pneus (Figura 8) foi obtido pelo processo de trituração de pneus inservíveis, fornecido pela empresa Engisul Borrachas Ltda. A borracha utilizada nesta pesquisa não passou por nenhum tipo de tratamento anterior à sua incorporação na argamassa.

Esta opção foi considerada com base em estudos que propuseram minimizar os custos e simplificar os métodos.

Figura 8 - Pó de borracha de pneus inservíveis

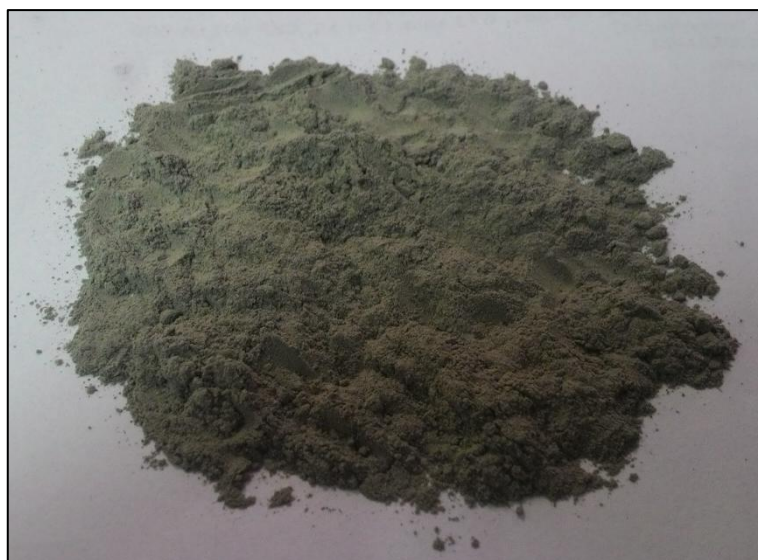


Fonte: Elaborado pela autora (2016).

### 3.1.6 Cinza volante

A cinza volante (Figura 9) consiste em um resíduo (cinza leve) proveniente de usinas termoeletricas que utilizam carvão mineral como combustível e foi fornecida pela Termelétrica Jorge Lacerda.

Figura 9 - Cinza volante



Fonte: Elaborado pela autora (2016).

### 3.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

A seguir, são descritos os métodos de ensaio para a determinação das características dos resíduos e do agregado miúdo utilizados na produção da argamassa.

#### 3.2.1 Determinação da composição granulométrica

A análise granulométrica do agregado miúdo é definida pelo ensaio de peneiramento segundo a NBR NM 248 (ABNT, 2003). O procedimento experimental determina o diâmetro máximo do agregado miúdo, o módulo de finura e a curva granulométrica.

Para a realização do ensaio, foi utilizado um conjunto de peneiras de série normal com abertura de malhas de 0,15 mm, 0,30 mm, 0,60 mm, 1,18mm, 2,36 mm e 4,75 mm.

Foram analisadas duas amostras para o agregado miúdo seco em estufa. Para cada amostra foi pesado 300g de areia em balança de precisão. As peneiras, previamente limpas, foram encaixadas de modo a formar um conjunto de peneiras, com abertura de malha em ordem crescente da base para o topo.

O peneiramento foi realizado manualmente de forma que, após um minuto de peneiramento contínuo, não passasse mais quantidade significativa de material em cada peneira. Todo material retido no fundo e em cada peneira foi então separado e pesado.

O diâmetro máximo do agregado foi determinado através da abertura da peneira onde a porcentagem da massa retida acumulada foi menor ou igual a 5% e o módulo de finura foi determinado pelo somatório das massas retidas acumuladas nas peneiras da série normal. Assim, quanto maior o módulo de finura, maior o tamanho das partículas do agregado. A NBR NM 248 (ABNT, 2003) classifica os agregados miúdos segundo a Tabela 13.

Tabela 13- Classificação dos agregados miúdos segundo o módulo de finura

Agregado	Módulo de finura
Muito Grosso	$MF \geq 3,90$
Grosso	$3,3 \leq MF < 3,90$
Médio	$2,4 \leq MF < 3,30$
Fino	$MF < 2,40$

Fonte: NBR NM 248 (ABNT, 2003).

Através da curva granulométrica é possível verificar se a granulometria da amostra encontra-se dentro dos limites da zona utilizável. A Tabela 14 mostra a relação do módulo de finura com a zona utilizável da curva granulométrica.

Tabela 14 - Classificação do agregado miúdo segundo a curva granulométrica

Agregado Miúdo	Módulo de finura
Zona utilizável inferior	$1,55 \leq MF < 2,20$
Zona ótima	$2,20 \leq MF < 2,90$
Zona utilizável superior	$2,90 \leq MF < 3,50$

Fonte: NBR NM 248 (ABNT, 2003).

### 3.2.2 Determinação da massa específica e massa específica aparente

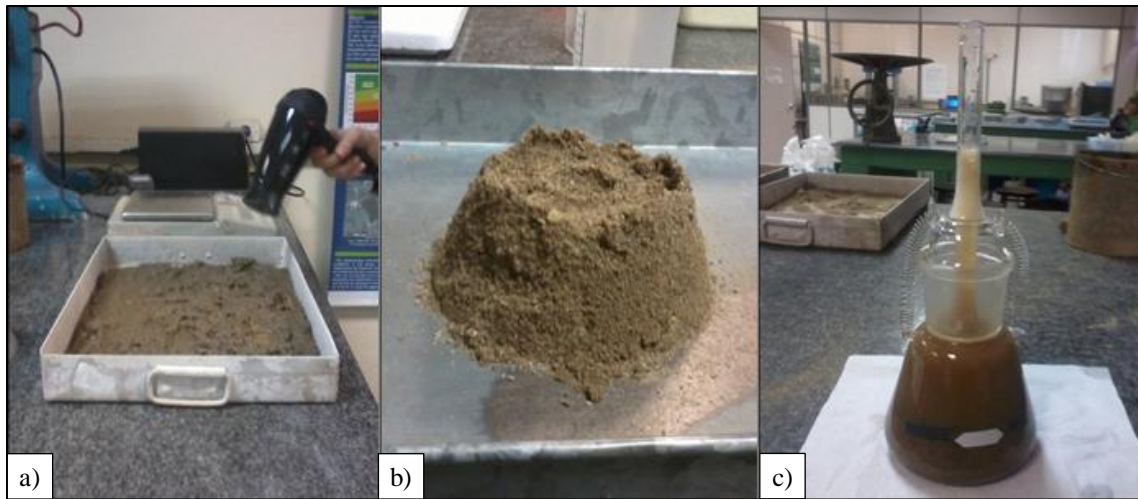
A NBR NM 52 (ABNT, 2009) padroniza o método para a determinação da massa específica do agregado miúdo. Para a realização deste ensaio, foi necessário que a amostra de agregado miúdo ficasse em repouso por 24 horas submerso em água. Após 24 horas de imersão da amostra, o excesso de água foi retirado e o agregado saturado estendido em uma superfície plana. Iniciou-se então o processo de secagem do material através da ação de uma corrente de ar até que os grãos de areia não estivessem muito aderidos entre si.

Para a determinação da massa específica é necessário que o agregado miúdo esteja na condição saturada superfície seca. Para isso, um molde tronco-cônico foi preenchido com a amostra em uma superfície plana e compactado com 25 golpes distribuídos uniformemente sobre a superfície livre do agregado. Ao retirar o molde, a amostra desmoronou parcialmente, assim, o agregado encontrava-se na condição ideal para o ensaio. Caso a amostra conservasse a forma do molde, teria umidade superficial no agregado, logo, deveria continuar a secagem. Se a amostra desmoronasse ao retirar o molde, o agregado estaria muito seco, então, deveria adicionar uma pequena quantidade de água ao agregado e deixá-lo em um recipiente tampado por 30 minutos e iniciar o processo de secagem.

Quando a condição saturada superfície seca do agregado foi atingida, 500g do material foi transferido para o frasco calibrado (picnômetro) e registrado a massa de todo o conjunto (frasco + areia + mola). O frasco foi então preenchido com água até a marca de 500 ml e foram realizados movimentos circulares até eliminar todas as bolhas de ar. Em seguida, o frasco foi colocado em um banho à temperatura constante de 21°C e mantido em repouso por aproximadamente uma hora. Após esse tempo, o picnômetro foi completado com água até a

marca de 500 cm<sup>3</sup> e registrado a massa do conjunto. Na Figura 10 estão representadas as etapas do ensaio para a determinação da massa específica do agregado miúdo.

Figura 10 - Ensaio para a determinação da massa específica da areia, (a) secagem do material pela passagem de corrente de ar; (b) condição saturada superfície seca; (c) frasco calibrado com a amostra após a eliminação das bolhas de ar



Fonte: Elaborado pela autora (2016).

Depois, o agregado miúdo foi retirado do frasco com cuidado, para que não houvesse perda de material, e levado à estufa para secar. Após o resfriamento da amostra, foi anotado a massa da amostra seca. A massa específica aparente do agregado seco foi determinada pela Equação 12:

$$d_1 = \frac{m}{V - V_a} \quad (12)$$

onde,  $d_1$  é massa específica aparente do agregado seco (g/cm<sup>3</sup>);  $m$  é a massa da amostra seca em estufa (g);  $V$  é o volume do frasco (cm<sup>3</sup>) e  $V_a$  é o volume da água adicionada ao frasco (cm<sup>3</sup>).

O volume da água adicionada ao frasco foi determinada pela Equação 13:

$$V_a = \frac{m_2 - m_1}{\rho_a} \quad (13)$$



onde,  $m_2$  é massa total (frasco + agregado + água) em gramas;  $m_1$  é a massa do conjunto (frasco + agregado) em gramas e  $\rho_a$  é a massa específica da água (g/cm<sup>3</sup>).

A massa específica do agregado saturado superfície seca foi determinada utilizando a Equação 14:

$$d_2 = \frac{ms}{V - V_a} \quad (14)$$

onde,  $d_2$  é a massa específica do agregado saturado superfície seca (g/cm<sup>3</sup>);  $ms$  é a massa da amostra na condição saturada superfície seca (g);  $V$  é o volume do frasco (cm<sup>3</sup>) e  $V_a$  é o volume da água adicionada ao frasco (cm<sup>3</sup>).

A massa específica do agregado foi determinada pela Equação 15:

$$d_3 = \frac{ms}{(V - V_a) - \frac{(ms - m)}{\rho_a}} \quad (15)$$

onde,  $d_3$  é a massa específica do agregado (g/cm<sup>3</sup>);  $m$  é a massa da amostra seca em estufa (g);  $V$  é o volume do frasco (cm<sup>3</sup>);  $V_a$  é o volume da água adicionada ao frasco (cm<sup>3</sup>);  $ms$  é a massa da amostra na condição saturada superfície seca (g) e  $\rho_a$  é a massa específica da água (g/cm<sup>3</sup>).

Segunda a NBR NM 52 (ABNT, 2009), para o mesmo ensaio, os resultados em duas amostras da massa específica não deve diferir mais de 0,02 g/cm<sup>3</sup>.

### 3.2.3 Determinação da massa específica do resíduo de borracha

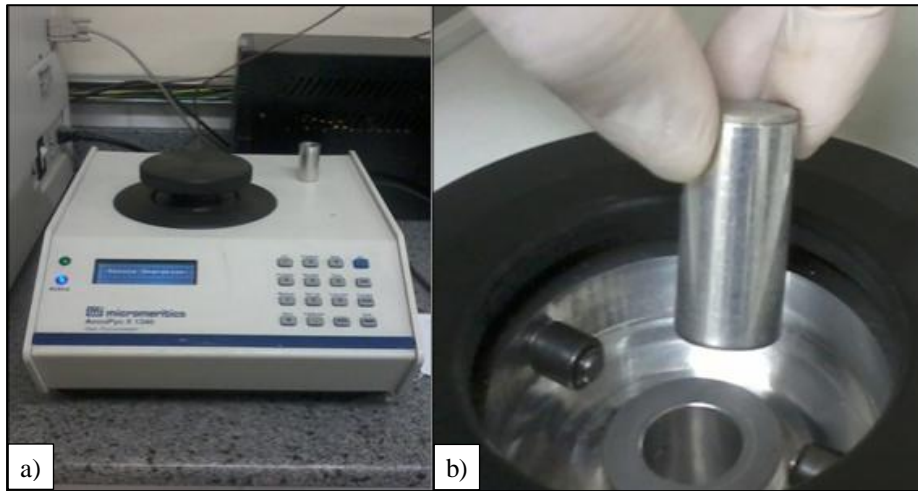
Para determinar a massa específica da borracha, foi necessário realizar o ensaio através da picnometria de gás hélio, que é uma técnica muito usada para determinar a densidade real de materiais em forma de pó.

O picnômetro a gás determina o volume de sólidos por variação de pressão de um gás em uma câmara de volume conhecida. Geralmente utiliza-se o gás hélio, por ser leve, inerte e

monoatômico. Devido ao pequeno tamanho dos seus átomos, o gás penetra facilmente nos poros do material, permitindo determinar com mais precisão o seu volume (GOMES, 2010).

O picnômetro de gás hélio é constituído por duas câmaras de volumes conhecidos (por calibração prévia). Uma delas é onde se coloca a amostra e a outra é a câmara de expansão, ambas ligadas por uma válvula de expansão (MOURA; FIGUEIREDO, 2002). O picnômetro utilizado na pesquisa e a câmara onde fica a amostra estão ilustrados na Figura 11.

Figura 11 - Picnômetro de gás hélio, (a) equipamento utilizado; (b) câmara da amostra



Fonte: Elaborado pela autora (2016).

Segundo Moura e Figueiredo (2002) e Viana *et al.* (2002), o procedimento para determinar o volume do material consiste em duas etapas. Na primeira etapa, a amostra é colocada na câmara e submetida a um processo de degaseificação, que consiste em repetidas purgas com gás hélio para remover impurezas e umidade que eventualmente pode conter. A segunda etapa consiste em levar todo o sistema à pressão atmosférica e, em seguida, isolar a câmara de expansão, fechando a válvula de expansão e pressurizando a câmara que contém a amostra até uma pressão  $P_1$ . Em seguida a válvula de expansão é aberta, fazendo com o que ocorra uma queda de pressão ( $P_2$ ). O volume da amostra é calculado segundo a Equação 16.

$$V_s = V_a - \frac{V_e}{\frac{P_1}{P_2} - 1} \quad (16)$$

onde,  $V_a$  é o volume da câmara da amostra;  $V_e$  é o volume da câmara de expansão e  $V_s$  é o volume do sólido.

Neste ensaio, os poros do material foram preenchidos pelo gás com o aumento da pressão. Esta pressão, quando estabilizada, em torno de 19,5 psig e temperatura aproximada de 20,5°C, a válvula de expansão foi aberta, ocorrendo à diminuição de pressão. A massa específica do material analisado foi calculada automaticamente pelo equipamento através da relação entre a massa do sólido e o volume do sólido para cada ciclo realizado (total de 10 ciclos).

### 3.2.4 Determinação da massa específica da cinza volante

A NBR NM 23 (ABNT, 2001) padroniza o ensaio para a determinação da massa específica do cimento Portland e de outros materiais em pó. Neste ensaio, o frasco volumétrico de Le Chatelier foi preenchido com querosene (líquido não reagente com o material analisado) até a marca entre zero e 1 cm<sup>3</sup> e deixado em repouso submerso em água por 30 minutos.

Em seguida, uma quantidade conhecida de cinza volante foi introduzida até ocorrer o deslocamento do líquido entre 18 e 24 cm<sup>3</sup> da escala graduada do frasco de Le Chatelier (Figura 12). Posteriormente, foram efetuados movimentos circulares até que bolhas de ar não subissem mais até a superfície do líquido.

Figura 12 - Deslocamento do líquido no frasco Le Chatelier



Fonte: Elaborado pela autora (2016).

A massa específica da cinza volante foi calculada através da Equação 17:

$$\rho_{cinza} = \frac{m}{V} \quad (17)$$

onde,  $\rho_{cinza}$  é a massa específica da cinza volante (g/cm<sup>3</sup>);  $m$  é a massa do material ensaiado (g) e  $V$  é o volume deslocado pelo material ensaiado (cm<sup>3</sup>).

### 3.2.5 Determinação da massa unitária

A massa unitária para materiais granulares foi determinada pela NBR NM 45 (ABNT, 2006) e pode ser definida como a massa por unidade de volume aparente. Através da massa unitária foi possível determinar as quantidades necessárias de cada material, em massa, considerando o traço volumétrico da argamassa.

Para o ensaio, foi necessário usar um recipiente cujo volume era conhecido. Este recipiente foi preenchido com o agregado miúdo lançado de uma altura de 5 cm do topo do recipiente, tomando cuidado para que não ocorresse segregação das partículas devido a batidas no recipiente que poderiam acontecer durante a realização do ensaio.

A superfície foi então rasada e o recipiente pesado. A massa unitária do material foi determinada pela Equação 18, sendo o resultado final a média de três ensaios.

$$\gamma = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (18)$$

onde,  $\gamma$  é a massa unitária (g/cm<sup>3</sup>);  $m_2$  é a massa do recipiente (g);  $m_1$  é a massa do recipiente preenchido com material (g) e  $V$  é o volume do recipiente.

### 3.2.6 Determinação da atividade pozolânica

Para a determinação da atividade pozolânica da cinza leve com cimento Portland foi utilizado o método prescrito pela NBR 5752 (ABNT, 2014a).

Primeiramente foi verificado se a quantidade de resíduo retida na peneira de abertura de malha 45 µm foi menor que 20%. Caso contrário, o material deve ser moído até que a porcentagem retida seja inferior a este valor, preferencialmente entre 10% e 15%.

Em seguida, foram realizadas duas misturas de argamassa, sendo uma de referência e outra contendo 25% em massa de material pozzolânico em substituição ao cimento CP II-F-32. A quantidade de materiais utilizados (cimento, água e areia proveniente do IPT: areia normal fina, areia normal média fina, areia normal média grossa e areia normal grossa) foi determinada conforme a NBR 7215 (ABNT, 1996). O índice de consistência da argamassa contendo resíduo foi mantido igual ao índice de consistência obtido pela argamassa de referência.

Para este ensaio, foram moldados cinco corpos de prova cilíndricos de 50 x 100 mm (Figura 13) para cada mistura de argamassa, conforme indicação da norma. Após 28 dias de cura submersos no tanque de água, foi realizado o ensaio de resistência à compressão dessas argamassas. A NBR 12653 (ABNT, 2014b) estabelece um parâmetro mínimo para o índice de atividade pozzolânica com cimento, aos 28 dias, em relação à argamassa de referência que deve ser, no mínimo, de 75%.

Figura 13 - Corpos de prova para atividade pozzolânica



Fonte: Elaborado pela autora (2016).

A atividade pozzolânica é dada pela relação entre a resistência à compressão da argamassa com o material em estudo e a resistência à compressão da argamassa de referência, conforme demonstrado na Equação 19.

$$I_{cimento} = \frac{f_{cb}}{f_{ca}} 100 \quad (19)$$

onde, *Icimento* é o índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias (%); *fc<sub>b</sub>* é a resistência média aos 28 dias dos corpos de prova moldados com cimento CP II-F-32 e 25% de material pozzolânico (argamassa B) em MPa; *fc<sub>a</sub>* é a resistência média aos 28 dias dos corpos de prova moldados apenas com cimento CP II-F-32 (argamassa A) em MPa.

### 3.3 PREPARAÇÃO DA ARGAMASSA

Para a argamassa de referência, foi utilizado o traço 1 : 1 : 6 de cimento, cal e areia (em volume). Com base na massa unitária e massa específica dos materiais constituintes, este traço em volume foi transformado em massa.

A argamassa foi preparada de acordo as recomendações estabelecidas pela NBR 13276 (ABNT, 2005b). Inicialmente, foram colocados no misturador mecânico (onde o recipiente e a pá já estavam umedecidos) a cal, a água e a areia em quantidades definidas no traço e misturado por 4 min em velocidade baixa. Em seguida, foi acrescentado o cimento à mistura e homogeneizado por mais 4 min mantendo a velocidade baixa. A quantidade de água adicionada à mistura foi dimensionada a partir do índice de consistência padrão para argamassa no intervalo de  $(260 \pm 5)$  mm, conforme especificação da norma técnica brasileira.

Para as argamassas contendo pó de borracha, o agregado miúdo foi substituído em concentrações de 5% e 10%, e para as argamassas contendo cinza volante foram adicionadas 10% e 20% do resíduo. Esses valores foram determinados com base em estudos que indicaram melhoria em algumas propriedades do concreto ou argamassa.

As argamassas foram colocadas em moldes metálicos para que fossem analisadas suas propriedades mecânicas no estado endurecido. Cada molde metálico permite a preparação de três corpos de provas prismáticos de 40x40x160 mm.

Para a moldagem dos corpos de prova prismáticos, foram seguidas as recomendações da NBR 13279 (ABNT, 2005e). Após o preparo da argamassa, foi colocada uma camada de argamassa no molde e feito o espalhamento em cada compartimento com o auxílio do nivelador. O molde foi fixado na mesa de adensamento e aplicado 30 quedas. Em seguida, o molde foi completado com a argamassa, nivelado e aplicado mais 30 quedas na mesa de adensamento. Por fim, os corpos de prova ficaram nos moldes por  $48 \pm 24$  horas, para depois serem desformados. As etapas para o preparo das argamassas e moldagem dos corpos de prova estão ilustradas na Figura 14.

Figura 14 - Preparação da argamassa e moldagem dos corpos de prova, (a) misturador mecânico, (b) nivelamento da argamassa no molde, (c) mesa de adensamento por queda



Fonte: Elaborado pela autora (2016).

### 3.4 ENSAIOS DA ARGAMASSA NO ESTADO FRESCO

A análise das argamassas no estado fresco foi realizada com base em algumas propriedades importantes, pois estas interferem na qualidade final da argamassa. Foi analisado o índice de consistência, a retenção de água, a massa específica da argamassa e o teor de ar incorporado.

#### 3.4.1 Determinação do índice de consistência

O ensaio da mesa de consistência (*Flow Table*), normatizado pela NBR 13276 (ABNT, 2005b), tem como objetivo determinar a consistência da argamassa no estado fresco. Este ensaio permite saber se é necessário aumentar a fluidez da argamassa, seja pela adição de superplastificantes ou pelo aumento do fator água/cimento (LEAL, 2012).

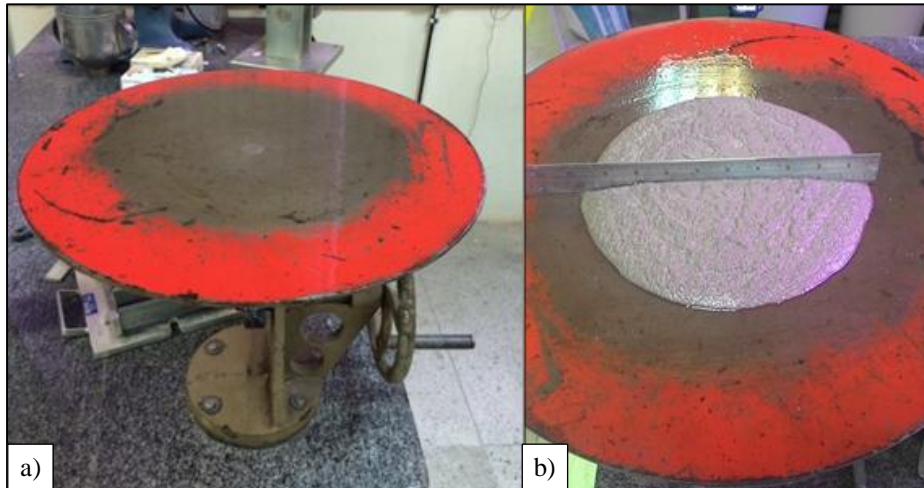
Após a preparação da argamassa, o molde tronco-cônico foi preenchido em três camadas com alturas aproximadas e foram aplicados em cada camada 15, 10 e 5 golpes, respectivamente, com o auxílio de um soquete, de modo que os golpes fossem distribuídos uniformemente. Em seguida, foi realizado o rasamento da argamassa passando a régua metálica com movimentos de vai-e-vem ao longo de toda a superfície.

Depois de retirado o molde, a manivela da mesa para índice de consistência (Figura 15a) foi acionada por 30 vezes, de modo que a mesa caísse e subisse 30 vezes em 30 segundos



de maneira uniforme. Após a última queda, foi realizada a medição do diâmetro em três pontos diferentes do espalhamento (Figura 15b).

Figura 15 - Ensaio de consistência da argamassa, (a) mesa *Flow Table*, (b) espalhamento



Fonte: Elaborado pela autora (2016).

Existe um conjunto de fatores que influenciam os resultados deste ensaio, como por exemplo, o modo que os materiais foram misturados, a maneira que a argamassa foi colocada e compactada no molde tronco-cônico e o ritmo das pancadas (LEAL, 2012).

### 3.4.2 Determinação da massa específica e do teor de ar incorporado

O ensaio realizado para determinar a massa específica da argamassa no estado fresco e o teor de ar incorporado segue os procedimentos propostos pela NBR 13278 (ABNT, 2005d).

Após o preparo da argamassa, foi colocado em um béquer porções de argamassa em três camadas aproximadamente iguais e, aplicado 20 golpes ao longo do perímetro em cada camada. Na primeira camada, os golpes não chegaram ao fundo do recipiente e nas camadas seguintes os golpes chegaram até a camada inferior.

Em seguida, foi efetuado três quedas do recipiente a uma altura aproximada de três centímetros e a superfície rasada com o auxílio de uma espátula. Para este ensaio, não foi observado vazios entre a argamassa e a parede do recipiente.

A massa específica da argamassa foi determinada pela Equação 20.



$$d = \frac{mc - mv}{V_r} 1000 \quad (20)$$

onde,  $d$  é a densidade de massa da argamassa ( $\text{kg/m}^3$ );  $mc$  é a massa do recipiente contendo a argamassa de ensaio (g);  $mv$  é a massa do recipiente vazio (g) e  $V_r$  é o volume do recipiente ( $\text{cm}^3$ ).

O teor de ar incorporado na argamassa (A) foi determinado pela Equação 21 e expresso em porcentagem.

$$A = 100 \left( 1 - \frac{d}{dt} \right) \quad (21)$$

onde,  $d$  é o valor da massa específica da argamassa conforme Equação 19 em  $\text{g/cm}^3$  e  $dt$  é o valor da densidade de massa teórica da argamassa sem vazios em  $\text{g/cm}^3$ .

A densidade de massa teórica ( $dt$ ) foi calculada através da Equação 22.

$$dt = \frac{\sum m_i}{\sum \frac{m_i}{\gamma_i}} \quad (22)$$

onde,  $m_i$  é a massa seca de cada componente da argamassa mais a massa da água e  $\gamma_i$  é a massa específica de cada componente da argamassa.

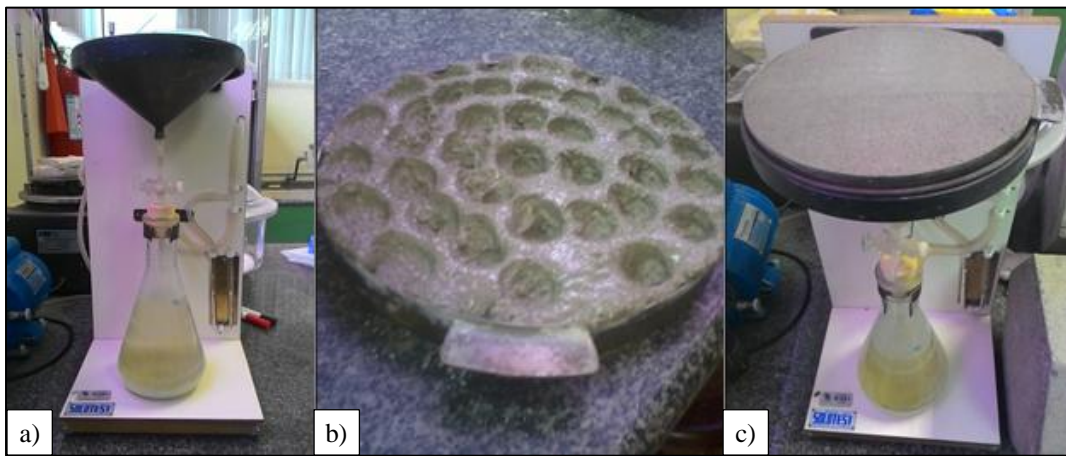
### 3.4.3 Determinação da retenção de água

A retenção de água da argamassa foi determinada pela NBR 13277 (ABNT, 2005c); o ensaio consiste na retirada da água da argamassa por meio de sucção de uma bomba de vácuo em um funil de filtragem (funil de Buchner).

Para a realização do ensaio, o papel filtro foi umedecido e posicionado sobre o prato, sendo este, por sua vez, colocado sobre o funil, garantindo a estanqueidade entre eles. Com a torneira fechada, a bomba de vácuo foi acionada aplicando uma sucção de 51 mm de mercúrio. Em seguida, a torneira foi aberta por 90 segundos para então que fosse retirado o excesso de água do papel-filtro, e fechado logo em seguida.

A argamassa, então, foi preenchida no prato e executado 16 golpes com soquete junto à borda e 21 golpes em pontos distribuídos na parte central. O excesso de argamassa do prato foi retirado usando régua metálica com movimentos do centro para a borda do prato. Com as bordas do prato limpas, o conjunto foi colocado novamente sob o funil. Com a torneira aberta, foi aplicado uma sucção de 51 mm de mercúrio durante 15 minutos e fechado em seguida. O ensaio da retenção de água está ilustrado na Figura 16.

Figura 16 - Ensaio da retenção de água, (a) Funil de Buchner com bomba de vácuo, (b) adensamento da argamassa, (c) prato com a argamassa sob o funil



Fonte: Elaborado pela autora (2016).

A retenção de água foi determinada através da Equação 23, sendo o resultado expresso em porcentagem.

$$R_a = \left( 1 - \frac{(m_a - ms)}{AF(m_a - mv)} \right) \cdot 100 \quad (23)$$

onde,  $R_a$  é a retenção de água da argamassa (%);  $m_a$  é a massa do conjunto com argamassa (g);  $ms$  é a massa do conjunto após a sucção (g);  $mv$  é a massa do conjunto vazio (g) e  $AF$  é o fator água/argamassa fresca.

O fator água/argamassa fresca ( $AF$ ) é calculada pela Equação 24:

$$AF = \frac{mw}{m + mw} \quad (24)$$

onde,  $m_w$  é a massa total de água acrescentada à mistura (g) e  $m$  é a soma dos materiais dos componentes da argamassa (g).

### 3.5 ENSAIOS DA ARGAMASSA NO ESTADO ENDURECIDO

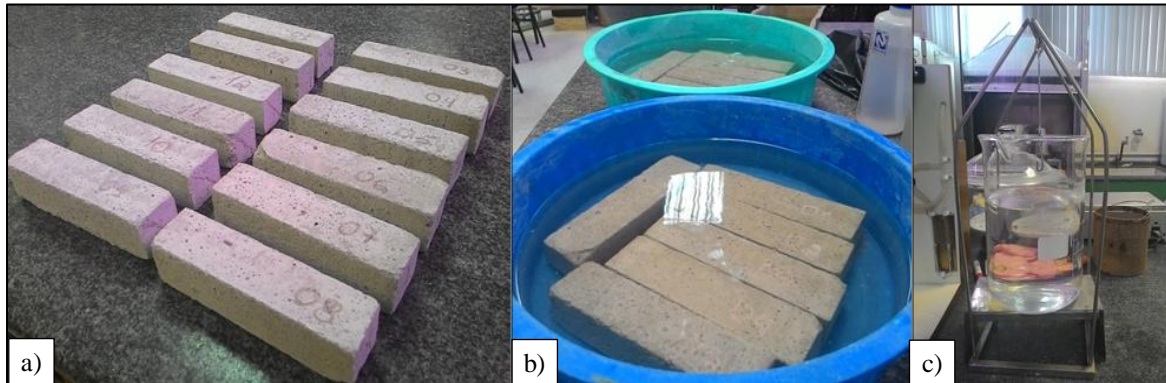
As argamassas no estado endurecido foram avaliadas através de ensaios de resistência à tração na flexão, resistência à compressão, resistência de aderência à tração e módulo de elasticidade. Foram realizados ensaios para a determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. A durabilidade das argamassas foi analisada por meio do ataque por sulfatos e a sua microestrutura foi avaliada utilizando a Microscopia Eletrônica de Varredura.

#### 3.5.1 Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica

O ensaio realizado para determinar a absorção de água, o índice de vazios e a massa específica da argamassa no estado endurecido seguiram os procedimentos da NBR 9778 (ABNT, 2005f).

Segundo a norma técnica, para a realização deste ensaio é necessário à utilização de, no mínimo, duas amostras para cada tipo de argamassa. Estas amostras foram secadas em estufa por 72 horas para que fosse possível determinar sua massa na condição seca. Em seguida as amostras foram imersas em água por um período de 72 horas, sendo possível a determinação da sua massa na condição saturada. Após a etapa de saturação, as amostras foram levadas a ebulição por 5 horas, mantendo-se constante o volume de água. Após esse período, a água foi resfriada até chegar à temperatura ambiente e registrado a sua massa através da balança hidrostática. Em seguida, as amostras foram secas com um pano úmido e determinada a sua massa saturada após imersão e fervura. As etapas do ensaio estão representadas na Figura 17.

Figura 17 - Ensaio da absorção de água, índice de vazios e massa específica, (a) amostras secas em estufa, (b) amostras imersas em água, (c) balança hidrostática



Fonte: Elaborado pela autora (2016).

A absorção de água foi calculada por meio da Equação 25:

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} 100 \quad (25)$$

onde,  $A$  é a absorção de água (%);  $m_{sat}$  é a massa da amostra saturada em água após imersão e fervura (g) e  $m_s$  é a massa da amostra seca em estufa (g).

O índice de vazios das argamassas foi calculado utilizando a Equação 26:

$$I_v = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} 100 \quad (26)$$

onde,  $I_v$  é o índice de vazios (%) e  $m_i$  é a massa da amostra saturada imersa em água após a fervura.

A massa específica das argamassas no estado endurecido foi calculada através da Equação 27:

$$\rho_r = \frac{m_s}{m_s - m_i} \quad (27)$$

onde  $\rho_r$  é a massa específica real (g/cm³).

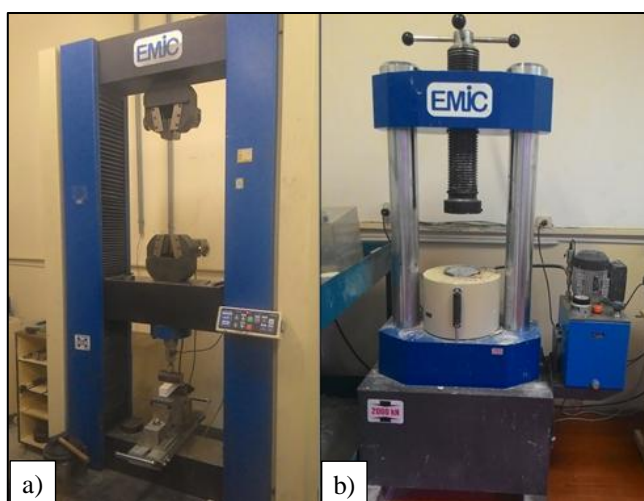
### 3.5.2 Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão

A resistência à tração na flexão e à compressão das argamassas foram determinadas de acordo com a NBR 13279 (ABNT, 2005e). Para cada traço de argamassa foram preparados quatro corpos-de-prova e ensaiados com 28 dias de idade. A quantidade de corpos de prova para a realização deste ensaio foi determinada com base em outras pesquisas já realizadas.

Para a determinação da resistência à tração na flexão foi utilizado o equipamento EMIC DL30000N (Figura 18a). O corpo de prova foi posicionado no dispositivo de carregamento de modo que, a distância dos apoios das extremidades ficasse em 25 mm; desse modo à peça ficou com 11 cm entre os apoios. Em seguida, foi aplicada no meio do vão uma carga de  $(50 \pm 10)$  N/s até ocorrer à ruptura do corpo-de-prova.

Para a determinação da resistência à compressão das argamassas foram utilizadas as metades dos corpos de prova do ensaio da flexão. O equipamento Emic PC200 (Figura 18b) foi usado para a realização deste ensaio; a carga aplicada em cada amostra foi de  $(500 \pm 50)$  N/s até ocorrer à ruptura dos corpos de prova.

Figura 18 - Equipamentos usados nos ensaios de resistência à tração na flexão (a) e à compressão (b)



Fonte: Elaborado pela autora (2016).

A resistência à tração na flexão foi calculada segundo a Equação 28:

$$R_f = \frac{1,5F_f * L}{40^3} \quad (28)$$

onde,  $R_f$  é a resistência à tração na flexão (MPa);  $F_f$  é a carga aplicada verticalmente no centro do prisma (N) e  $L$  é a distância entre os suportes (mm).

A resistência à compressão foi calculada segunda a Equação 29:

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad (29)$$

onde  $R_c$  é a resistência à compressão (MPa);  $F_c$  é a carga máxima aplicada (N) e 1600 é a área da seção do corpo de prova considerada quadrada (40 x 40 mm).

### 3.5.3 Determinação da resistência de aderência à tração

O ensaio da resistência de aderência à tração das argamassas foi realizado conforme instruções da NBR 13528 (ABNT, 2010). O equipamento de tração utilizado para este ensaio foi um dinamômetro manual digital da marca Solotest, que permite aplicação contínua de carga, fácil manuseio e baixo peso. Foram usadas pastilhas com diâmetro de 50 mm e cola à base de resina epóxi de alta aderência com espessura de 2 mm aproximadamente.

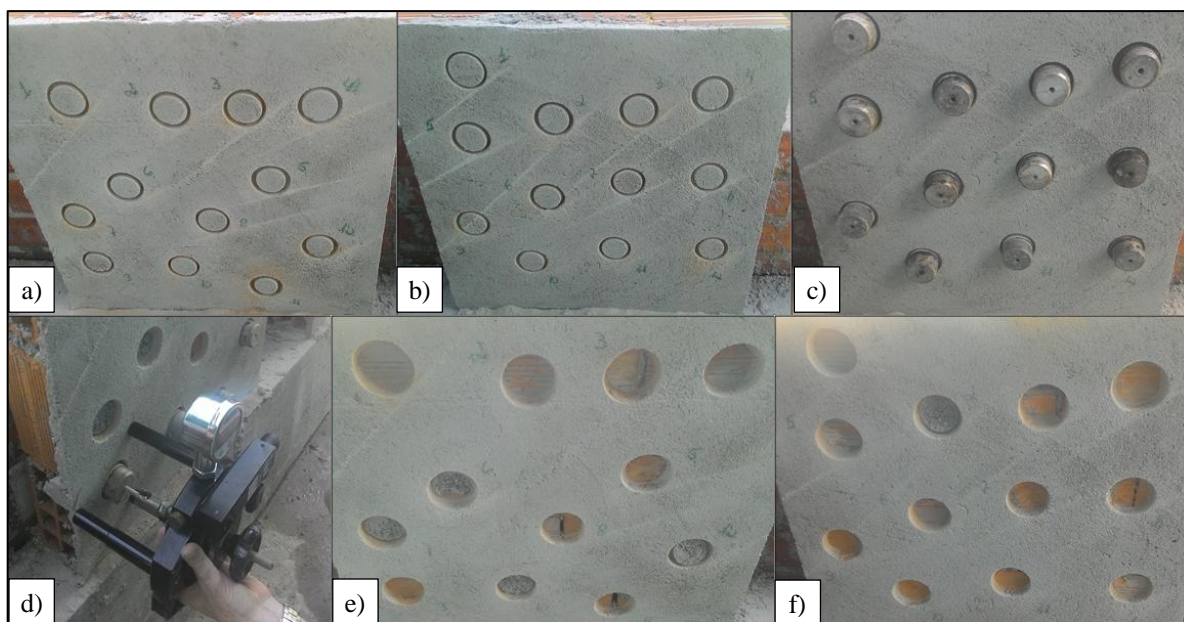
Para este ensaio, foram construídas duas paredes de alvenaria de tijolos cerâmicos, sendo a área aproximada de cada parede de 1,00 m². A argamassa utilizada para o assentamento dos blocos e para o chapisco foi preparada manualmente na proporção 1 : 2 (cimento : areia média). As paredes foram revestidas com a argamassa de referência e argamassa contendo 20% de cinza volante e 5% de borracha, sendo que a espessura do revestimento foi de 15mm.

O ensaio de resistência de aderência à tração foi realizado nos revestimentos com 65 dias de idade. Segundo a NBR 13528 (ABNT, 2010), cada ensaio deve ser composto por 12 corpos de prova distribuídos aleatoriamente sobre o painel revestido, contemplando arrancamentos em juntas e blocos. Os pontos de arrancamento devem estar espaçados entre si, além dos cantos e das quinas, em 50 mm no mínimo.

O corte do substrato foi executado a seco com auxílio de serra-copo e furadeira. Inicialmente, a velocidade de corte foi baixa, sendo aumentada conforme foi atingindo profundidade. O corte foi estendido de 1 mm a 5 mm dentro do substrato. Para evitar trepidações durante o corte e assegurar a ortogonalidade do equipamento foi utilizado um dispositivo para servir de apoio ao equipamento de corte.

O ensaio de resistência de aderência à tração foi realizado com o revestimento seco, pois a umidade no revestimento durante o ensaio influencia nos valores de aderência e nos coeficientes de variação. O equipamento utilizado durante o ensaio permaneceu com seu eixo de aplicação da carga ortogonal ao plano de revestimento, sem sofrer qualquer tipo de impacto ou esforços indesejáveis, como vibrações e movimentos bruscos. Aplicou-se, então, o esforço de tração perpendicularmente ao corpo de prova com taxa de carregamento constante até a ruptura do corpo de prova. Em seguida, registrou-se o diâmetro do corpo de prova para o cálculo da área, a espessura do revestimento e a forma de ruptura. Na Figura 19 estão representadas as etapas do ensaio da resistência de aderência à tração.

Figura 19 - Ensaio da resistência de aderência à tração, (a) e (b) corte no substrato das paredes revestidas com argamassa de referência e argamassa com borracha e cinza volante, (c) pastilhas coladas no painel, (d) equipamento utilizado no ensaio, (e) e (f) ruptura dos corpos de prova da argamassa de referência e argamassa com borracha e cinza volante



Fonte: Elaborado pela autora (2017).

A resistência de aderência à tração em cada corpo de prova foi calculada utilizando a Equação 30:

$$Ra = \frac{F}{A} \quad (30)$$

onde,  $Ra$  é a resistência de aderência à tração (MPa);  $F$  é a força de ruptura (N) e  $A$  é a área do corpo de prova (mm<sup>2</sup>).



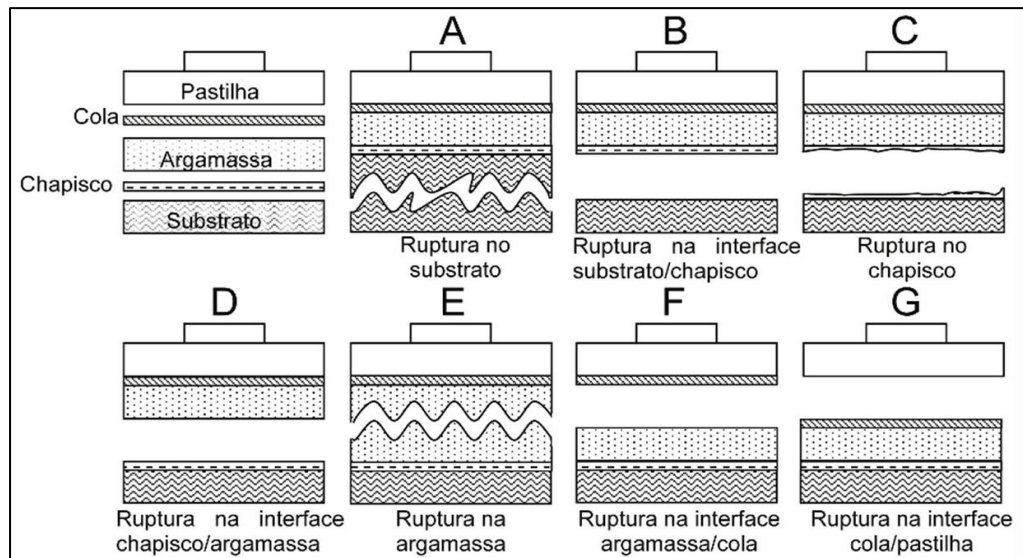
Neste ensaio, também foram retiradas três amostras do revestimento de cada painel para a determinação da umidade, conforme recomendações da NBR 13528 (ABNT, 2010). O cálculo do teor de umidade de cada testemunho foi determinado por meio da Equação 31.

$$U = \frac{(m_u - m_s)}{m_s} 100 \quad (31)$$

onde,  $U$  corresponde ao teor de umidade (%),  $m_u$  é a massa do testemunho após a extração (g) e  $m_s$  é a massa do testemunho seco em estufa (g).

A forma de ruptura dos corpos de prova para um sistema de revestimento com chapisco foi avaliada conforme a Figura 20.

Figura 20 - Formas de ruptura dos corpos de prova para a resistência de aderência à tração



Fonte: NBR 13528 (ABNT, 2010).

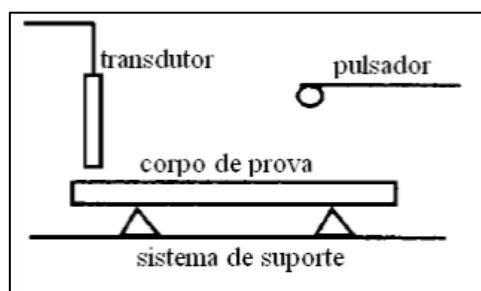
### 3.5.4 Determinação do módulo de elasticidade

Para a determinação do módulo de elasticidade longitudinal, foi utilizado o método de excitação por impulso. Neste método, segundo Cossolino e Pereira (2010), o corpo de prova sofre um impacto de curta duração (que pode ser uma leve pancada) e responde com vibrações em suas frequências naturais de vibração de acordo com as condições de contorno impostas.



A Figura 21 mostra um esquema básico do posicionamento do corpo de prova para medida das frequências de ressonância flexional e torcional para este método. O pulsador é o equipamento que aplica o impacto no corpo de prova para gerar as vibrações mecânicas, sem danificá-lo; e o transdutor é o que vai captar a resposta acústica e transformar em sinal elétrico de maneira que seja possível fazer a leitura das frequências. O corpo de prova deve ser apoiado na posição dos nós localizados em  $0,224L$  de cada extremidade e o impulso deve ser dado no local de maior amplitude. A resposta acústica consiste no som emitido pelo corpo de prova e tem origem nas suas frequências naturais de vibração, frequências estas que dependem da massa, das dimensões, da geometria e dos módulos de elasticidade.

Figura 21 - Esquema básico do posicionamento da amostra para determinação do módulo de elasticidade pelo método de excitação por impulso



Fonte: Cossolino e Pereira (2010).

Para a realização do ensaio, foi efetuada inicialmente a medição das dimensões e da massa dos corpos de prova. Os corpos de prova foram apoiados em seus pontos nodais para que pudessem vibrar livremente ao receber a excitação. Definiu-se, então, o sentido de vibração de interesse, para que o software calculasse o módulo de elasticidade de acordo com a propagação da vibração dos corpos de prova. Para este ensaio, cada corpo de prova foi ensaiado cinco vezes.

### 3.5.5 Ataque por sulfatos

O ensaio para analisar o ataque de sulfatos nas argamassas foi realizado de acordo com a ASTM C 1012 (ASTM, 2004). O método consiste na imersão dos corpos de prova em uma solução de sulfato e verificação da perda de massa em cada ciclo de molhagem e secagem.

Foram ensaiados dois corpos de prova, com dimensões de 160 x 40 x 40 mm, para a argamassa de referência e argamassa contendo 20% de cinza volante e 5% de borracha. A quantidade de corpos de prova foi definida por meio de estudos já realizados.

Para este ensaio, foi preparada uma solução de sulfato de sódio com concentração de 5% e pH igual a 8. As amostras foram secas em estufa a 105°C durante 21,5 h e efetuada a sua pesagem após 30 minutos de resfriamento. Em seguida, as amostras ficaram imersas na solução de sulfato por 2 h (Figura 22) e colocadas novamente na estufa por 21,5 h, iniciando assim um novo ciclo.

Figura 22 - Amostras imersas em solução de sulfato de sódio



Fonte: Elaborado pela autora (2017).

### 3.5.6 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

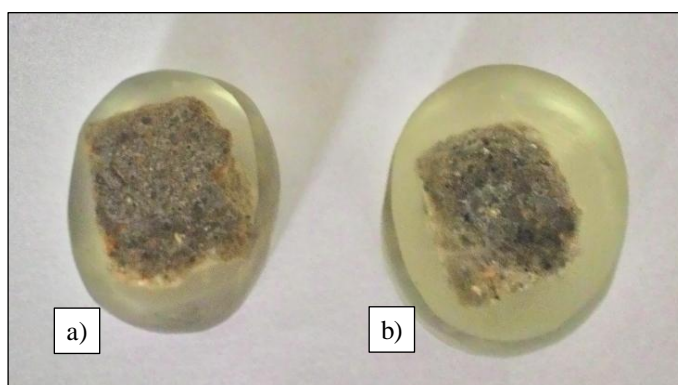
O microscópio eletrônico de varredura é um equipamento bastante usado na análise dos materiais. A vantagem de se utilizar o MEV nas pesquisas está relacionada com a facilidade de preparação das amostras e a sua alta resolução, que se encontra na ordem de 2 a 5 nm. Além disso, o MEV apresenta elevada profundidade de foco (originando imagens com aparência tridimensional) e possibilita a combinação da análise microestrutural com a microanálise química (ISAIA, 2007).

A imagem eletrônica de varredura é formada pela incidência de um feixe fino de elétrons na superfície da amostra sob condições de vácuo. Quando ocorre o choque dos elétrons com a amostra, parte do feixe é refletido e coletado por detectores que convertem o sinal em imagens de elétrons retroespeelhados. Ocorre também a emissão de raios X que

forneem a composição química de um determinado ponto ou região de superfície. Essas radiações, quando captadas corretamente, fornecem informações características sobre a amostra, como por exemplo, a sua composição, a topografia da superfície e a cristalografia (ISAIA, 2007).

Para a análise no MEV, as amostras das argamassas foram preparadas da seguinte forma: após os 28 dias de cura, o corpo de prova prismático da argamassa foi cortado com o auxílio de uma serra-fita e embutido com resina epóxi de baixa viscosidade para obtenção de vácuo no microscópio. Em seguida, foi realizado o lixamento e o polimento das amostras. Para que ocorresse a interação do feixe eletrônico com as amostras durante a análise no microscópio, as amostras foram revestidas com carbono. A Figura 23 apresenta as amostras embutidas em resina epóxi e polidas da argamassa de referência e da argamassa contendo 20% de cinza volante e 5% de borracha.

Figura 23 - Amostras das argamassas embutidas em resina epóxi e polidas, (a) argamassa de referência, (b) argamassa com 20% de cinza volante e 5% de borracha



Fonte: Elaborado pela autora (2017).

### 3.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA

O planejamento experimental e a análise da variância (ANOVA) foram realizados com o auxílio do software Statistica 8.0 (StatSoft, Inc., 2016).



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados referentes à caracterização do agregado miúdo, da cinza volante e do resíduo de borracha de pneus inservíveis. Em seguida, serão analisados a atividade pozzolânica da cinza e os resultados dos ensaios nas argamassas no estado fresco e no estado endurecido. Será apresentada, também, a análise estatística da resistência à compressão das argamassas do projeto fatorial, além da apresentação e da discussão da microestrutura das argamassas.

### 4.1 ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS

As características físicas do cimento Portland CP II Z-32 e da cal hidratada CH III foram fornecidas pelo fabricante desses produtos e estão apresentadas nas Tabelas 15 e 16 respectivamente.

Tabela 15 - Características físicas do cimento Portland CP II Z-32

Tipos de ensaio	Resultados	Norma
Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )	1,08	NBR 6474
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,98	NBR 23
Finura na peneira #200(%)	≤12	NBR 11579
Resist. à compressão 7 dias (MPa)	≥20	NBR 7215
Resist. à compressão 28 dias (MPa)	≥32	NBR 7215

Fonte: Votorantim Cimentos (2016).

Tabela 16 - Características físicas da cal hidratada CH III

Tipos de ensaio	Resultados	Norma
Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )	0,75	NBR 6474
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,40	NBR 23
Granulometria #200(%)	12	NBR 9289
Granulometria #30(%)	0,0	NBR 9289
Umidade (%)	0,0	

Fonte: Cal Cem (2016).

O agregado miúdo utilizado na produção das argamassas contém dimensão máxima dos grãos de 2,36 mm e módulo de finura de 2,09. A massa específica encontrada segundo a NBR NM 52 (ABNT, 2009) foi de 2,55 g/cm<sup>3</sup> e a massa unitária aparente, de acordo com a NBR NM 45 (ABNT, 2006), foi de 1,43 g/cm<sup>3</sup>. As características físicas do agregado miúdo estão indicadas na Tabela 17 e a distribuição do tamanho das suas partículas está apresentada na Figura 24, sendo possível verificar que o material encontra-se na zona utilizável para a produção de argamassa.

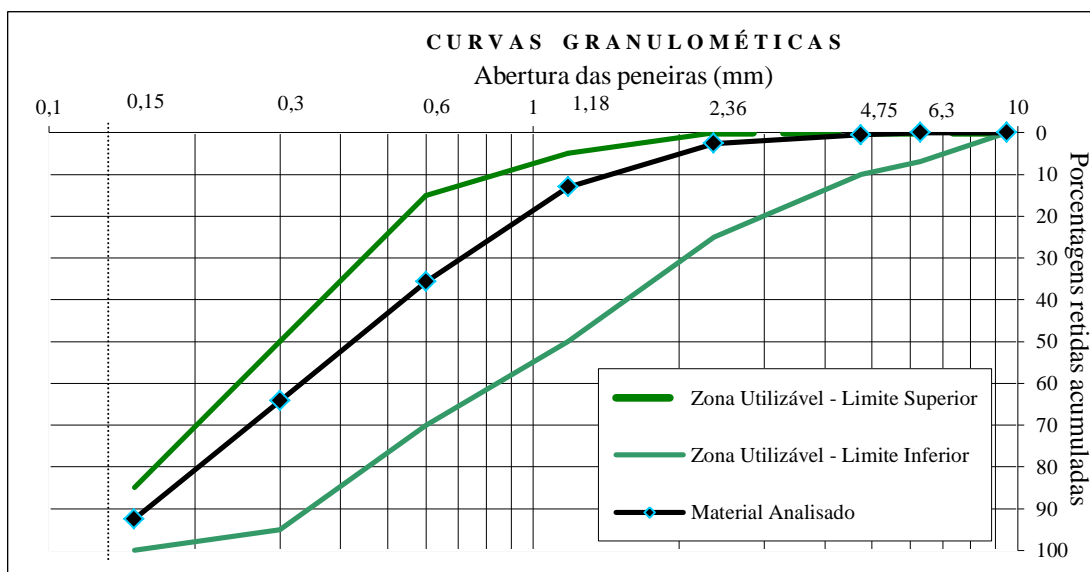
Tabela 17 - Características físicas do agregado miúdo

Tipos de ensaio	Resultados		Norma
Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )	1,43		NBR NM 45/2006
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,55		NBR NM 52/2009
Composição granulométrica	Malha (mm)	% Retidas Acumuladas	NBR NM 248/2005
	4,75	0,5	
	2,36	2,6	
	1,18	13,0	
	0,6	35,7	
	0,3	64,2	
	0,15	92,5	
	Fundo	100,0	
Módulo de finura	2,09		
Diâmetro máximo (mm)	2,36		

Fonte: Elaborado pela autora (2016).

Segundo a NBR NM 248 (ABNT, 2003), agregado miúdo com módulo de finura inferior a 2,40 é classificado como agregado fino e, para agregados com módulo de finura entre 2,40 e 3,30 são considerados como agregado médio. Neste caso, como o módulo de finura foi de 2,09, o agregado miúdo utilizado nesta pesquisa pode ser classificado como agregado fino.

Figura 24 - Curva granulométrica do agregado miúdo



Fonte: Elaborado pela autora (2016).

As características físicas da borracha e da cinza volante estão apresentadas nas Tabelas 18 e 19. A borracha utilizada na pesquisa consiste em um resíduo com dimensão máxima dos grãos de 0,71 mm e massa específica de 1,1953 g/cm<sup>3</sup>. A cinza leve apresenta como característica massa específica de 2,168 g/cm<sup>3</sup> e granulometria de 45µm. De acordo com Isaia (2007), estudos mostram que uma cinza volante possui diâmetro de partícula variando entre 1µm até 100µm; logo, a granulometria da cinza utilizada nesta pesquisa em muito se assemelha à essas características.

Tabela 18 - Características físicas da borracha

Tipos de ensaio		Resultados	Norma
Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )		0,358	NBR NM 45/2006
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )		1,1953	Picnômetro de gás
Composição granulométrica	Malha (mm)	Limites (%)	NBR NM 248/2005
	0,710	Máximo 2,0%	
	0,300	De 55,0% a 80,0%	
	Fundo (0,300)	Mínimo de 18%	

Fonte: Elaborado pela autora (2016).

Tabela 19 - Características físicas da cinza

Tipos de ensaio	Resultados		Norma
Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )	0,905		NBR NM 45/2006
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	2,168		NM 23/2000
Composição granulométrica	Malha (µm)	% Retida	NBR NM 248/2005
	45	75,3	
	Fundo	24,7	

Fonte: Elaborado pela autora (2016).

#### 4.1.1 Atividade pozolânica

Por meio do ensaio de resistência à compressão, foi possível obter a resistência das argamassas para a determinação do índice de desempenho do material pozolânico aos 28 dias de cura. Os resultados para o índice de consistência e para a resistência à compressão estão especificados na Tabela 20, sendo a argamassa “A” contendo apenas cimento e areia proveniente do IPT e a argamassa “B” contendo 25% de substituição em massa de cimento por cinza volante.

Tabela 20 - Resultados dos ensaios para atividade pozolânica

	Índice de consistência (mm)	Resistência à compressão (MPa)
Argamassa A	213	35,05±3,42
Argamassa B	212	26,37±1,06

Fonte: Elaborado pela autora (2016).

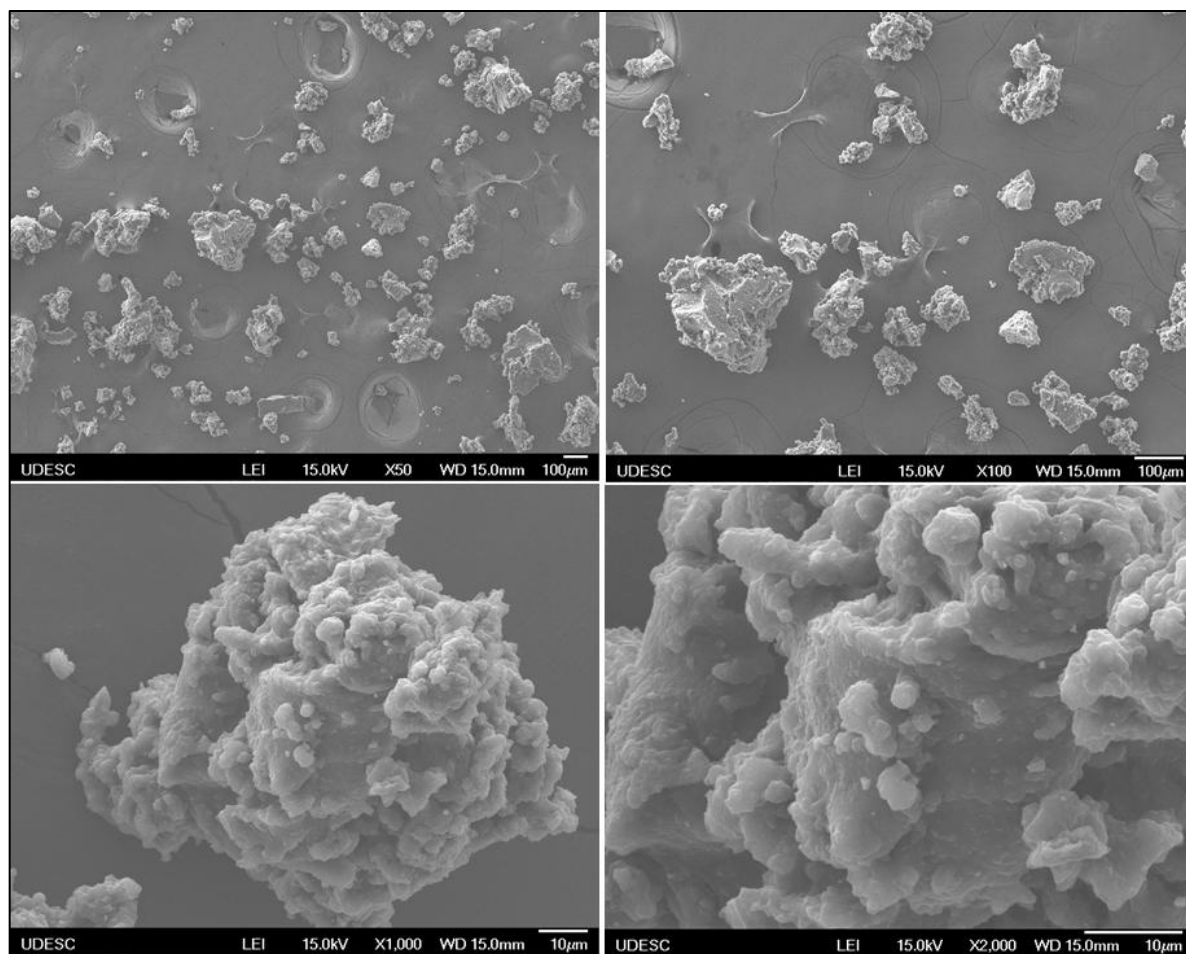
A partir dos resultados obtidos, o índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias para a cinza volante foi de 75,2 %. A NBR 12653 (ABNT, 2014b) estabelece que o índice mínimo para atividade pozolânica seja de 75,0 %. Assim, a cinza utilizada nesta pesquisa pode ser caracterizada como material pozolânico, apesar da mesma não ter sido beneficiada por nenhum tipo de processo de moagem.



#### 4.1.2 Micrografia dos resíduos

As imagens da Figura 25 apresentam a morfologia do pó de borracha, as quais foram analisadas com o auxílio do Microscópio Eletrônico de Varredura. Observa-se que o resíduo possui partículas de tamanho variado e formato irregular.

Figura 25 - Micrografias do pó de borracha

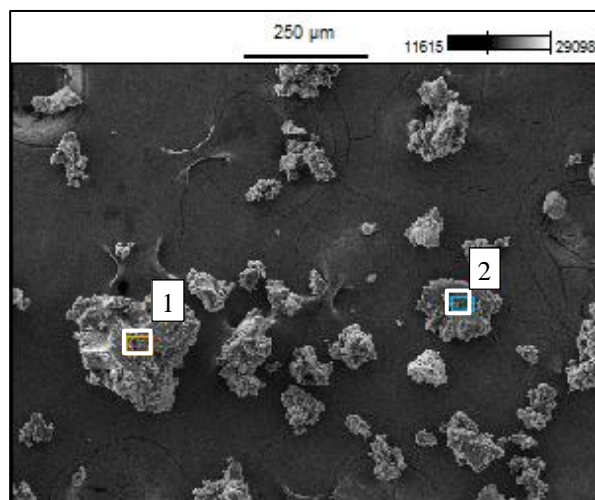


Fonte: Elaborado pela autora (2017).

Para avaliar a composição química da borracha, foram realizadas análises químicas qualitativas e semi-quantitativas por meio da técnica de espectroscopia de energia dispersiva (EDS). A Figura 26 mostra uma imagem do pó de borracha e os locais selecionados para a aplicação da análise EDS (pontos 1 e 2). Por meio dos espectros de EDS obtidos dos pontos analisados (Figura 27), é possível observar a presença de grande quantidade de Carbono (C), seguida de oxigênio (O), zinco (Zn), sódio (Na) e enxofre (S); elementos químicos também

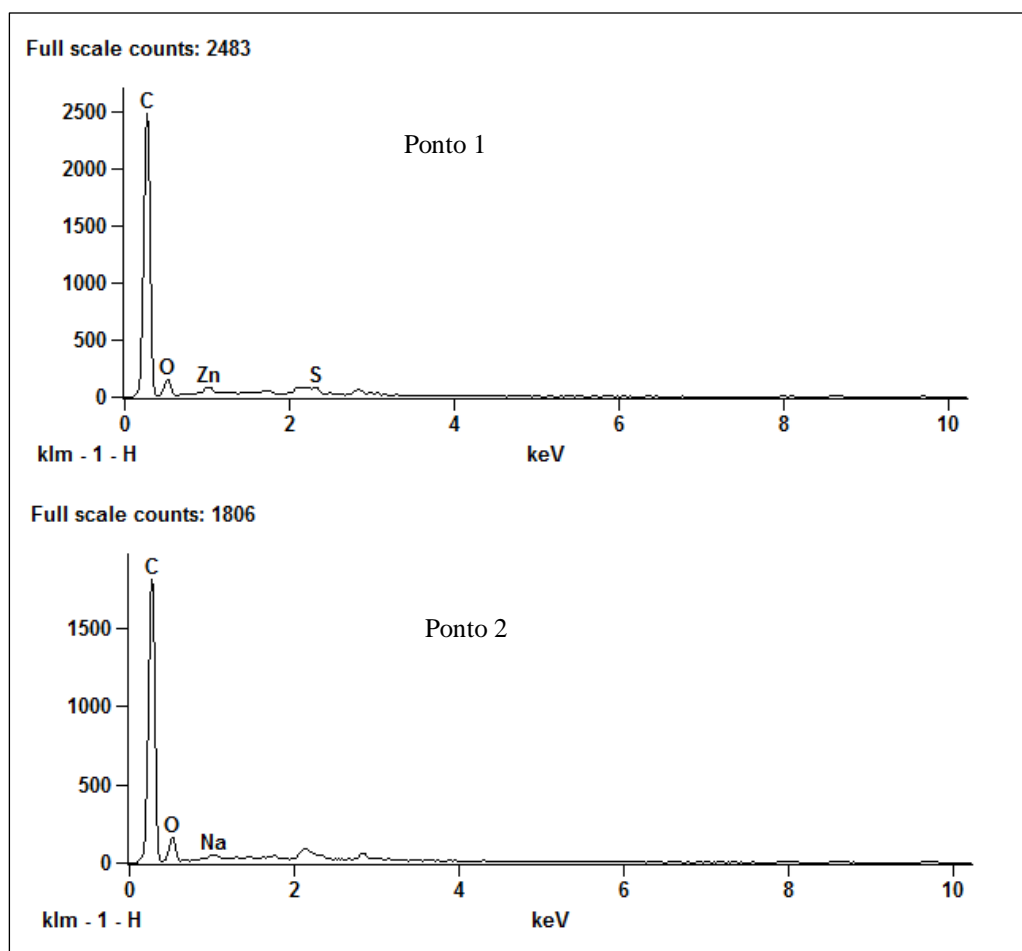
encontrados por Faria (2015), Monteiro e Mainier (2008). A Tabela 21 apresenta os resultados da análise química semi-quantitativa por EDS dos pontos 1 e 2.

Figura 26 - Imagem MEV do pó de borracha e pontos selecionados para aplicação de EDS



Fonte: Elaborado pela autora (2017).

Figura 27 - Espectros de EDS para a análise química dos pontos 1 e 2 da Figura 26



Fonte: Elaborado pela autora (2017).

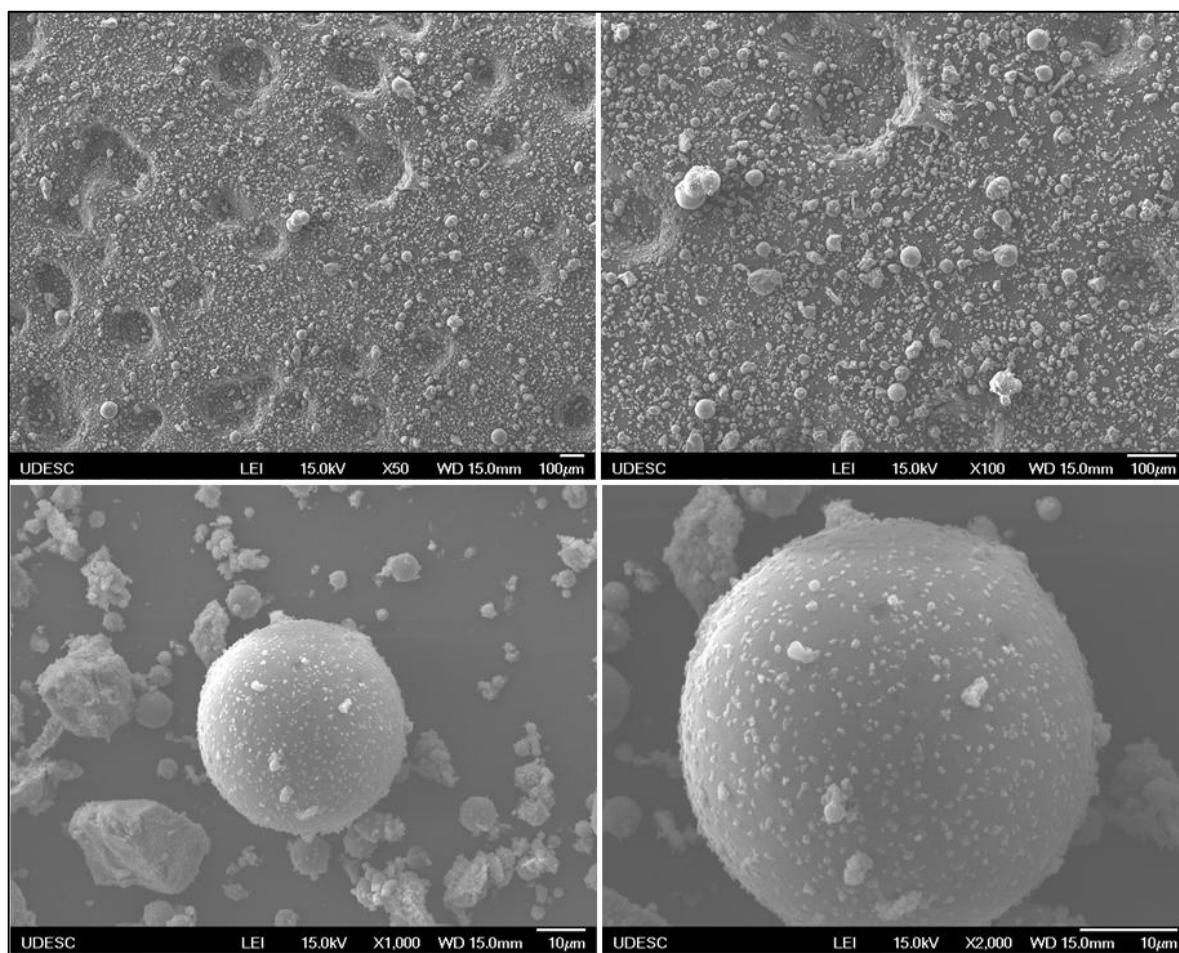
Tabela 21 - Resultado da análise química semi-quantitativa por EDS dos pontos 1 e 2 da Figura 27

	C	O	Na	S	Zn
Ponto 1 (% massa)	72,77	20,81		0,55	5,87
Ponto 2 (% massa)	68,23	30,30	1,47		

Fonte: Elaborado pela autora (2017).

As imagens da Figura 28 mostram os aspectos morfológicos da cinza volante. Por meio dessas imagens é possível verificar que o resíduo possui partículas de tamanho variado e formato esférico.

Figura 28 - Micrografias da cinza volante

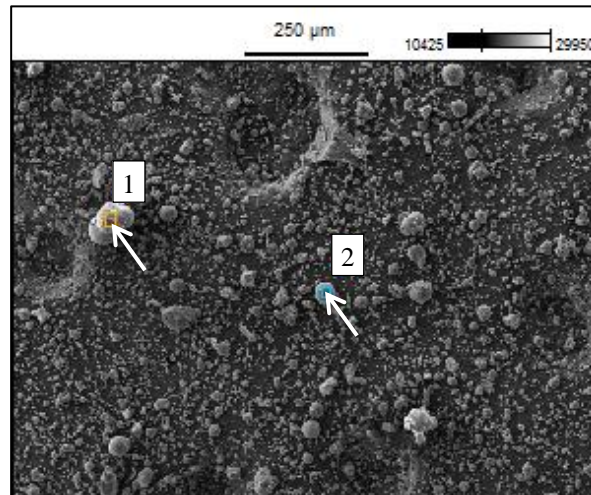


Fonte: Elaborado pela autora (2017).

A Figura 29 mostra uma imagem da cinza volante e os pontos selecionados para a aplicação da análise EDS (pontos 1 e 2). Por meio destes espectros (Figura 30), é possível observar a presença em maiores concentrações de carbono (C), oxigênio (O), silício (Si) e compostos químicos de sílica ( $\text{SiO}_2$ ), alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), óxido férrico ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) e cal ( $\text{CaO}$ ). A

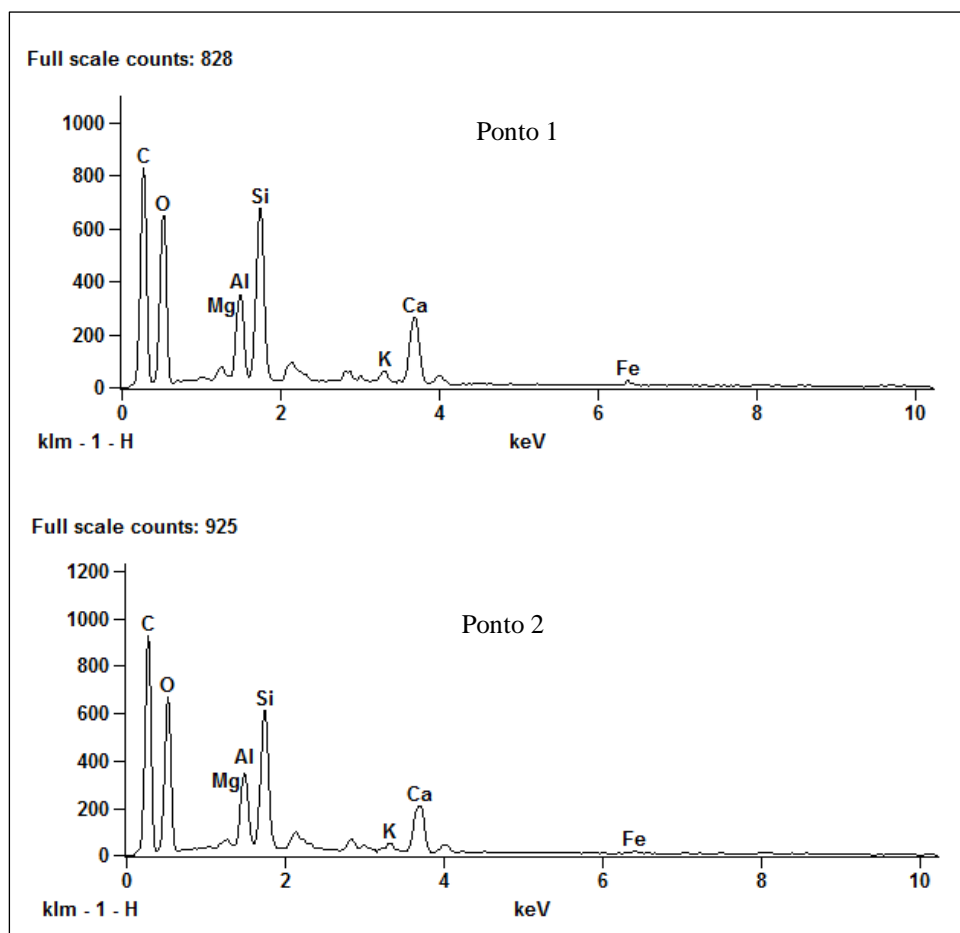
Tabela 22 apresenta os resultados da análise química semi-quantitativa por EDS dos pontos 1 e 2.

Figura 29 - Imagem MEV da cinza volante e pontos selecionados para aplicação de EDS



Fonte: Elaborado pela autora (2017).

Figura 30 - Espectros de EDS para a análise química dos pontos 1 e 2 da Figura 29



Fonte: Elaborado pela autora (2017).

Tabela 22 - Resultados da análise química semi-quantitativa por EDS dos pontos 1 e 2 da Figura 30

	C	O	Mg	Al	Si	K	Ca	Fe
Ponto 1 (% massa)	40,93	25,58	0,90	5,50	12,83	1,48	10,42	2,35
Ponto 2 (% massa)	45,32	23,92	0,71	5,62	11,94	0,98	9,56	1,95
	C		MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Ponto 1 (% composição)	40,93	0,00	1,50	10,39	27,45	1,78	14,58	3,36
Ponto 2 (% composição)	45,32	0,00	1,18	10,62	25,53	1,19	13,38	2,79

Fonte: Elaborado pela autora (2017).

## 4.2 COMPOSIÇÃO DA ARGAMASSA

A proporção inicial dos materiais adotada para a produção das argamassas foi, em volume, de 1 : 1 : 6 (cimento, cal e areia) usualmente empregado na construção civil. Essa proporção foi transformada de volume para massa por meio da obtenção das massas específicas e unitárias dos materiais.

A Tabela 23 apresenta as composições das misturas das argamassas, sendo REF a argamassa de referência, B5 e B10 Argamassa com 5% e 10% de borracha, C10 e C20 Argamassa com 10% de Cinza e Argamassa com 20% de Cinza, C10B5 e C10B10 Argamassa com 10% Cinza + 5% de borracha e Argamassa com 10% Cinza + 10% de Borracha, C20B5 e C20B10 Argamassa contendo 20% Cinza + 5% de Borracha e Argamassa com 20% Cinza + 10% de Borracha.

Tabela 23 - Composição das argamassas

Mistura	Componentes das argamassas* (g)					
	Cimento	Cinza	Cal	Areia	Borracha	Água
REF	720	-	496	5720	-	1468
B5	720	-	496	5434	71,6	1392
B10	720	-	496	5148	143,2	1320
C10	720	60	496	5720	-	1468
C10B5	720	60	496	5434	71,6	1392
C10B10	720	60	496	5148	143,2	1320
C20	720	120	496	5720	-	1480
C20B5	720	120	496	5434	71,6	1400
C20B10	720	120	496	5148	143,2	1340

\* 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)

Fonte: Elaborado pela autora (2016).

#### 4.3 ANÁLISE DAS PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO

Os resultados referentes aos ensaios realizados nas argamassas no estado fresco estão apresentados na Tabela 24 e correspondem à consistência conferida a cada mistura, a massa específica, o teor de ar incorporado e a retenção de água.

Tabela 24 - Propriedades da argamassa no estado fresco

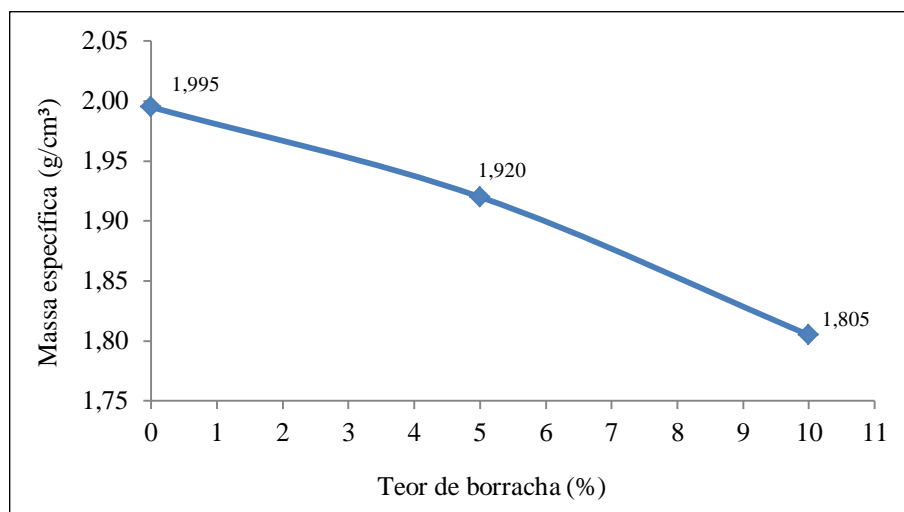
Argamassa	Relação água/cimento	Índice de consistência (mm)	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	Teor de ar incorporado (%)	Retenção de água (%)
REF	2,04	253	1,995	2	80
B5	1,93	255	1,920	5	81
B10	1,83	250	1,805	10	82
C10	2,04	263	1,982	2	79
C10B5	1,93	258	1,879	7	82
C10B10	1,83	250	1,785	11	84
C20	2,06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

Fonte: Elaborado pela autora (2016).

Verificou-se que, com o aumento na quantidade de borracha na argamassa, ocorreu uma redução da massa específica. Este fato se deve em função da baixa massa unitária e da massa específica dos resíduos utilizados. A variação da massa específica das argamassas em relação à quantidade de borracha substituída pela areia pode ser observada na Figura 31.

Segundo Carasek (2010), argamassas contendo massa específica menor que 1,40 g/cm<sup>3</sup> são classificadas como argamassas leves, já as argamassas normais apresentam massa específica entre 1,40 e 2,30 g/cm<sup>3</sup>. Como todas as argamassas estudadas tiveram massa específica entre 1,80 e 2,00 g/cm<sup>3</sup>, estas argamassas são classificadas como argamassas normais, podendo, portanto, serem utilizadas em aplicações convencionais.

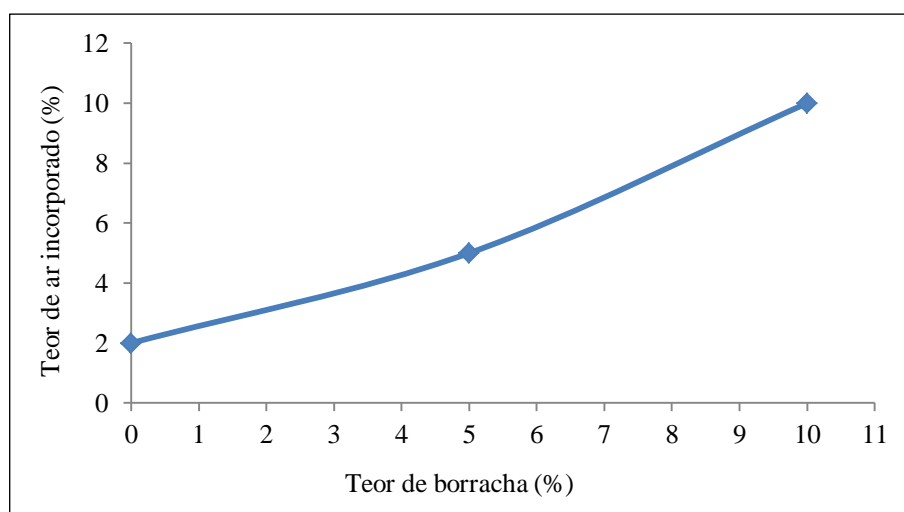
Figura 31 - Variação da massa específica das argamassas com a quantidade de borracha



Fonte: Elaborado pela autora (2016).

A Figura 32 mostra a variação do teor de ar incorporado na argamassa em relação à quantidade de borracha substituída pela areia. Argamassas contendo 10% de borracha apresentaram um aumento no teor de ar incorporado, o que contribui para a trabalhabilidade da argamassa. Segundo Canova, Bergamasco e Angelis Neto (2007), valores maiores de 16% de teor de ar incorporado na argamassa pode reduzir a resistência de aderência à tração no substrato. A ASTM C270 (ASTM, 2007) recomenda que o teor máximo de ar incorporado em argamassas contendo cal seja de 14%. Neste caso, as argamassas estudadas tiveram no máximo 11% de teor de ar incorporado, não acarretando problemas referentes à resistência de aderência à tração.

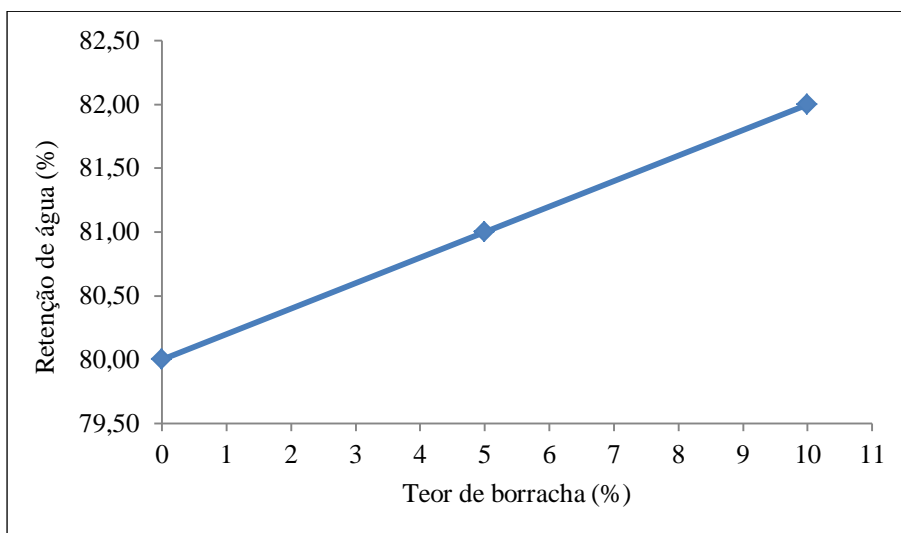
Figura 32 - Variação do teor de ar incorporado das argamassas com a quantidade de borracha



Fonte: Elaborado pela autora (2016).

A retenção de água é um dos fatores mais importantes da argamassa, pois a superfície precisa ficar hidratada o maior tempo possível. Uma 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. Por meio da Figura 33 é possível observar que a retenção de água aumenta com a adição de borracha, isso possivelmente aconteceu devido ao aumento no teor de ar incorporado.

Figura 33 - Variação da retenção de água das argamassas com a quantidade de borracha



Fonte: Elaborado pela autora (2016).

De acordo com a ASTM C270 (ASTM, 2007), a retenção de água das argamassas não deve ser inferior a 75%. Em todas as argamassas estudadas a retenção de água foi superior a 80%, isso indica que argamassas contendo borracha mantém a sua trabalhabilidade por maior tempo quando sujeitas a solicitações que provocam perda de água de amassamento.

#### 4.4 ANÁLISE DAS PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO

Os resultados obtidos para a massa específica das argamassas no estado endurecido, a absorção de água e o índice de vazios estão apresentados na Tabela 25. Comparando a massa específica das argamassas no estado endurecido com a retenção de água, é possível constatar que as argamassas de menor densidade também são aquelas que apresentaram maior retenção.



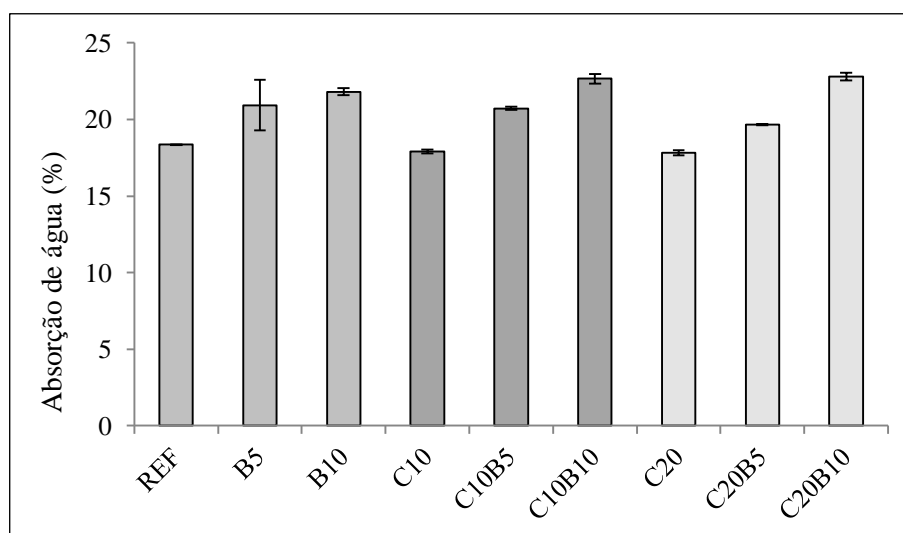
Tabela 25 - Massa específica, absorção de água e índice de vazios das argamassas

Argamassa	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	Absorção de água (%)	Índice de vazios (%)
REF	2,602	18,36 ± 0,03	32,32 ± 0,08
B5	2,498	20,93 ± 1,65	34,30 ± 0,97
B10	2,464	21,81 ± 0,24	34,96 ± 0,19
C10	2,587	17,98 ± 0,13	31,64 ± 0,25
C10B5	2,506	20,72 ± 0,11	34,18 ± 0,16
C10B10	2,461	2,65 ± 0,30	35,80 ± 0,29
C20	2,569	17,83 ± 0,17	31,41 ± 0,28
C20B5	2,519	19,67 ± 0,03	33,14 ± 0,16
C20B10	2,478	22,81 ± 0,25	36,12 ± 0,23

Fonte: Elaborado pela autora (2016).

A absorção de água da argamassa por imersão está ilustrada na Figura 34. Os resultados indicam aumento na absorção de água com o aumento do teor de borracha na argamassa, sendo mais significativo para argamassas com 10% de borracha em sua composição.

Figura 34 - Absorção das argamassas

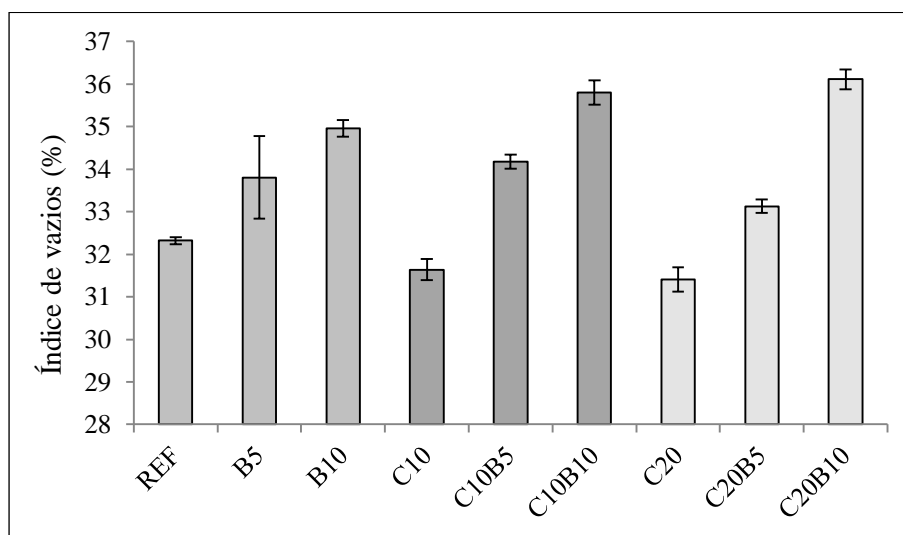


Fonte: Elaborado pela autora (2016).

A quantidade de água absorvida por um material está associada ao índice de vazios presentes em sua microestrutura, que por sua vez, determina a permeabilidade do material. As

argamassas contendo borracha tiveram aumento considerável no índice de vazios comparado com a argamassa de referência, como pode ser observado na Figura 35. Assim, quanto maior o teor de borracha nas argamassas, maior foi o índice de vazios, consequentemente a permeabilidade desses materiais foi maior.

Figura 35 - Índice de vazios das argamassas



Fonte: Elaborado pela autora (2016).

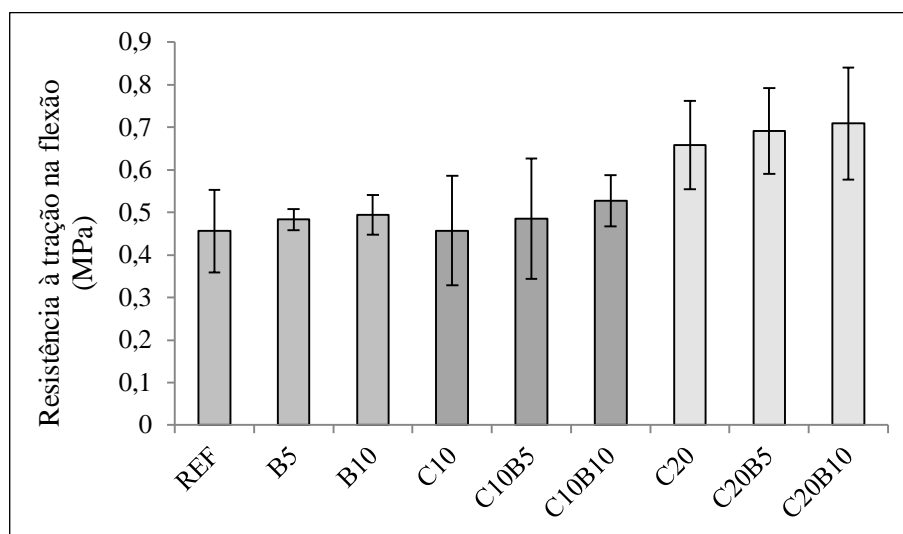
Os resultados referentes à resistência à tração na flexão e resistência à compressão das argamassas aos 28 dias de cura estão apresentados na Tabela 26. Amostras contendo borracha apresentaram aumento na resistência à tração na flexão (Figura 36). Os resultados obtidos para esta propriedade não foram esperados, pois se acreditava que, com o aumento de borracha na composição da argamassa, houvesse diminuição na resistência à tração na flexão. O comportamento de compósitos com adição de borracha nos ensaios de tração foi verificado por Benazzouk *et al.* (2004), onde parte da energia que chega no contorno das partículas de borracha através das microfissuras é absorvida por ela, retardando seu retorno para a matriz de cimento, impedindo que sua ruptura seja breve, assim, a adição de borracha na mistura eleva a energia necessária para a fratura total. O aumento da resistência à tração na flexão, também ocorreu, provavelmente, devido à presença da cinza volante na argamassa. Além disso, pode-se observar grande variabilidade nos resultados, cuja ocorrência, segundo Gonçalves *et al.* (2002), é frequente nos ensaios de resistência à tração na flexão. Embora a resistência à compressão aumentasse com a adição da cinza volante, o pó de borracha contribuiu para a diminuição nos valores da resistência à compressão à medida que foi acrescentado este resíduo nas misturas.

Tabela 26 - Resistência à tração na flexão e resistência à compressão das argamassas

Argamassa	Resistência à tração na flexão 28 dias (MPa)	Resistência à compressão 28 dias (MPa)
REF	$0,45 \pm 0,09$	$3,34 \pm 0,22$
B5	$0,48 \pm 0,02$	$3,11 \pm 0,23$
B10	$0,49 \pm 0,05$	$2,77 \pm 0,22$
C10	$0,45 \pm 0,13$	$3,54 \pm 0,18$
C10B5	$0,48 \pm 0,14$	$2,78 \pm 0,17$
C10B10	$0,53 \pm 0,06$	$2,55 \pm 0,18$
C20	$0,65 \pm 0,10$	$3,67 \pm 0,19$
C20B5	$0,69 \pm 0,10$	$3,10 \pm 0,14$
C20B10	$0,71 \pm 0,13$	$2,62 \pm 0,15$

Fonte: Elaborado pela autora (2016).

Figura 36 - Resistência à tração na flexão das argamassas

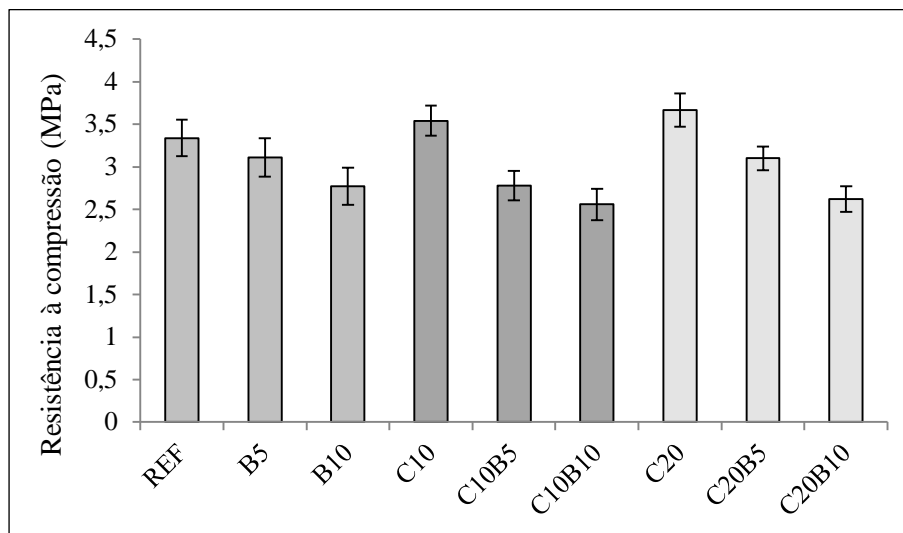


Fonte: Elaborado pela autora (2016).

A resistência à compressão da argamassa contendo 20% de cinza volante aumentou aproximadamente 10% em relação à argamassa de referência, como pode ser observado na Figura 37. Este aumento pode estar relacionado à atividade pozzolânica da cinza leve, 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. Já, argamassas contendo borracha, apresentaram uma diminuição na resistência à compressão. Esta redução pode estar ligada ao aumento no teor de ar incorporado no estado fresco e pelo

fato dos resíduos apresentarem baixa massa específica, sendo esta situação presenciada, também, por Canova, Bergamasco e Angelis Neto (2007). Além disso, a diminuição da resistência à compressão das argamassas pode estar relacionada pela ausência de aderência entre a borracha com a matriz da pasta de cimento, fato presenciado, também, por Segre (1999) e Su *et al.* (2015).

Figura 37 - Resistência à compressão das argamassas



Fonte: Elaborado pela autora (2016).

A ASTM C 270 (ASTM, 2007) estabelece resistências mínimas para alguns tipos de argamassa. Segundo a norma, a resistência aos 28 dias para argamassas contendo cal deve ser superior a 2,40 MPa. De acordo com os resultados obtidos, a argamassa com melhor desempenho contendo os dois resíduos em sua composição foi a argamassa com 20% de cinza + 5% de borracha (C20B5), apresentando resistência à compressão de 3,10 MPa.

#### 4.4.1 Análise estatística da resistência à compressão das argamassas

A Tabela 27 apresenta os resultados da resistência à compressão das argamassas estudadas, incluindo as réplicas das misturas contendo teores variados de borracha e cinza volante, conforme projeto experimental definido. Para este estudo, foi realizado um projeto fatorial  $3^2$  com seis réplicas, considerando os fatores borracha e cinza volante com três níveis diferentes para cada fator, resultando em um projeto com 54 experimentos.

Tabela 27 - Misturas do projeto fatorial 3<sup>2</sup> 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

Fonte: Elaborado pela autora (2016).

A Tabela 28 apresenta a estimativa dos efeitos. Por meio desta tabela é possível verificar que o fator borracha (função linear) apresenta maior efeito no projeto, pois o seu valor-p é inferior ao nível de significância de 5%, apresentando, portanto, evidências mais fortes para a rejeição da hipótese nula que determina a não existência de uma associação entre o fator analisado e a variável resposta. A cinza volante (função quadrática) também apresenta efeito significativo na resistência à compressão das argamassas, assim como a interação linear entre esses fatores. Já o valor-t, que mede a razão entre o coeficiente e o erro padrão para cada fator e interação, também pode ser utilizado para determinar se a hipótese nula deve ser rejeitada, porém o valor-p é usado com mais frequência, pois o limite para a rejeição da hipótese nula não depende do grau de liberdade. Ainda é possível verificar, por meio desta tabela, que a borracha apresenta coeficiente negativo, indicando que este fator contribui para diminuir a resistência à compressão das argamassas. Já o intervalo de confiança apresentado na tabela corresponde a amplitudes de valores que apresentam a probabilidade de conter o

verdadeiro valor de cada termo apresentado. Portanto, é possível ter 95% de certeza que o intervalo de confiança para cada efeito e interação contém o verdadeiro valor de cada termo.

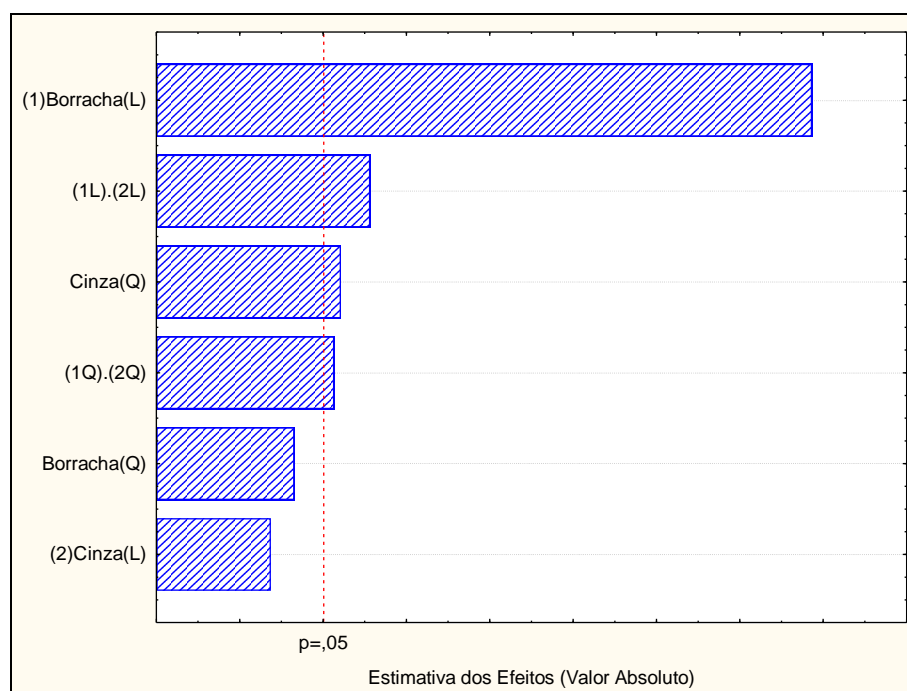
Tabela 28 - Estimativa dos efeitos para a resistência à compressão das argamassas

Fator	Efeito	Erro Padrão	Valor - t	Valor - p	-95%	+95%	Coef.
Intercepto	<b>3,052778</b>	<b>0,025699</b>	<b>118,7903</b>	<b>0,000000</b>	<b>3,00101</b>	<b>3,104538</b>	<b>3,052778</b>
(1)Borracha(L)	<b>-0,864444</b>	<b>0,062949</b>	<b>-13,7324</b>	<b>0,000000</b>	<b>-0,99123</b>	<b>-0,737658</b>	<b>-0,432222</b>
Borracha(Q)	-0,071667	0,054516	-1,3146	0,195302	-0,18146	0,038133	-0,035833
(2)Cinza (L)	0,047222	0,062949	0,7502	0,457060	-0,07956	0,174008	0,023611
Cinza (Q)	<b>-0,132500</b>	<b>0,054516</b>	<b>-2,4305</b>	<b>0,019128</b>	<b>-0,24230</b>	<b>-0,022700</b>	<b>-0,066250</b>
(1L).(2L)	<b>-0,241667</b>	<b>0,077097</b>	<b>-3,1346</b>	<b>0,003028</b>	<b>-0,39695</b>	<b>-0,086386</b>	<b>-0,120833</b>
(1Q).(2Q)	<b>-0,131250</b>	<b>0,057822</b>	<b>-2,2699</b>	<b>0,028054</b>	<b>-0,24771</b>	<b>-0,01479</b>	<b>-0,065625</b>

Fonte: Elaborado pela autora (2016).

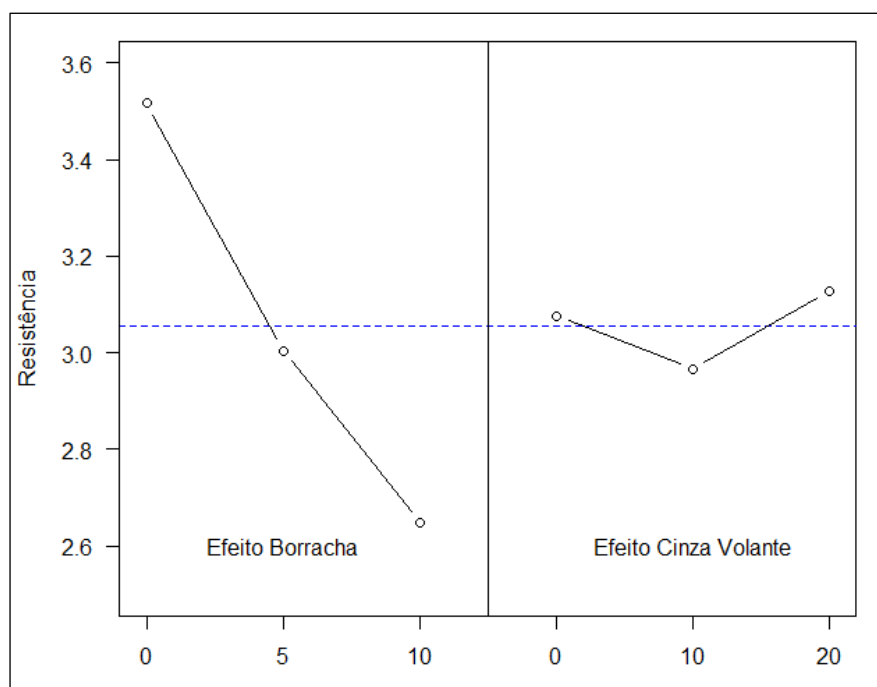
O efeito dos fatores borracha e cinza volante na resistência à compressão também pode se analisado por meio do diagrama de Pareto (Figura 38) e pelo gráfico dos efeitos principais e das interações (Figura 39 e 40). O diagrama de Pareto determina a magnitude e a importância dos efeitos, assim, a borracha 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 (Figura 39) apresenta graficamente as médias de cada grupo, sendo que, quanto maior a inclinação da linha, maior será a magnitude do efeito principal. Logo, a borracha apresenta maior efeito na resistência à compressão quando comparado com a cinza volante. O efeito da interação entre os fatores (Figura 40) está associado à mudança de comportamento do fator borracha nos diferentes níveis do fator cinza volante, evidenciando o seu efeito na variável resposta analisada.

Figura 38 - Diagrama de Pareto para o efeito borracha e cinza volante



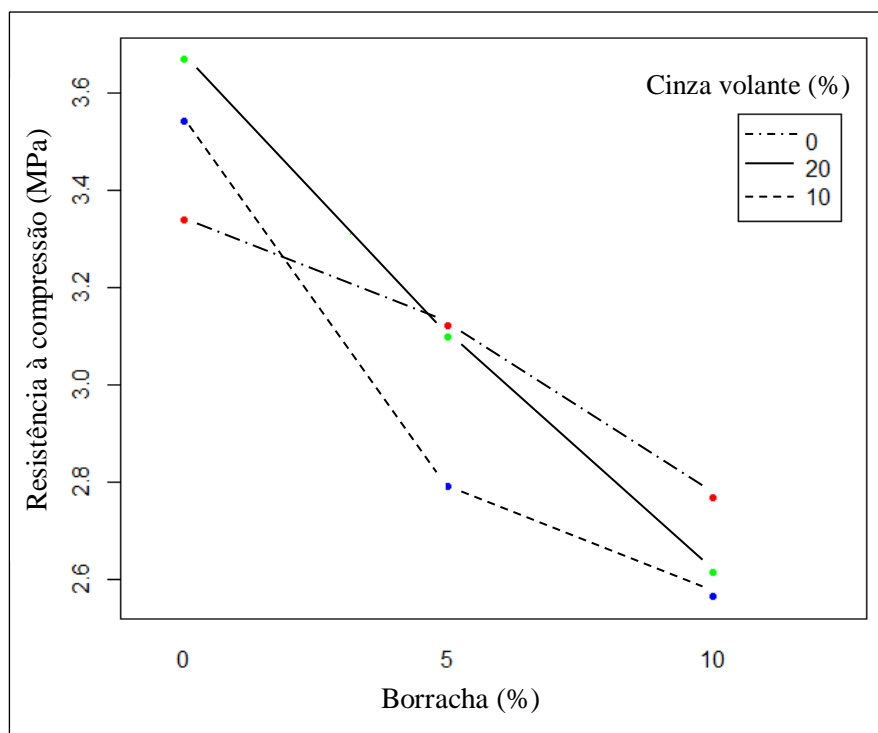
Fonte: Elaborado pela autora (2016).

Figura 39 – Gráfico dos efeitos principais



Fonte: Elaborado pela autora (2016).

Figura 40 – Gráfico dos efeitos das interações



Fonte: Elaborado pela autora (2016).

A análise de variância para os resultados da resistência à compressão das argamassas do projeto fatorial está apresentada na Tabela 29. Para a análise estatística foi adotada um nível de significância ( $\alpha$ ) de 5% para o teste de hipóteses, considerando a hipótese nula que todas as médias da variável resposta são iguais e para a hipótese alternativa considerando que pelo menos uma média dos níveis de fatores são diferentes. Logo,  $p\text{-valor} < \alpha$  a hipótese nula deve ser rejeitada. Também, através do “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 deste 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  $p\text{-valor}$  baixo e a soma dos quadrados é maior comparado com outros fatores. A proporção de variabilidade dos dados que é 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  $p\text{-valor} (0,346) > \alpha (0,05)$ , isso quer dizer que as medidas são iguais nas réplicas.



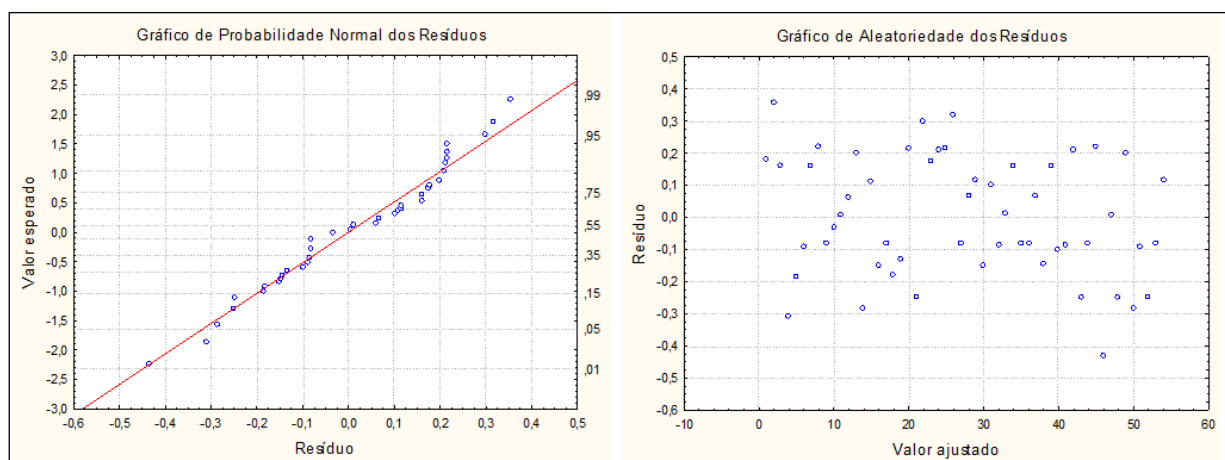
Tabela 29 - Análise de variância da resistência à compressão das argamassas

Fator	Soma dos Quadrados	Grau de Liberdade	Média dos Quadrados	F <sub>0</sub>	p
(1)Borracha(L)	<b>6,7254</b>	<b>1</b>	<b>6,725378</b>	<b>188,5796</b>	<b>0,000000</b>
Borracha(Q)	0,061633	1	0,061633	1,7282	0,195302
(2)Cinza (L)	0,020069	1	0,020069	0,5627	0,457060
Cinza (Q)	<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	0,346013
Erro Puro	1,604850	45	0,035663		
Total	9,234283	53			

Fonte: Elaborado pela autora (2016).

Para avaliar a adequação do modelo da análise de variância (Equação 6), foi necessário analisar os resíduos (diferença entre os valores experimentais e os preditos pela equação do modelo) a respeito das distribuições quanto à normalidade e aleatoriedade. De acordo com a Figura 41 que apresenta o comportamento dos resíduos, 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, no gráfico ao lado, os resíduos não apresentam padrão, ou seja, estão distribuídos de forma aleatória.

Figura 41 - Gráfico de normalidade e aleatoriedade dos resíduos



Fonte: Elaborado pela autora (2016).

Realizou-se, também, o teste de homogeneidade de variância, pois os erros devido aos efeitos dos fatores devem possuir 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. De acordo com o teste Hartley, Cochran e Bartlett não há evidências para rejeição da hipótese nula, pois o valor-p (0,8115) encontrado é maior que o nível de significância de 5%. Portanto, a suposição de homogeneidade é válida, ou seja, as variâncias são constantes.

Para avaliar a magnitude das diferenças entre as médias foi realizado um teste de comparação múltipla (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. A Tabela 30 apresenta os resultados do teste de Tukey.

Tabela 30 - Resultados do teste de Tukey para a resistência à compressão

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

Fonte: Elaborado pela autora (2016).

De acordo com a Tabela 30, é possível verificar que as argamassas contendo apenas cinza volante (Grupo a) são diferentes significativamente dos 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).

A partir dos resultados da análise da variância foi proposto um modelo de regressão para representar o efeito dos fatores estudados na resistência à compressão das argamassas,

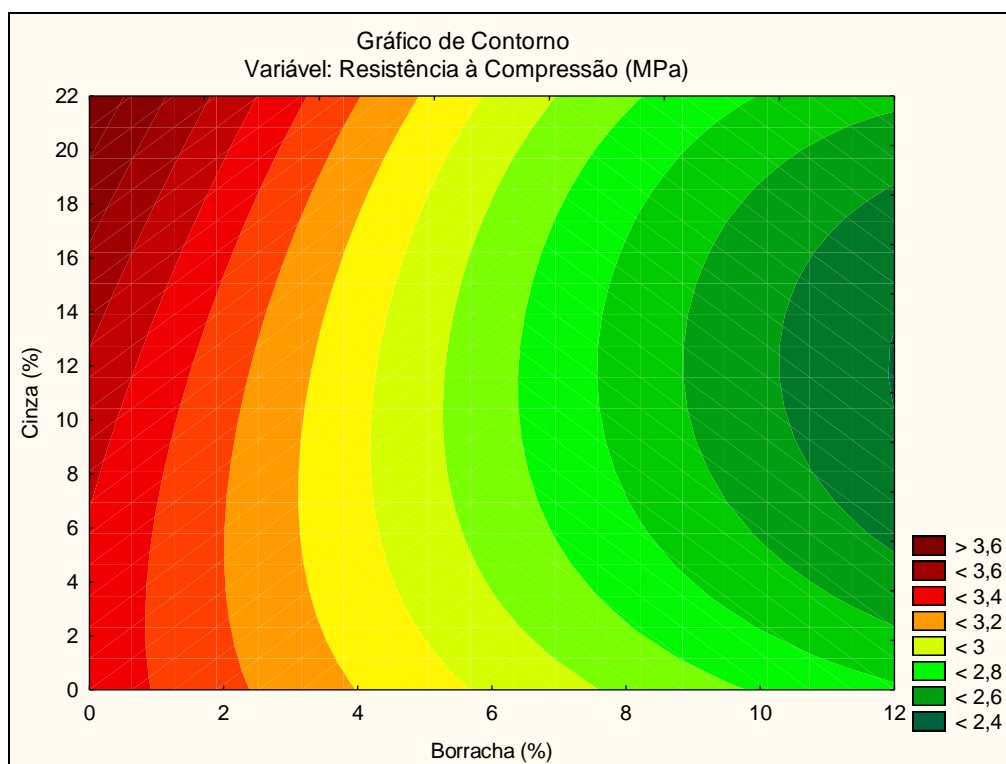
representado pela Equação 32. De acordo com a Equação 32, a borracha contribui para diminuir a resistência à compressão enquanto o fator cinza volante aumenta o seu valor.

$$Y = 3,340 - 0,0304x_1 + 0,0239x_2 - 0,0297(x_1)(x_2) + 0,0013(x_1)(x_2)^2 \quad (32)$$

onde, Y corresponde à resistência à compressão (MPa);  $x_1$  é quantidade de borracha na mistura (%) e  $x_2$  é a quantidade de cinza volante na mistura (%).

Para fazer uma melhor estimativa dos níveis dos fatores para valores específicos de resistência à compressão foi gerado um gráfico de contorno, representado na Figura 42. Assim, para se obter uma resistência à compressão de 3,00 MPa utilizando 10% de cinza volante seria necessário utilizar teor de borracha menor que 4%.

Figura 42 - Gráfico de contorno da resistência à compressão em função dos fatores borracha e cinza volante



Fonte: Elaborado pela autora (2016).

#### 4.5 ANÁLISE DAS ARGAMASSAS CONTENDO CINZA VOLANTE MOÍDA

Com o objetivo de melhorar o desempenho das argamassas com relação à resistência à compressão, foi desenvolvida outra argamassa contendo cinza volante moída. Com isso, possivelmente haverá um aumento na superfície específica, visando uma potencialização da reatividade do material. O tempo de moagem da cinza volante foi de dez minutos em um moinho de bolas.

##### 4.5.1 Atividade pozolânica da cinza volante moída

Com a cinza volante moída, a porcentagem retida na peneira 45  $\mu\text{m}$  foi de 5,8%, sendo este valor bastante inferior ao recomendado pela NBR 5752 (ABNT, 2014a), onde a porcentagem retida nesta peneira deve estar entre 10 e 15% preferivelmente. Os valores obtidos para a análise de atividade pozolânica estão apresentados na Tabela 31.

Tabela 31 - Resultados dos ensaios para atividade pozolânica da cinza moída

	Índice de consistência (mm)	Resistência à compressão (MPa)
Argamassa A	213	35,05 $\pm$ 3,42
Argamassa B	212	27,19 $\pm$ 0,99

Fonte: Elaborado pela autora (2016).

O índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias para a cinza moída foi de 77,6 %. Comparando este resultado com o índice de desempenho da cinza sem ser moída, cujo resultado foi de 75,2%, houve um pequeno aumento na atividade pozolânica em cerca de 2,5%.

##### 4.5.2 Análise das argamassas no estado fresco

Analisando os resultados das argamassas, em geral, aquela que obteve melhor desempenho usando os dois resíduos em sua composição, foi a argamassa com 20% de cinza volante + 5% de borracha. Por este motivo, optou-se por fazer outra argamassa com esta composição, com a única diferença da cinza ser moída.

As propriedades das argamassas no estado fresco estão apresentadas na Tabela 32, sendo CM20 argamassa contendo 20% de cinza moída e CM20B5 argamassa contendo 20% de cinza moída + 5% de borracha.

Por meio da Tabela 32, é possível verificar que não houve diferenças significativas em relação ao teor de ar incorporado e na retenção de água para as argamassas contendo cinza moída comparadas com a argamassa de referência. A retenção de água permaneceu com valores próximos a 80% e o teor de ar incorporado chegou a 5% nas argamassas contendo borracha em sua composição.

Tabela 32 - Propriedades da argamassa no estado fresco contendo cinza moída

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	1,95	255	1,920	5	81
CM20	2,05	265	1,993	1	80
CM20B5	1,94	262	1,920	5	81

Fonte: Elaborado pela autora (2016).

#### 4.5.3 Análise das propriedades das argamassas no estado endurecido

Os resultados obtidos para a massa específica das argamassas no estado endurecido, a absorção de água e o índice de vazios estão apresentados na Tabela 33. Pode-se observar que a absorção de água e o índice de vazios das argamassas contendo cinza moída mantiveram os mesmos resultados em relação à argamassa contendo cinza sem ser moída.

A Tabela 34 apresenta os resultados obtidos para a resistência à compressão das argamassas aos 28 dias e para a resistência à tração na flexão. É possível verificar que a adição de cinza volante na mistura aumentou essas duas propriedades mecânicas da argamassa.

Tabela 33 - Massa específica, absorção de água e índice de vazios das argamassas contendo cinza volante moída

Argamassa	Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )	Absorção de água (%)	Índice de vazios (%)
REF	2,602	18,36 ± 0,03	32,32 ± 0,08
B5	2,498	20,93 ± 1,65	34,30 ± 0,97
C20	2,569	17,83 ± 0,17	31,41 ± 0,28
C20B5	2,519	19,67 ± 0,03	33,14 ± 0,16
CM20	2,588	17,62 ± 0,23	31,33 ± 0,30
CM20B5	2,542	20,49 ± 1,59	32,97 ± 0,09

Fonte: Elaborado pela autora (2016).

Tabela 34 – Resistência à tração na flexão e resistência à compressão das argamassas com cinza volante moída

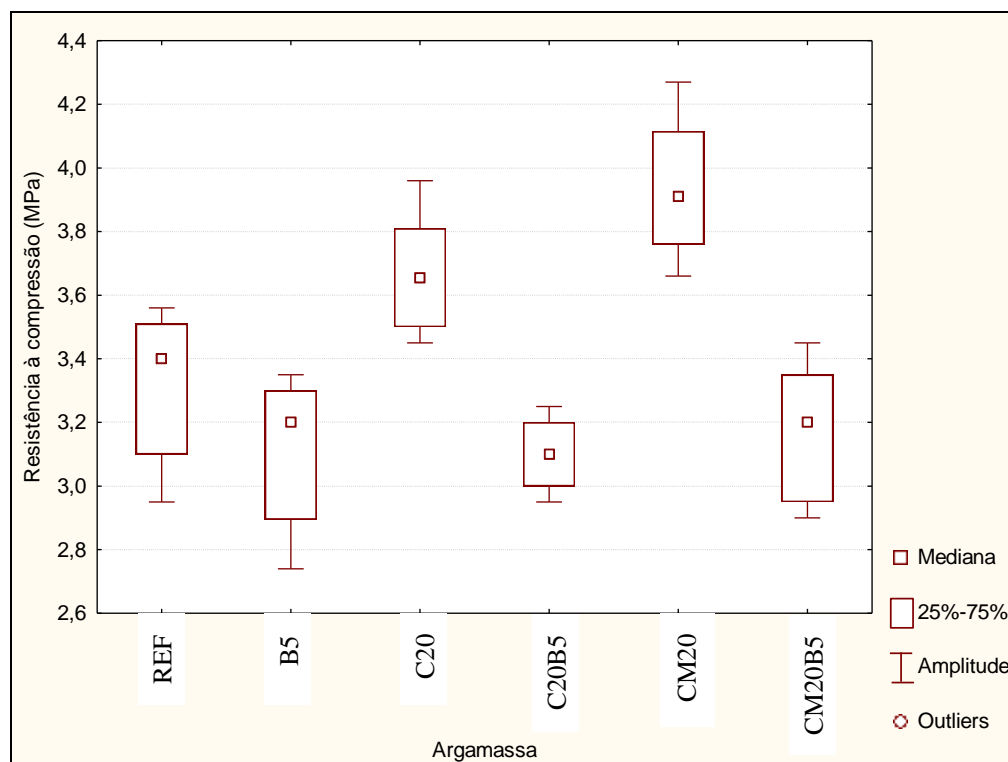
Argamassa	Resistência à tração na flexão 28 dias (MPa)	Resistência à compressão 28 dias (MPa)
REF	0,45 ± 0,09	3,34 ± 0,22
B5	0,48 ± 0,02	3,11 ± 0,23
C20	0,65 ± 0,10	3,67 ± 0,19
C20B5	0,69 ± 0,10	3,10 ± 0,14
CM20	1,26 ± 0,44	3,95 ± 0,22
CM20B5	1,37 ± 0,34	3,17 ± 0,25

Fonte: Elaborado pela autora (2016).

Por meio da Figura 43 é possível verificar a distribuição dos dados referente à resistência à compressão das argamassas. Algumas argamassas apresentaram maior dispersão dos resultados, que pode estar relacionada a variáveis inerentes à geometria, dimensões, grau de compactação e planicidade dos corpos de prova. Pode-se verificar também que a adição de 20% de cinza volante moída ocasionou um aumento na resistência média à compressão aos 28 dias da argamassa. Comparando com a argamassa de referência, este aumento foi de aproximadamente 18%. Em relação à argamassa contendo 20% de cinza sem ser moída, a resistência média à compressão aumentou cerca de 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. O mesmo pode ser observado nas argamassas contendo cinza moída com 5% de borracha, onde a resistência média à compressão teve um pequeno aumento comparado com as outras argamassas contendo a mesma quantidade de resíduo. Contudo, a moagem do resíduo implicou em um aumento na resistência mecânica da argamassa sem alterar outras propriedades, como retenção e absorção de água, teor de ar incorporado e índice de vazios.

Figura 43 - Resistência à compressão das argamassas com cinza volante moída



Fonte: Elaborado pela autora (2016).

O resultado do módulo de elasticidade da argamassa de referência e das argamassas contendo cinza volante moída e borracha está apresentada na Tabela 35. Os valores médios obtidos indicam a rigidez do material e está associada com a sua porosidade.

Tabela 35 - Módulo de elasticidade das argamassas

Argamassa	Módulo de elasticidade longitudinal (E) (GPa)	Módulo de elasticidade transversal (G) (GPa)
REF	3,84 ± 0,04	4,27 ± 0,02
CM20M	3,41 ± 0,03	5,95 ± 0,03
CM20B5	3,78 ± 0,04	4,04 ± 0,02

Fonte: Elaborado pela autora (2016).

Os resultados mostram que a adição de borracha na argamassa diminui o módulo de elasticidade longitudinal e aumenta o índice de vazios comparado com as outras argamassas. Esta redução do módulo contribui na capacidade da argamassa de revestimento absorver pequenas deformações. De acordo com Mehta e Monteiro (1994), a resistência à compressão e o módulo de elasticidade são propriedades inter-relacionadas, que são influenciadas pela porosidade, visto que, quanto menor a porosidade, maior o módulo de elasticidade.

#### 4.5.4 Análise estatística da resistência à compressão das argamassas contendo cinza volante moída

A Tabela 36 apresenta os resultados da resistência à compressão das argamassas ensaiadas, incluindo as réplicas das misturas contendo teores variados de borracha e cinza volante, conforme projeto experimental definido. Para este estudo, foi realizado um projeto fatorial  $2^2$  com seis réplicas, considerando os fatores borracha e cinza volante com dois níveis diferentes para cada fator, resultando em um projeto com 24 experimentos.

Tabela 36 - Misturas do projeto fatorial  $2^2$  e resultado da resistência à compressão das argamassas

Mistura	Borracha (%)	Cinza volante moída (%)	Réplica	Resistência à compressão (MPa)	Mistura	Borracha (%)	Cinza volante (%)	Réplica	Resistência à compressão (MPa)
1	0	0	1	3,56±0,15	17	0	0	4	3,45±0,08
2	5	0	1	2,74±0,36	18	5	0	4	3,15±0,14
3	0	20	1	3,76±0,31	19	0	20	4	4,20±0,18
4	5	20	1	2,85±0,17	20	5	20	4	3,25±0,21
5	0	0	2	3,35±0,07	21	0	0	5	3,45±0,35
6	5	0	2	3,25±0,07	22	5	0	5	2,95±0,21
7	0	20	2	3,76±0,13	23	0	20	5	3,95±0,07
8	5	20	2	3,10±0,18	24	5	20	5	2,95±0,17
9	0	0	3	3,25±0,14	25	0	0	6	2,95±0,21
10	5	0	3	3,35±0,14	26	5	0	6	3,25±0,07
11	0	20	3	4,20±0,18	27	0	20	6	3,66±0,20
12	5	20	3	3,35±0,07	28	5	20	6	3,55±0,39

Fonte: Elaborado pela autora (2016).



A estimativa dos efeitos pode ser verificada por meio da Tabela 37, onde o fator borracha (função linear) apresenta maior efeito no projeto, pois o seu valor-p é inferior ao nível de significância de 5%, apresentando, portanto, evidências mais fortes para a rejeição da hipótese nula que determina a não existência de uma associação entre o fator analisado e a variável resposta. A cinza moída (função linear) também produz um efeito significativo na resistência à compressão das argamassas para nível de significância de 5%; este efeito é bem maior se comparado com a cinza que não passou pelo processo de moagem. A interação linear entre os fatores principais também apresenta efeito na variável resposta e contribui para diminuir a resistência à compressão. A cinza moída, ao contrário da borracha, aumenta a resistência à compressão das argamassas, isto é possível verificar analisando o seu coeficiente na Tabela 37, que apresenta um valor positivo. O intervalo de confiança de 95% para os efeitos principais e para a interação entre eles corresponde a amplitudes de valores, que apresenta a probabilidade de conter o verdadeiro valor de cada termo.

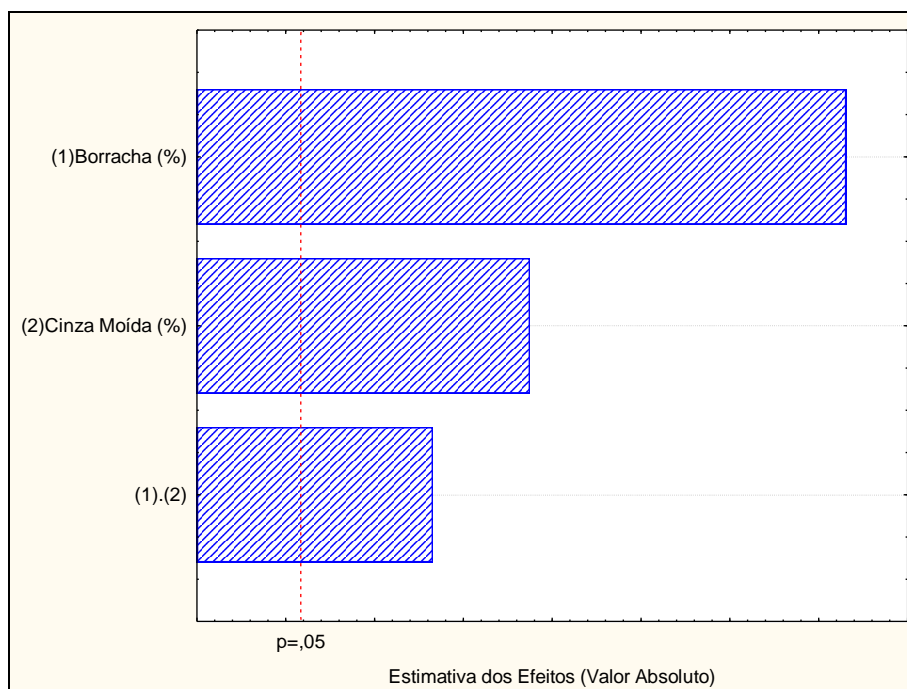
Tabela 37 - Estimativa dos efeitos para a resistência à compressão das argamassas contendo cinza volante moída

Fator	Efeito	Erro padrão	Valor - t	Valor - p	-95%	+95%	Coef.
Intercepto	<b>3,38458</b>	<b>0,04728</b>	<b>71,57509</b>	<b>0,00000</b>	<b>3,28594</b>	<b>3,48322</b>	<b>3,38458</b>
(1)Borracha	<b>-0,48750</b>	<b>0,09457</b>	<b>-5,15468</b>	<b>0,00005</b>	<b>-0,6847</b>	<b>-0,29022</b>	<b>-0,24375</b>
(2)Cinza moída	<b>0,31916</b>	<b>0,09457</b>	<b>3,37477</b>	<b>0,00301</b>	<b>0,12188</b>	<b>0,51644</b>	<b>0,15958</b>
(1).(2)	<b>-0,26750</b>	<b>0,09457</b>	<b>-2,82846</b>	<b>0,01038</b>	<b>-0,4647</b>	<b>-0,07022</b>	<b>-0,13375</b>

Fonte: Elaborado pela autora (2016).

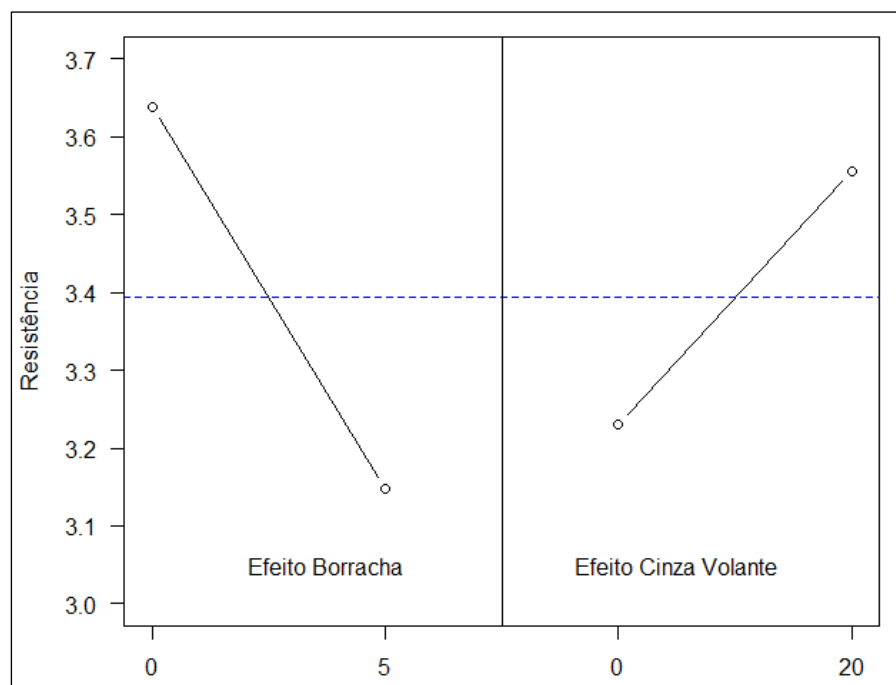
O efeito dos fatores borracha e cinza volante moída na resistência à compressão também pode ser analisado por meio do diagrama de Pareto (Figura 44) e pelo gráfico dos efeitos principais e das interações (Figura 45 e 46). O diagrama de Pareto determina a magnitude e a importância dos efeitos, assim, a borracha apresenta ser o efeito mais significativo, pois seu valor ultrapassa a linha de referência para o nível de significância de 5%. No gráfico dos efeitos principais (Figura 45), a borracha apresenta maior inclinação da linha, indicando maior efeito na resistência à compressão quando comparado com a cinza volante moída. O efeito da interação entre os fatores principais (Figura 46) representa a mudança de comportamento do fator borracha nos diferentes níveis do fator cinza volante moída, evidenciando o seu efeito na variável resposta analisada.

Figura 44 - Diagrama de Pareto para o efeito borracha e cinza volante moída



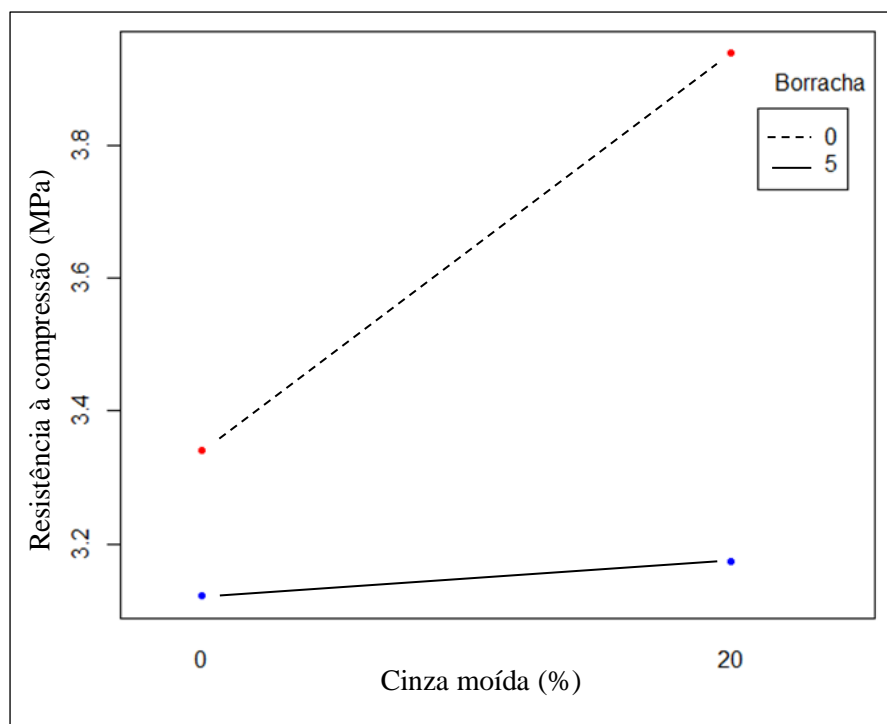
Fonte: Elaborado pela autora (2016).

Figura 45 – Gráfico dos efeitos principais



Fonte: Elaborado pela autora (2016).

Figura 46 – Gráfico dos efeitos das interações



Fonte: Elaborado pela autora (2016).

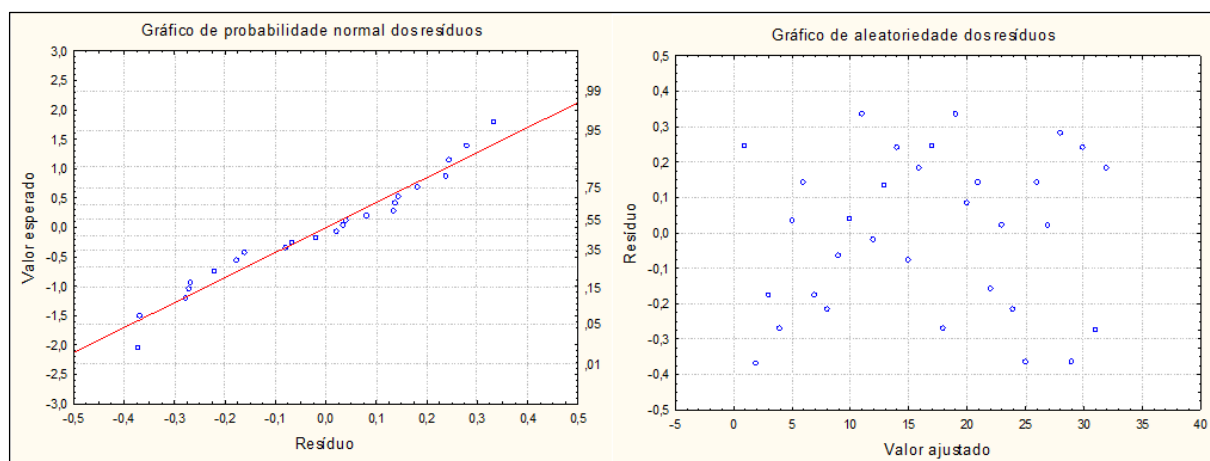
A análise de variância para os resultados da resistência à compressão das argamassas está apresentada na Tabela 38. Para a análise estatística foi adotada um nível de significância ( $\alpha$ ) de 5% para o teste de hipóteses, considerando a hipótese nula que todas as médias da variável resposta são iguais e para a hipótese alternativa considerando que pelo menos uma média dos níveis de fatores são diferentes. 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 outros fatores. A proporção de variabilidade dos dados explicada pelos fatores estudados (borracha e cinza volante moída) foi de 0,70 ( $R^2$ ), indicando que os fatores e seus efeitos representam 70% da variabilidade das medidas. O modelo da equação da análise de variância, representado pela Equação 6, pode ser considerado adequado, pois os resíduos (diferença entre os valores experimentais e os preditos pela equação do modelo) apresentam normalidade e aleatoriedade, pois os resíduos encontram-se distribuídos, aproximadamente, ao longo de uma linha reta e, no gráfico ao lado, os resíduos não apresentam padrão, ou seja, estão distribuídos de forma aleatória, como pode ser observado pela Figura 47.

Tabela 38 - Análise de variância da resistência à compressão das argamassas contendo cinza volante moída

Fator	Soma dos Quadrados	Grau de Liberdade	Média dos Quadrados	F <sub>0</sub>	p
(1) Borracha	<b>1,425938</b>	<b>1</b>	<b>1,425938</b>	<b>26,57068</b>	<b>0,000048</b>
(2) Cinza moída	<b>0,611204</b>	<b>1</b>	<b>0,611204</b>	<b>11,38907</b>	<b>0,003011</b>
(1).(2)	<b>0,429338</b>	<b>1</b>	<b>0,429338</b>	<b>8,00020</b>	<b>0,010382</b>
Erro Puro	1,073317	20	0,053666		
Total	3,539796	23			

Fonte: Elaborado pela autora (2016).

Figura 47 - Gráfico de normalidade e aleatoriedade dos resíduos



Fonte: Elaborado pela autora (2016).

Realizou-se, também, o teste de homogeneidade de variância, pois os erros devido aos efeitos dos fatores devem possuir 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. De acordo com o teste Hartley, Cochran e Bartlett não há evidências para rejeição da hipótese nula, pois o valor-p (0,1148) encontrado é maior que o nível de significância de 5%. Portanto, a suposição de homogeneidade é válida, ou seja, as variâncias são constantes.

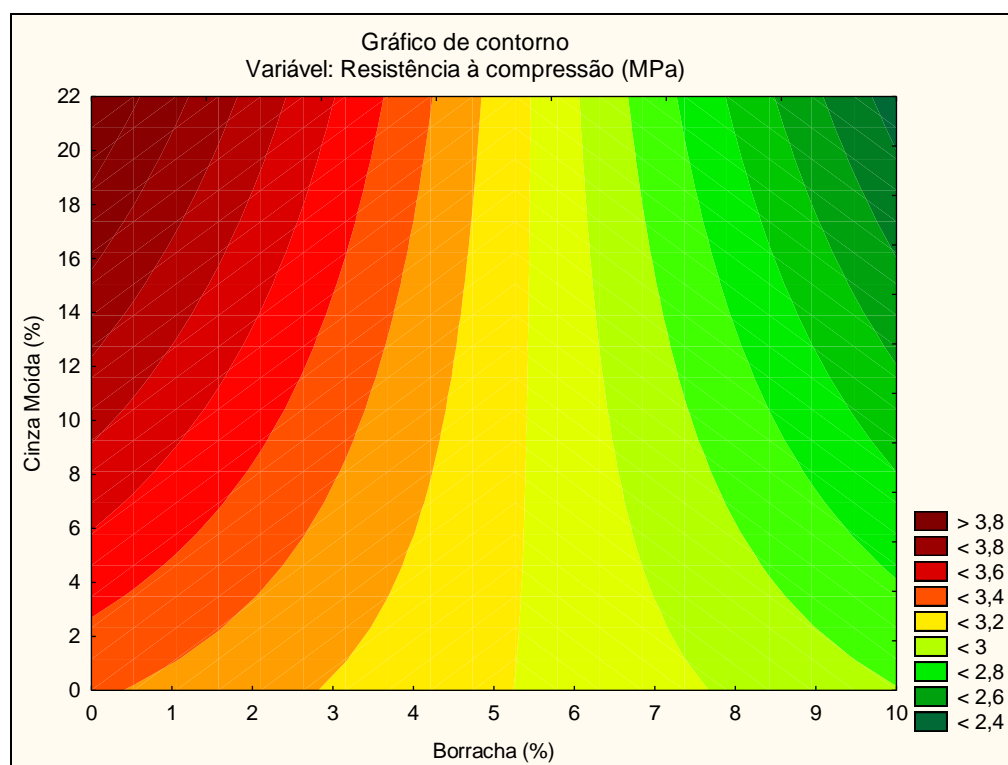
A partir dos resultados da análise da variância foi proposto um modelo de regressão para representar o efeito dos fatores estudados na resistência à compressão das argamassas contendo cinza volante moída, representado pela Equação 33. De acordo com esta equação, a borracha contribui para diminuir a resistência à compressão enquanto a cinza volante moída aumenta o seu valor.

$$Y = 3,340 - 0,0437x_1 + 0,0299x_2 - 0,0054(x_1)(x_2) \quad (33)$$

onde, Y corresponde à resistência à compressão (MPa);  $x_1$  é quantidade de borracha na mistura (%) e  $x_2$  é a quantidade de cinza volante na mistura (%).

Para fazer uma melhor estimativa dos níveis dos fatores para valores específicos de resistência à compressão das argamassas contendo cinza volante moída, foi gerado um gráfico de contorno, representado na Figura 48. Assim, para se obter uma argamassa com resistência à compressão maior que 3,00 MPa e utilizando 10% de cinza volante moída, a quantidade de borracha a ser adicionada na mistura não deverá ser maior que 6%.

Figura 48 - Gráfico de contorno da resistência à compressão em função dos fatores borracha e cinza volante moída



Fonte: Elaborado pela autora (2016).

#### 4.5.5 Resistência de aderência à tração e análise estatística dos resultados

Os resultados do teste de resistência de aderência à tração da argamassa de referência (REF) e da argamassa contendo 20% de cinza moída + 5% de borracha (CM20B5) estão apresentados nas Tabelas 39 e 40 respectivamente.

Tabela 39 - Resultados do ensaio de resistência de aderência à tração da argamassa de referência

CP	Diâmetro (mm)			Área (mm <sup>2</sup> )	Local de ensaio		Carga de ruptura (N)	Tensão de ruptura (MPa)	Forma de ruptura	Profundidade de ruptura (mm)
	d1	d2	dm		Bloco	Junta				
1	48,10	49,70	48,90	1878,05	X		680	0,36	B (na interface substrato/chapisco)	15,10
2	47,25	48,60	47,92	1803,53	X		480	0,27	B (na interface substrato/chapisco)	13,92
3	46,70	49,70	48,20	1824,67		X	570	0,31	A (50% no substrato) / C (50% no chapisco)	13,70
4	47,50	49,85	48,67	1860,43	X		420	0,23	B (na interface substrato/chapisco)	13,95
5	46,55	47,25	46,90	1727,57	X		630	0,36	A (no substrato)	13,75
6	46,45	48,25	47,35	1760,88	X		580	0,33	D (na interface chapisco/argamassa)	13,05
7	49,70	46,35	48,02	1811,44	X		640	0,35	D (na interface chapisco/argamassa)	10,58
8	47,15	49,75	48,45	1843,64		X	710	0,38	A (50% no substrato) / C (50% no chapisco)	12,80
9	48,60	49,40	49,00	1885,74	X		660	0,35	A (no substrato)	13,45
10	48,05	49,15	48,60	1855,08	X		310	0,17	D (na interface chapisco/argamassa)	8,95
11	44,80	47,60	46,20	1676,38		X	560	0,33	D (na interface chapisco/argamassa)	12,52
12	46,30	47,85	47,07	1740,49	X		590	0,34	E (na argamassa)	5,85
Média Tensão de Ruptura = $0,31 \pm 0,06$ MPa										
Umidade média do revestimento = $1,61 \% \pm 0,14$										
Espessura média do revestimento = $14,28 \text{ mm} \pm 0,28$										

Fonte: Elaborado pela autora (2017).

Tabela 40 - Resultados do ensaio de resistência de aderência à tração da argamassa CM20B5

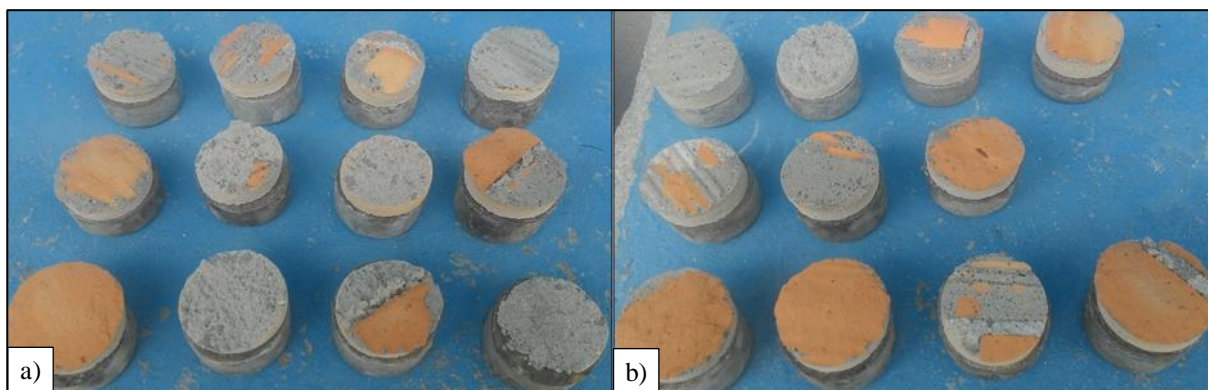
CP	Diâmetro (mm)			Área (mm <sup>2</sup> )	Local de ensaio		Carga de ruptura (N)	Tensão de ruptura (MPa)	Forma de ruptura	Profundidade de ruptura (mm)
	d1	d2	dm		Bloco	Junta				
1	50,35	50,15	50,25	1983,18	X		400	0,20	B (na interface substrato/chapisco)	16,28
2	49,35	47,30	48,32	1833,76	X		420	0,23	D (na interface chapisco/argamassa)	11,52
3	49,20	47,50	48,35	1836,04		X	840	0,46	A (50% no substrato) / C (50% no chapisco)	15,80
4	48,65	46,05	47,35	1760,88	X		750	0,43	A (no substrato)	15,58
5	46,10	50,35	48,22	1826,18	X		640	0,35	A (10% no substrato) / C (90% no chapisco)	15,22
6	47,40	46,70	47,05	1738,64	X		520	0,30	B (na interface substrato/chapisco)	11,95
7	49,40	48,10	48,75	1866,55	X		850	0,46	A (no substrato)	13,80
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	48,00	49,45	48,72	1864,25	X		340	0,18	A (no substrato)	14,68
10	47,95	47,85	47,90	1802,02	X		600	0,33	A (no substrato)	10,70
11	47,85	47,40	47,62	1781,02		X	540	0,30	A (no substrato)	12,62
12	48,75	46,80	47,27	1754,93		X	730	0,42	B (na interface substrato/chapisco)	11,10
Média Tensão de Ruptura = $0,33 \pm 0,10$ MPa										
Umidade média do revestimento = $1,89 \% \pm 0,24$										
Espessura média do revestimento = $13,37 \text{ mm} \pm 0,17$										

Fonte: Elaborado pela autora (2017).

Para a argamassa de referência, a forma de ruptura dos corpos de prova ocorreu com maior frequência na interface substrato/chapisco e chapisco/argamassa. Neste caso, o valor da resistência de aderência à tração é igual ao valor obtido no ensaio. Já para o revestimento de argamassa contendo cinza volante moída e borracha (CM20B5), a forma de ruptura dos corpos de prova ocorreu no substrato e também na interface substrato/chapisco e chapisco/argamassa. Segundo a NBR 13528 (ABNT, 2010), quando a forma de ruptura ocorre

no substrato, a resistência de aderência é maior do que o valor obtido no ensaio. A Figura 49 apresenta as formas de ruptura que ocorreram nas duas argamassas estudadas.

Figura 49 - Ruptura dos corpos de prova no teste de resistência de aderência à tração, (a) argamassa de referência, (b) argamassa contendo cinza volante moída + borracha



Fonte: Elaborado pela autora (2017).

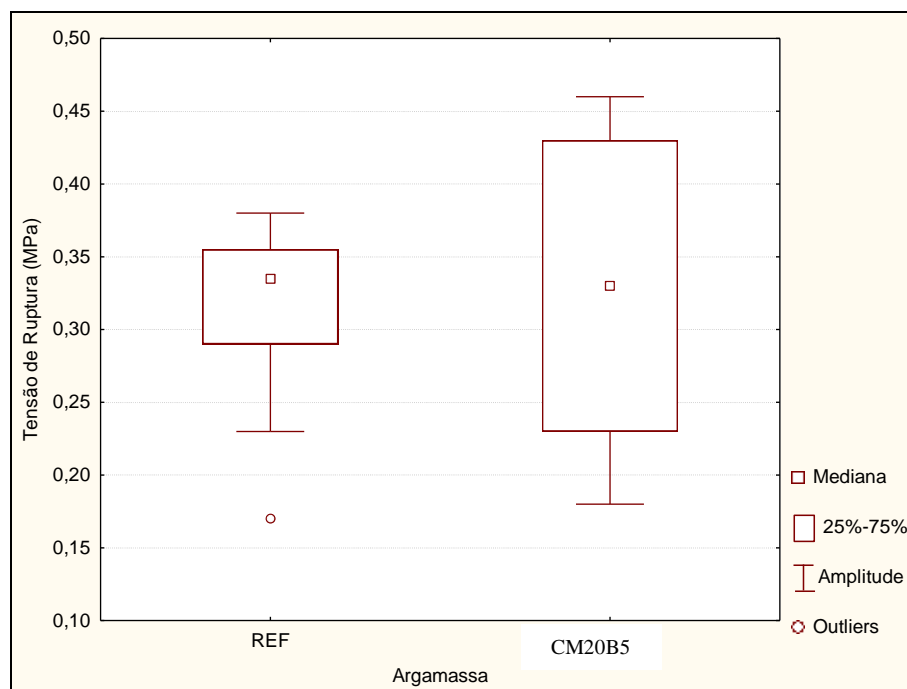
As resistências de aderência à tração tanto da argamassa de referência quanto da argamassa contendo os resíduos atenderam os limites prescritos pela NBR 13749 (ABNT, 2013), pois apresentaram valores iguais ou superiores a 0,30 MPa em, no mínimo, 8 dos 12 corpos de provas, sendo possível, portanto, o uso dessas argamassas para revestimento em paredes internas e externas.

Por meio da Figura 50, é possível verificar que a argamassa CM20B5 apresenta maior variabilidade dos dados com valor médio da tensão de ruptura bem próximo do valor de referência. Assim, a resistência de aderência à tração entre as argamassas estudadas não teve uma diferença significativa. Isso pode ser comprovado com a análise de variância, que indicou um p-valor maior do que o nível de significância considerado de 5%, como mostra a Tabela 41.

A adequação do modelo da análise de variância, representada pela Equação 6, foi avaliada por meio da análise dos resíduos (diferença entre os valores experimentais e os preditos pela equação do modelo) a respeito das distribuições quanto à normalidade e aleatoriedade. De acordo com a Figura 51, que apresenta o comportamento dos resíduos, o modelo da Equação 6 é adequado para descrever o comportamento da resistência de aderência à tração das argamassas estudadas.



Figura 50 - Resistência de aderência à tração das argamassas



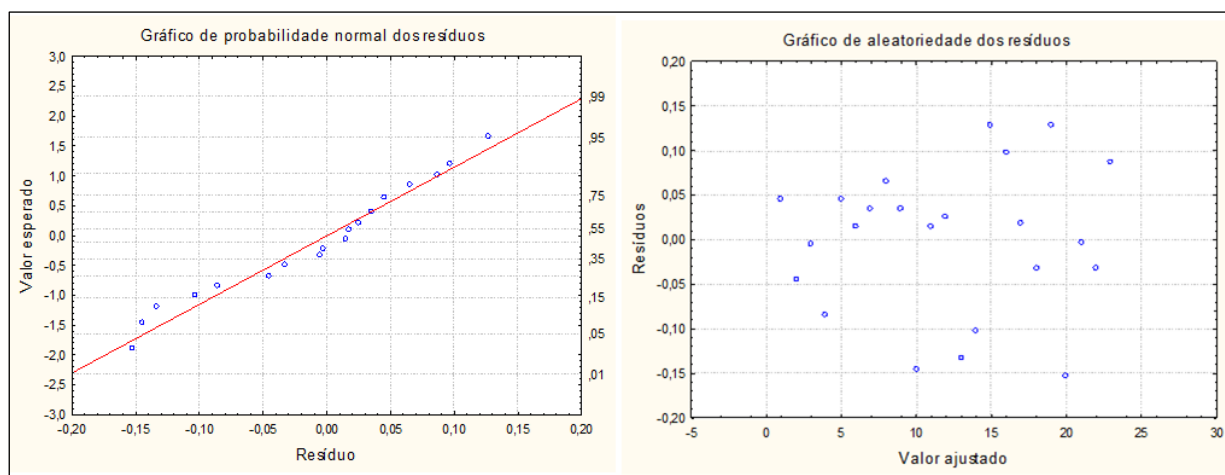
Fonte: Elaborado pela autora (2017).

Tabela 41 - Análise de variância da resistência de aderência à tração das argamassas

Fator	Soma dos Quadrados	Grau de Liberdade	Média dos Quadrados	F <sub>0</sub>	p
Intercepto	2,406678	1	2,406678	347,3122	0,000000
Argamassa	<b>0,001804</b>	<b>1</b>	<b>0,001804</b>	<b>0,2603</b>	<b>0,615252</b>
Erro	0,145518	21	0,006929		

Fonte: Elaborado pela autora (2017).

Figura 51 - Gráfico de normalidade e aleatoriedade dos resíduos



Fonte: Elaborado pela autora (2017).

Para verificar se os erros devido aos efeitos dos fatores possuem variância constante, foi realizado o teste Hartley, Cochran e Bartlett. De acordo com o teste, não há evidências para rejeição da hipótese nula, pois o valor-p (0,1205) encontrado é maior que o nível de significância de 5%. Portanto, a suposição de homogeneidade é válida.

Assim, as argamassas deste estudo não apresentaram diferenças significativas em relação à resistência média de aderência à tração, fato presenciado também pela pesquisa realizada por Canova, Bergamasco e Angelis Neto (2007). Eles verificaram que a adição de borracha na argamassa não afetou a resistência de aderência em relação à argamassa de controle, onde os valores encontrados não foram superiores a 0,20 MPa, diferente deste estudo, cujo valor para a resistência de aderência à tração foi maior que 0,30MPa.

#### **4.5.6 Resistência das argamassas ao ataque por sulfatos**

Os resultados das variações de massa durante o ensaio de ataque por sulfato de sódio da argamassa de referência (REF) e da argamassa contendo 20% de cinza volante moída + 5% de borracha (CM20B5) pode ser observado nas Tabelas 42 e 43 respectivamente. Foram realizados 31 ciclos de molhagem e secagem. Durante este período, verificou-se que as duas argamassas estudadas tiveram aumento de massa até o 11º ciclo; logo em seguida foi constatado danos nas bordas e cantos dos corpos de prova, além do aparecimento de fissuras. Essas fissuras contribuíram para que a água agressiva penetrasse com maior facilidade em seu interior, acarretando a perda progressiva de massa.

A argamassa de referência apresentou maior perda de massa comparada com a argamassa contendo cinza volante e borracha, como pode ser observado pela Figura 52. No 21º ciclo, verificou-se que a argamassa de referência já havia perdido cerca de 50% de sua massa, enquanto a argamassa CM20B5 tinha perdido aproximadamente 25%. Após o último ciclo, foi constatada a perda de 40% de massa para a argamassa contendo a cinza volante e borracha e, mais de 60% de perda de massa para a argamassa de referência.

A deterioração dos corpos de prova das argamassas estudadas em relação ao número de ciclos está ilustrada na Figura 53. É possível verificar que, inicialmente, as argamassas apresentaram um aspecto esbranquiçado, característico do ataque por sulfatos.

Assim, a argamassa contendo cinza volante apresentou ser menos vulnerável ao ataque por sulfato de sódio, o que também foi verificado por Yildirim e Sümer (2013), pois a cinza volante preenche os espaços vazios da pasta de cimento formando um gel C-S-H adicional, reduzindo a permeabilidade e a entrada de íons sulfato.

Tabela 42 - Resultado das variações de massa da argamassa de referência durante o ensaio de ataque por sulfato de sódio

Ciclos	Variação de massa (g)		Variação de massa (%)		Média (%)
	REF-01	REF-02	REF-01	REF-02	
01	418,73	424,30	0,00	0,00	0,00
02	421,04	426,74	0,55	0,57	0,56
03	423,43	429,31	1,12	1,18	1,15
04	425,76	431,15	1,68	1,61	1,64
05	427,00	432,50	1,97	1,94	1,95
06	426,80	434,79	1,93	2,47	2,20
07	427,52	435,66	2,10	2,68	2,39
08	428,30	436,53	2,28	2,88	2,58
09	428,80	436,90	2,40	2,97	2,69
10	429,13	437,26	2,48	3,05	2,76
11	429,58	437,56	2,59	3,12	2,86
12	388,81	401,56	-7,14	-5,36	-6,25
13	368,72	380,26	-11,94	-10,38	-11,16
14	357,20	367,80	-14,69	-13,32	-14,00
15	343,42	357,00	-17,98	-15,86	-16,92
16	326,24	330,82	-22,09	-22,03	-22,06
17	288,04	294,50	-31,21	-30,59	-30,90
18	274,00	281,50	-34,56	-33,65	-34,10
19	264,00	269,50	-36,95	-36,48	-36,72
20	230,50	257,00	-44,95	-39,43	-42,19
21	163,00	247,00	-61,07	-41,79	-51,43
22	152,50	239,00	-63,58	-43,67	-53,62
23	149,00	237,00	-64,42	-44,14	-54,28
24	146,00	233,50	-65,13	-44,97	-55,05
25	132,00	229,50	-68,48	-45,91	-57,20
26	129,50	226,00	-69,07	-46,73	-57,90
27	127,00	225,00	-69,67	-46,97	-58,32
28	107,50	221,00	-74,33	-47,91	-61,12
29	104,00	215,00	-75,16	-49,33	-62,24
30	101,50	211,00	-75,76	-50,57	-63,01
31	97,50	207,50	-76,72	-51,10	-63,91

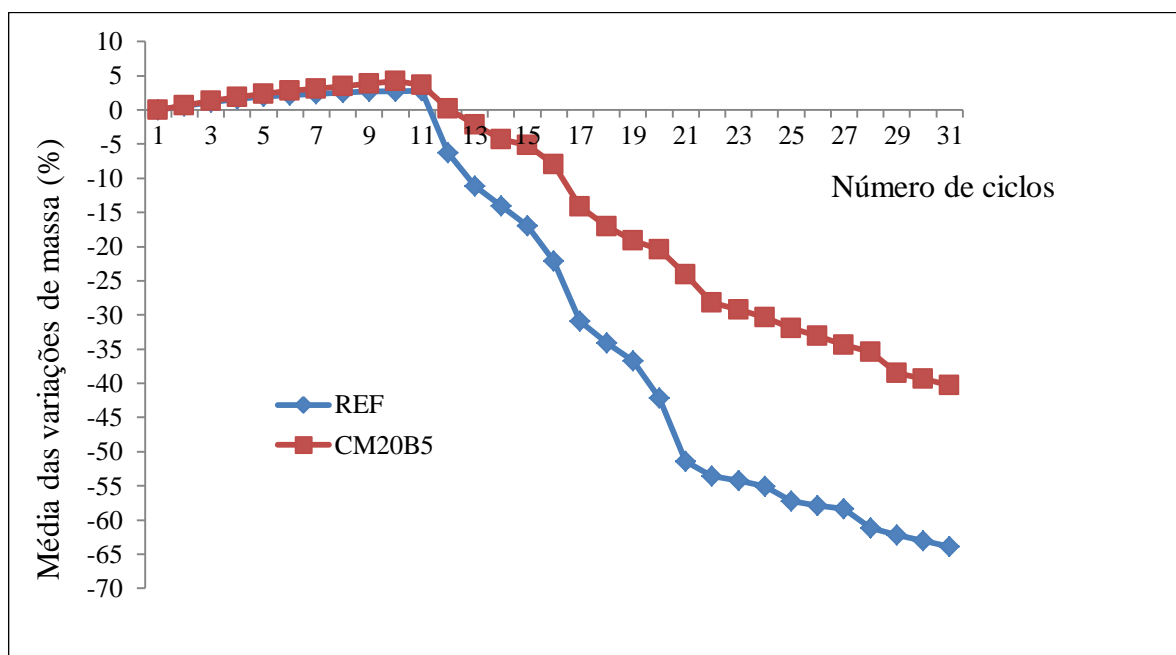
Fonte: Elaborado pela autora (2017).

Tabela 43 - Resultado das variações de massa da argamassa contendo 20% de cinza volante moída + 5% borracha durante o ensaio de ataque por sulfato de sódio

Ciclos	Variação de massa (g)		Variação de massa (%)		Média (%)
	CM20B5-01	CM20B5-02	CM20B5-01	CM20B5-02	
01	416,85	417,11	0,00	0,00	0,00
02	419,44	419,88	0,62	0,66	0,64
03	422,21	422,71	1,28	1,34	1,31
04	424,65	424,22	1,87	1,94	1,90
05	426,50	427,00	2,31	2,37	2,34
06	428,43	428,66	2,78	2,77	2,78
07	429,80	430,20	3,11	3,14	3,12
08	431,34	431,90	3,48	3,55	3,52
09	432,89	433,44	3,85	3,92	3,88
10	434,40	434,77	4,21	4,23	4,22
11	432,91	431,49	3,85	3,45	3,65
12	412,87	422,50	-0,95	1,29	0,17
13	406,53	409,51	-2,47	-1,82	-2,14
14	393,18	404,68	-5,68	-2,98	-4,33
15	388,35	402,50	-6,84	-3,50	-5,17
16	382,53	385,30	-8,23	-7,63	-7,93
17	346,82	369,42	-16,80	-11,43	-14,11
18	333,50	358,00	-19,99	-14,17	-17,08
19	321,50	353,50	-22,87	-15,25	-19,06
20	314,00	350,00	-24,67	-16,09	-20,38
21	300,50	332,50	-27,91	-20,28	-24,10
22	281,00	317,50	-32,59	-23,88	-28,23
23	275,00	315,00	-34,03	-24,48	-29,25
24	272,00	308,50	-34,75	-26,04	-30,39
25	264,00	304,00	-36,67	-27,12	-31,90
26	257,50	301,00	-38,23	-27,83	-33,03
27	255,00	293,00	-38,83	-29,99	-34,41
28	249,50	289,50	-40,15	-30,59	-35,37
29	237,50	275,50	-43,02	-33,95	-38,48
30	234,00	272,00	-43,86	-34,79	-39,32
31	229,00	269,00	-45,06	-35,51	-40,28

Fonte: Elaborado pela autora (2017).

Figura 52 - Resistência das argamassas ao ataque por sulfato de sódio em função do número de ciclos de exposição



Fonte: Elaborado pela autora (2017).

Figura 53 - Aspecto dos corpos de prova após (a) 6, (b) 10, (c) 15, (d) 21, (e) 25 e (f) 31 ciclos de molhagem e secagem



Fonte: Elaborado pela autora (2017).

#### 4.5.7 Análise da micrografia das argamassas

A microestrutura da argamassa de referência e da argamassa contendo 20% de cinza volante moída + 5% de borracha (CM20B5) estão apresentadas nas Figuras 54 e 55 respectivamente. Na Figura 54, as micrografias da argamassa de referência apresentam características microestruturais típicas da matriz cimentícia, como a presença de poros e fissuras na pasta de cimento. Também foi possível observar alguns vazios capilares (VC) e formação dos produtos de hidratação, silicato de cálcio hidratado (C-S-H), hidróxido de cálcio (CH) e cristais de etringita tardia ( $C_6ASH_{31}$ ).

Figura 54 - Micrografia da argamassa de referência (continua)

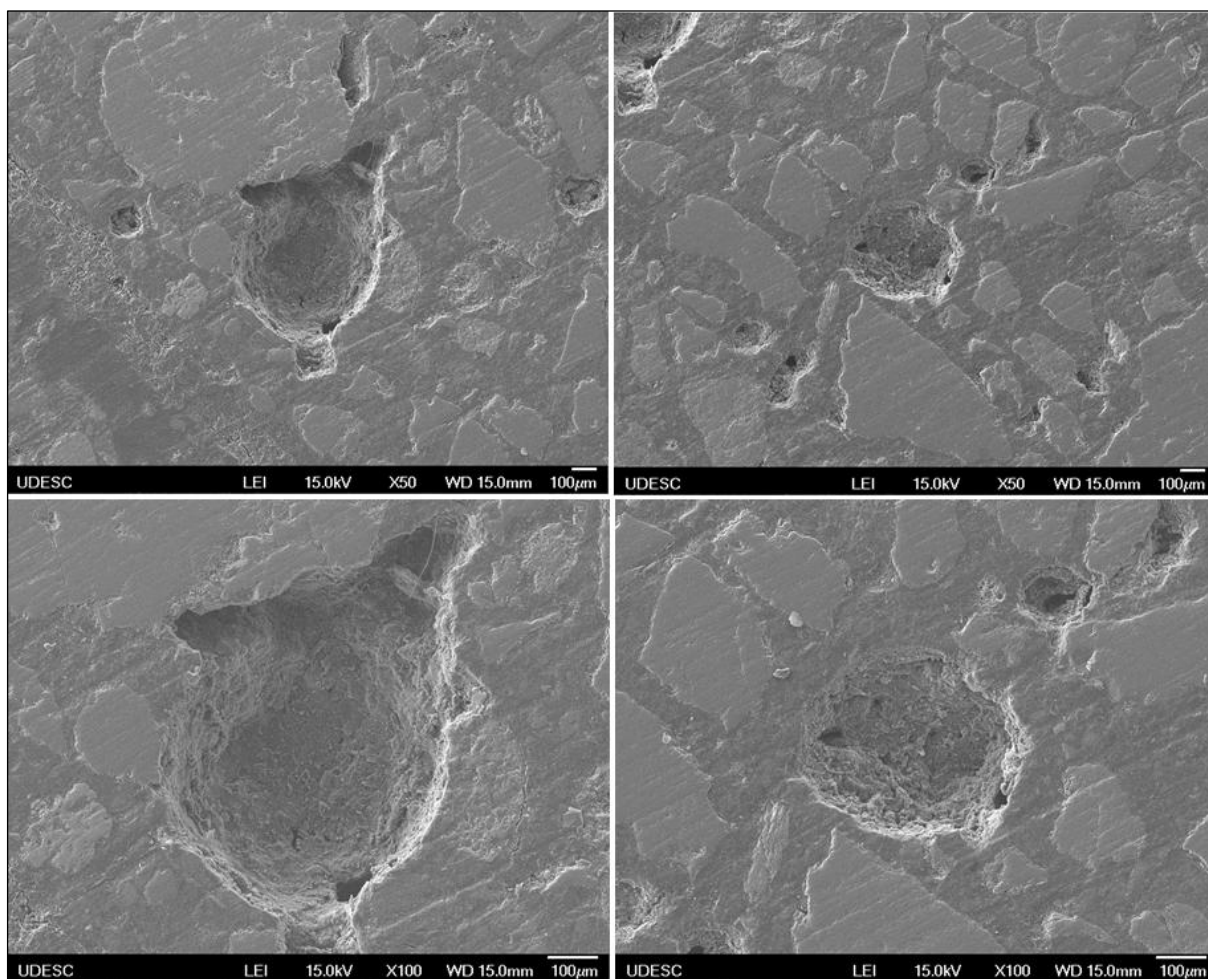
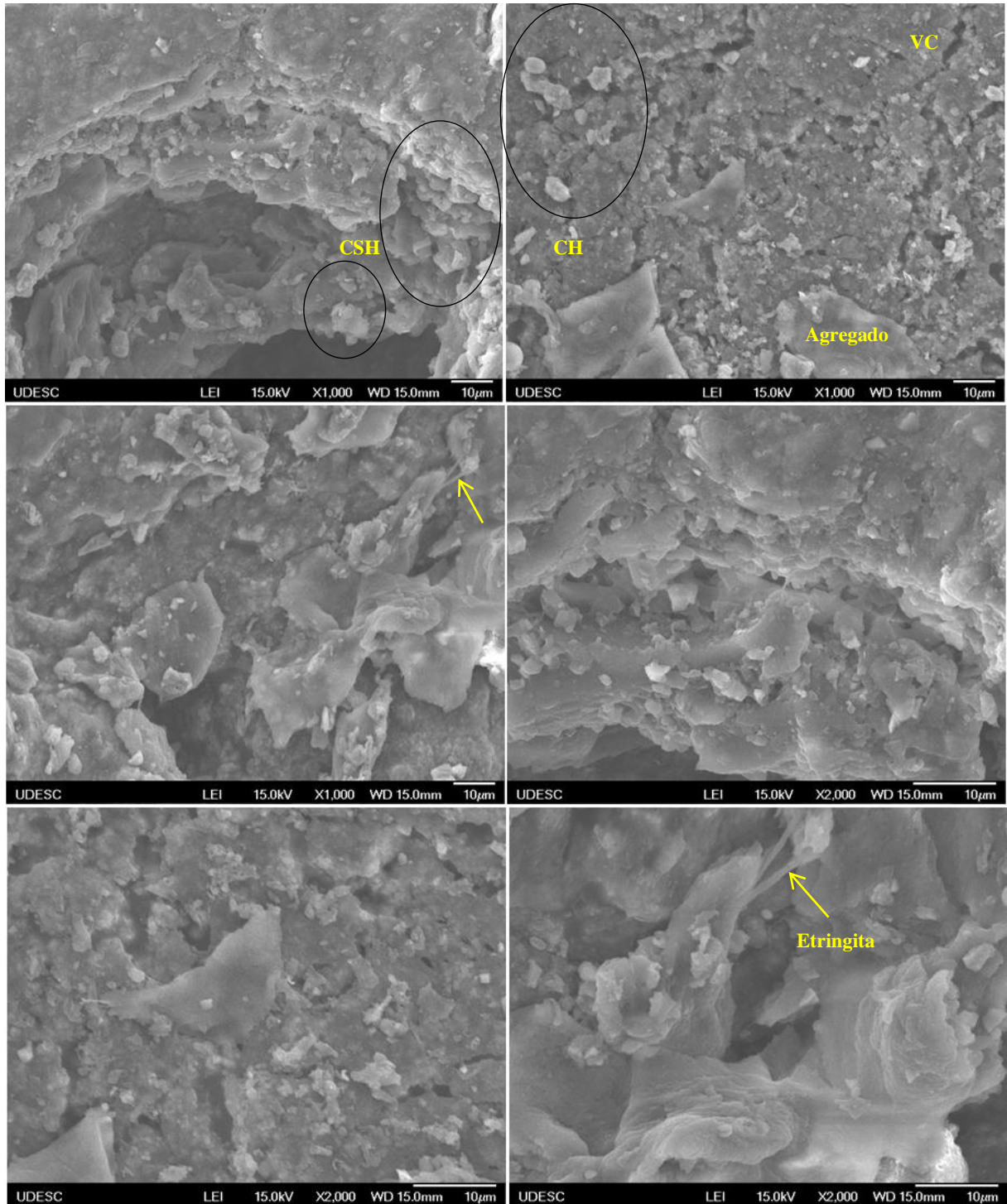


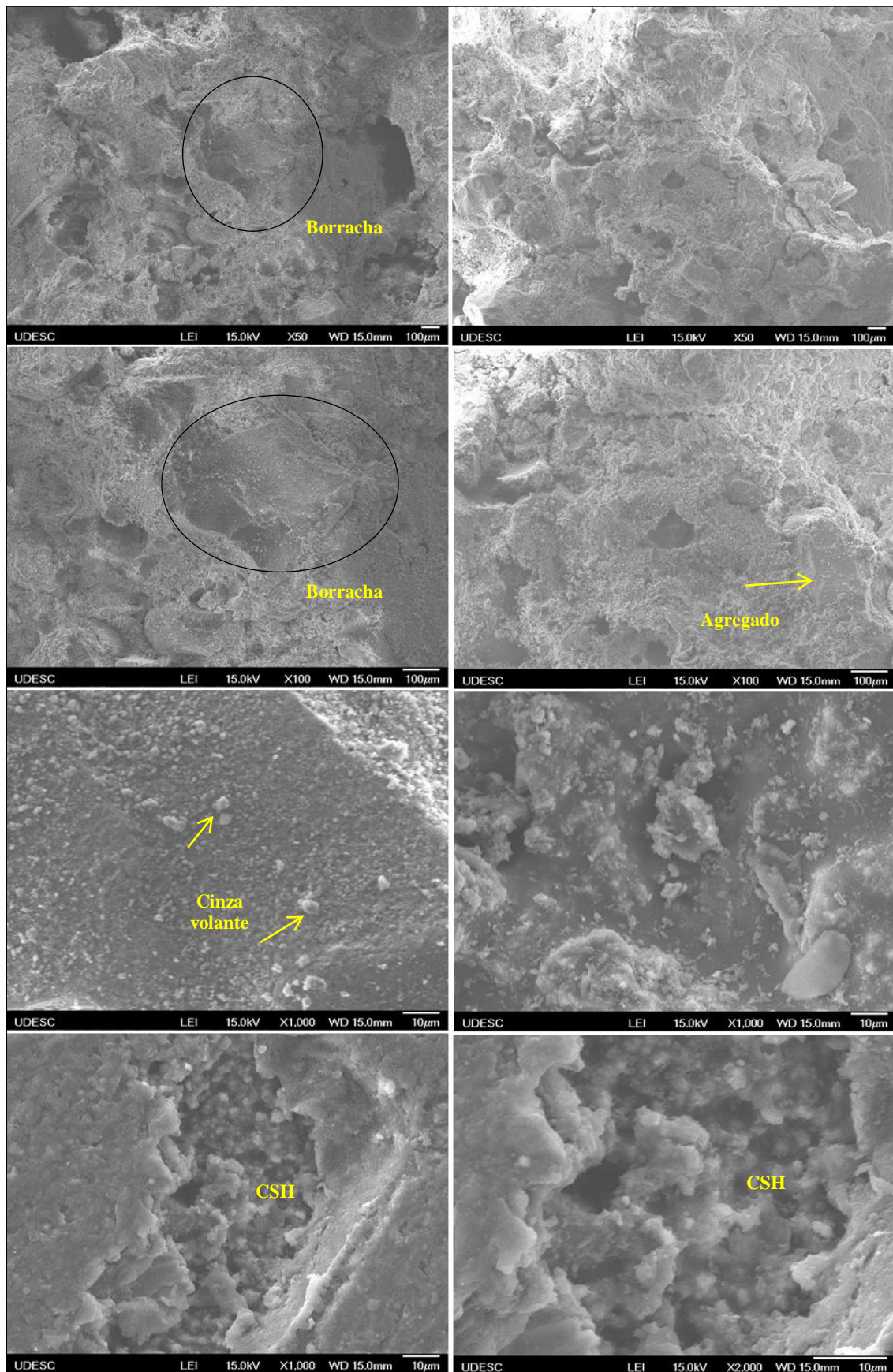


Figura 54 - Micrografia da argamassa de referência (conclusão)



Fonte: Elaborado pela autora (2017).

Figura 55 - Micrografia da argamassa contendo cinza volante moída e borracha (CM20B5)



Fonte: Elaborado pela autora (2017).



Na Figura 55 é possível identificar algumas partículas de borracha na matriz cimentícia. Verificou-se por meio da micrografia, descontinuidades na interface borracha-matriz, indicando pouca adesão entre essas partículas e a pasta de cimento. Este fato também foi constatado por Segre (1999), onde observou que, no caso das preparações contendo borracha tratada com solução saturada de NaOH, as partículas de borracha ficaram melhor aderidas à matriz de cimento, não apresentando descontinuidades, o que não ocorreu com as partículas de borracha sem tratamento.

Foram, também, observadas na figura 55, algumas partículas de cinza volante soltas. De acordo com Taylor (1997) apud Melo (2010), as partículas de cinza volante que não reagem até a idade de um ano, são constituídas de vidro silicoaluminato impuro ou de uma fase próxima à sílica pura, que pode ou não conter quartzo e óxido de ferro. Este fato também foi presenciado por Melo (2010) em amostras de concretos com 90 e 140 dias de idade.

As imagens apresentadas neste estudo podem ser correlacionadas à pesquisa de Chew *et al.* (2004) e à pesquisa de Campos e Paulon (2015), que revelam a presença de maior quantidade de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) na matriz da pasta de cimento, ao contrário da zona de transição, onde tem a presença de etringita ( $C_6ASH_{31}$ ) e hidróxido de cálcio (CH). A argamassa contendo cinza volante moída e borracha apresentou maior formação de C-S-H comparada com a argamassa de referência, pois a adição de cinza volante moída proporcionou uma maior quantidade de silicatos e aluminatos que, ao reagirem com a pozolana incorporada ao cimento, resultou na formação de C-S-H em maiores quantidades. Esta fase pode ter contribuído para o aumento da resistência à compressão das argamassas contendo cinza volante em sua composição.



## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

### 5.1 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, apresentaram resultados satisfatórios em relação às propriedades da argamassa no estado fresco e endurecido.

A borracha influenciou diretamente na redução da massa específica da argamassa, tornando-a mais leve e trabalhável. Além disso, com o aumento do teor do resíduo houve um aumento na retenção de água e no índice de vazios. Na absorção de água por imersão, houve um aumento na absorção de água, resultando em uma argamassa mais permeável comparado com a argamassa de referência. A inclusão de borracha e cinza volante não alterou a consistência das argamassas, que apresentaram propriedades compatíveis com as exigências de normas técnicas referentes às argamassas de revestimento para edificações.

A resistência à tração na flexão aumentou com a adição de borracha e a resistência à compressão diminuiu com o aumento de teor de borracha na argamassa, que pode ter ocorrido devido ao aumento de ar incorporado na argamassa no estado plástico. Já, a adição de cinza na argamassa aumentou a resistência à compressão em relação à argamassa de referência. 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.

A cinza leve, após moagem, apresentou um aumento no índice de atividade pozolânica do material. Este aumento ocorreu devido à diminuição das partículas da cinza que aumentaram a sua superfície específica, possibilitando maior contato entre os elementos reativos da mistura. Com isso, a cinza volante moída proporcionou ganhos significativos na resistência mecânica das argamassas.

Todas as argamassas desenvolvidas apresentaram resultados satisfatórios quanto às propriedades físicas no estado fresco e endurecido, principalmente a argamassa contendo 20% de cinza moída, cuja resistência média à compressão aumentou cerca de 18% em relação à argamassa de referência.

A resistência de aderência à tração entre a argamassa de referência e a argamassa contendo 20% de cinza moída + 5% de borracha não teve diferença significativa. Por meio dos resultados obtidos, as argamassas estudadas podem ser utilizadas como revestimento em

paredes internas e externas de edificações. Além disso, a argamassa contendo cinza volante foi menos vulnerável ao ataque por sulfato de sódio.

Na análise da microestrutura da argamassa contendo cinza volante e resíduos de borracha foram observados a presença de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e hidróxido de cálcio (CH). Também foram percebidas algumas partículas soltas de cinza volante e descontinuidades na interface borracha-matriz cimentícia, indicando pouca adesão entre essas partículas e a pasta de cimento.

O método do projeto fatorial possibilitou o cálculo de modelos 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 às condições necessárias do uso dos resíduos estudados, em porcentagem, na obtenção de um valor ótimo para a resistência à compressão.

Diante dos resultados obtidos nesta pesquisa é possível afirmar a viabilidade técnica do uso de resíduos de borracha de pneus inservíveis, juntamente com a cinza volante oriunda de usinas termelétricas, em argamassas para revestimento. Além de ser uma alternativa viável de material na aplicação da construção civil, o uso desses resíduos permite diminuir os impactos ambientais, tornando assim, uma alternativa sustentável.

## 5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para a realização de trabalhos futuros propõem-se:

- Realizar estudos quanto à flamabilidade e toxicidade das composições com borracha reciclada de pneus;
- Avaliar as argamassas para revestimento em relação à resistência ao fogo de acordo com a norma de desempenho de edificações habitacionais (ABNT NBR 15575);
- Verificar os níveis de desempenho das argamassas contendo borracha e cinza volante quanto à estanqueidade à água, exposição à ação de calor e choque térmico de acordo com a ABNT NBR 15575.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALIABDO, Ali A.; ELMOATY, Abd ELmoaty M.; ABDELBASET, Mostafa M. Utilization of waste rubber in non-structural applications. **Construction and Building Materials**, Egito, v. 91, p. 195-207, 2015.

ALMEIDA, Sílvia Martins de. **Análise do módulo de elasticidade estático e dinâmico do concreto de cimento Portland através de ensaios de compressão simples e de frequência ressonante**. 2012. 231f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **C-270**: Standard specification for mortar for unit masonry. United States, 2007.

\_\_\_\_\_. **C-125**: Standard terminology relating to concrete and concrete aggregates. United States, 2016.

ANDRADE, Ana Clarice Figueiredo de. **Tijolos de cinza volante e cal: estudo do desempenho quanto à resistência, absorção, durabilidade e aderência**. 1991. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1991.

ANDRIETTA, A. J. Pneus e meio ambiente: um grande problema requer uma grande solução. 2002. Disponível em: <<http://www.reciclarepreciso.hpg.ig.com.br/recipneus.htm>> Acesso em 23 fev 2017.

ANGELIN, F. Andressa; LINTZ, Rosa C.; GACHET-BARBOSA, Luísa A.; OSÓRIO, Wislei R. The effects of porosity on mechanical behavior and water absorption of na environmentally friendly cement with recycled rubber. **Construction and Building Materials**, v. 151, p. 534-545, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752**: Materiais pozolânicos — Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2014a.

\_\_\_\_\_. **NBR 7175**: Cal hidratada para argamassas. Rio de Janeiro, 2003a.

\_\_\_\_\_. **NBR 7200**: Execução de revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Procedimento. Rio de Janeiro, 1998.

\_\_\_\_\_. **NBR 7215**: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

\_\_\_\_\_. **NBR 7217**: Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 1987.

\_\_\_\_\_. **NBR 8522**: Concreto – Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão. Rio de Janeiro, 2008.

\_\_\_\_\_ **NBR 9778:** Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005f.

\_\_\_\_\_ **NBR 10004:** Resíduos sólidos – classificação. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_ **NBR 12006:** Cimento – Determinação do calor de hidratação pelo método de garrafa de Langavant – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1990.

\_\_\_\_\_ **NBR 12653:** Materiais pozzolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2014b.

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

\_\_\_\_\_ **NBR 13277:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação de retenção de água. Rio de Janeiro, 2005c.

\_\_\_\_\_ **NBR 13278:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes de placas cerâmicas – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 2005d.

\_\_\_\_\_ **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, 2005e.

\_\_\_\_\_ **NBR 13281:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2005a.

\_\_\_\_\_ **NBR 13528:** Revestimento de paredes de argamassa inorgânicas – Determinação da resistência da aderência à tração. Rio de Janeiro, 2010.

\_\_\_\_\_ **NBR 13749:** Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Especificação. Rio de Janeiro, 2013.

\_\_\_\_\_ **NBR NM 23:** Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2001.

\_\_\_\_\_ **NBR NM 45:** Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

\_\_\_\_\_ **NBR NM 52:** Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

\_\_\_\_\_ **NBR NM 248:** Agregados – Determinação composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003b.

ASSOCIAÇÃO MERCOSUL DE NORMATIZAÇÃO. **NM 23:** Cimento Portland e outros materiais em pó – determinação da massa específica. Mercosul, 2000.

Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos - ANIP. **História do pneu.** [2015?]. Disponível em <[www.reciclanip.org.br](http://www.reciclanip.org.br)> Acesso em: 26 ago. 2015.

Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos – ANIP. **Produção e vendas 2016**. (2017). Disponível em <[www.anip.cpm.br/arquivos/producao\\_vendas.pdf](http://www.anip.cpm.br/arquivos/producao_vendas.pdf)> Acesso em: 24 maio. 2017.

BAÍA, L. L. M; SABBATINI, F. H. **Projeto e Execução de Revestimento de Argamassa**. São Paulo: O Nome da Rosa, 2000.

BARGER, G. S. et al. Production and use of calcined natural pozzolans in concrete. **Cement Concrete and Aggregates**, v. 23, n. 2, p. 73-80, 2001.

BILLIR, Turhan; GENÇEL, Osman; TOPCU, Ilker Bekir. Properties of mortars with fly ash as fine aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 93, p. 782-789, 2015.

BENAZZOUK, A.; MEZREB, K.; DOYEN, G.; GOULLIEUX, A.; QUÉNEUDEC, M. Effect of rubber aggregates on the physico-mechanical behaviour of cement-rubber composites-influence of the alveolar texture of rubber aggregates. **Cement and Concrete Composites**, v. 25, n. 7, p. 711-720, 2003.

BOYNTON, R.S.; GUTSCHICK, K.A. **Bond of mortar to masonry units**. Washington, DC.: National Lime Association, 1964.

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.

CAL CEM. Cal hidratada CH III. Disponível em: <[www.calcem.com.br](http://www.calcem.com.br)> Acesso em 14 jun. 2016.

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.

CANOVA, José Aparecido; BERGAMASCO, Rosangela; ANGELIS NETO, Generoso de. A utilização de resíduos de pneus inservíveis em argamassa de revestimento. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 29, n. 2, p. 141-149, 2007.

CANOVA, José Aparecido; ANGELIS NETO, Generoso de; BERGAMASCO, Rosangela. Dry ripened mortar with quarry waste and rubber powder from unserviceable tires **Acta Scientiarum. Technology**, v. 37, n. 1, p. 25-31, 2015.

CARASEK, Helena. Argamassas. In. ISAIA, Geraldo Cechella. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2010. p. 893-941.

CARASEK, Helena. Argamassas. In. ISAIA, Geraldo Cechella. **Materiais de Construção Civil**. São Paulo: IBRACON, 2007. p. 863-904.

CASTRO, W. A. M. **Incorporação de resíduos de caulim em argamassas para uso na construção civil**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2008.

CHEW, S. H.; KAMRUZZAMAN, A. H.; LEE, F. H. Physicochemical and engineering behavior of cement treated clays. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, p. 53-71, 2004.

CINTRA, Cyntia Leonis Dias. **Argamassa para revestimento com propriedades termoacústicas, produzida a partir de vermiculita expandida e borracha reciclada**. 2013. 154f. Tese (Doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais). Universidade de São Carlos, São Carlos, 2013.

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.

CONAMA: Conselho Nacional de Meio Ambiente. **Resolução CONAMA n° 416, de 30 de setembro de 2009**. Diário Oficial da União n° 188, Brasília, p. 64-64, 2009. Disponível em <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=616>>. Acesso em: 19 set. 2015.

CONAMA: Conselho Nacional de Meio Ambiente. **Resolução CONAMA n° 008, de 06 de dezembro de 1990**. Diário Oficial da União, Brasília, seção 1, p. 383-384, 1990. Disponível em <[http://www.mma.gov.br/port/conama/legislacao/CONAMA\\_RES\\_CONS\\_1990\\_008.pdf](http://www.mma.gov.br/port/conama/legislacao/CONAMA_RES_CONS_1990_008.pdf)>. Acesso em: 28 set. 2016.

CONAMA: Conselho Nacional de Meio Ambiente. **Resolução CONAMA n° 020, de 18 de junho de 1986**. Brasília. Disponível em <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res86/res2086.html>>. Acesso em: 28 set. 2016.

COSSOLINO, Leiliane Cristina; PEREIRA, Antônio Henrique Alves. Módulos elásticos: visão geral e métodos de caracterização. **Informativo Técnico – Científico**, ITC-ME/ATCP, 2010. Disponível em: <<http://www.atcp.com.br/images/stories/products/RT03-ATCP.pdf>> Acesso em: 16 maio 2017.

DEVORE, Jay L.; [tradução Joaquim Pinheiro Nunes da Silva]. **Probabilidade e estatística para engenharia e ciências**. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2006.

FARIA, Juliana soares de. **Incorporação de resíduo pó de borracha de pneus inservíveis em cerâmica vermelha**. 2015. 125f. Dissertação (Mestrado em engenharia e ciência dos Materiais). Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campo dos Goytacazes, 2015.

FIORE, Alessandra; MARANO Giuseppe Carlo; MARTI, Cesare; MOLFETTA, Marcello. On the fresh/hardened properties of cement composites incorporating rubber particles from recycled tires. **Hindawi Publishing Corporation**, Itália, p. 1-12, 2014.

FIORITO, Antonio J.S.I. **Manual de argamassas e revestimentos: estudos e procedimentos de execução**. 2. ed. São Paulo: Pini, 2009.



FREITAS, Juliana Gomes de; CARASEK, Helena; CASCUDO, Oswaldo. Utilização de termografia infravermelha para avaliação de fissuras em fachadas com revestimento de argamassa e pintura. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 1, p. 57-73, 2014.

GANIRON JR, Tomas. Pelletized cut rubber: an alternative coarse aggregate for concrete mixture. **International Journal of Advanced Science and Technology**, Austrália, v. 64, p. 21-30, 2014.

GOMES FILHO, Carlos Vicente. **Levantamento do potencial de resíduos de borracha no Brasil e avaliação de sua utilização na indústria da construção civil**. 2007. 138f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento de Tecnologia). Instituto de Engenharia do Paraná, Curitiba, 2007.

GOMES, Rodrigo de Farias. **Síntese e caracterização de nanopartículas de Co e sua aplicação no aumento da microdureza de resinas epóxi**. 2010. 74f. Tese (Doutorado em Física). Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2010.

GONÇALVES, Jardel Pereira; MOURA, Washington Almeida; MOLIN, Denise Carpena Coitinho Dal. Avaliação da influência da utilização do resíduo de corte de granito (RCG), como adição, em propriedades mecânicas do concreto. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 2, n. 1, p. 53-68, 2002.

GRANZOTTO, Laura. **Concreto com adições de borracha: uma alternativa ecologicamente viável**. 2010. 132f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana). Universidade estadual de Maringá, Maringá, 2010.

GUIMARÃES, José Epitácio Passos. **A Cal – Fundamentos e Aplicações na Engenharia**. 2.ed. São Paulo: Pini, 2002.

ISAIA, Geraldo Cechella. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 2v. São Paulo: IBRACON, 2007.

JAIMES, Myle Nguyen; CHOI, Wonchang; ABU-LEBDEH, Taher. Use of recycled aggregate and fly ash in concrete pavement. **American Journal of Engineering and Applied Sciences**, North Carolina, v. 4 (2), p. 201-208, 2011.

KANSO, Mustafá Ali. **Maior aterro do mundo possui 7 milhões de pneus e pode ser visto do espaço**. 2014. Disponível em: <<http://hypescience.com>> Acesso em: 29 set. 2015.

KARASIN, Abdulhalim; DOGRUYOL, Murat. An experimental study on strength and durability for utilization of fly ash in concrete mix. **Advances in Materials Science and Engineering**, Turquia, v. 2014, 6 páginas, 2014.

KAUSHIK. **World's Biggest Tire Graveyard in Sulabiya, Kuwait**. 2015. Disponível em: <<http://www.amusingplanet.com/2015/01/worlds-biggest-tire-graveyard-in.html>> Acesso em 19 maio 2017.

KREUZ, Anderson Luiz; CHERIAF, Malik; ROCHA, Janaíde Cavalcante. Estudo das propriedades dos concretos utilizando cinza pesada como parte da areia. **IX Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente construído**. Foz do Iguaçu, Paraná. 2002.

LEAL, Márcio Manuel Rodrigues. **Desenvolvimento de argamassas de revestimento com comportamento térmico melhorado**. 2012. 215f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil). Instituto Politécnico de Setúbal, Portugal, 2012.

MACIEL, L. L. BARROS, M. M. S.B. SABBATINI, F.H. **Recomendações para execução de revestimentos de argamassa para paredes de vedação internas e externa e tetos**. Projeto EPUSP/SENAI, São Paulo, 1998.

MALLMANN, Eduardo; ZWONOK, Oleg. Panorama dos resíduos da combustão do carvão mineral e características químicas e físicas das cinzas de fundo das usinas do Rio Grande do Sul. **III Congresso brasileiro de carvão mineral**. Gramado, RS. 2011.

MAVROULIDOY, M.; FIGUEIREDO, J. Discarded tyre rubber as concrete aggregate: a possible outlet for used tyres. **Global NEST Journal**, London, v. 12, n. 4, p. 359-367, 2010.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. 2 ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 2 ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MELO, Sandra Kurotusch de. **Estudo da formação da etringita tardia em concreto por calor de hidratação do cimento**. 2010. 286f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia e Construção Civil). Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2010.

MÖDERLER C. Deutsche Welle. **1845: Patenteado o primeiro pneu**. [2012?]. Disponível em: <<http://www.dw.de/dw/article/a-686295.html>> Acesso em: 26 ago. 2015.

MONTEIRO, L. P. C.; MAINIER, F. B. Queima de pneus inservíveis em fornos de clínquer. **Engevista**, v. 10, n. 1, p. 52-58, 2008.

MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments**. 7. ed. New York: John Wiley & Sons, 2009.

MONTGOMERY, Douglas C.; RUNGER, George C. [tradução Verônica Calado]. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

MOURA, Maria José; FIGUEIREDO, Maria Margarida. Aplicação das técnicas de picnometria de gás e de porosimetria de mercúrio à caracterização da madeira de E. globulus. **Silva Lusitana**, Lisboa, v. 10, n. 2, p. 207-2016, 2002.

NACIF, Glaucio Laun; PANZERA, Túlio Hallak; STRECKER, Kurt; CHRISTOFORO, André Luis; PAINE, Kevin. Investigations on cementitious composites based on rubber particle waste additions. **Materials Research**, v. 16, n. 2, p. 259 – 268, 2013.

NETTO, Rafael Mantuano. **Materiais pozolânicos**. 2006. 148f. Monografia (Especialização em Construção Civil). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5 ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

PAULA, Thaís Martins de. Misturas de cinza volante e cal de carbureto: comportamento da resistência à compressão simples frente à moagem da cinza volante. 2016. 192f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

POZZOBON, Cristina Eliza. **Aplicações tecnológicas para a cinza do carvão mineral produzida no complexo termelétrico Jorge Lacerda**. 1999. 122f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.

PARTALA, Tânia. **Propriedades de concretos produzidos com rejeito particulado de borracha em substituição parcial do agregado miúdo**. 2009. 955f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia de Materiais). Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2009.

QUARCIONI, V. A.; CHOTOLI, F. F.; ANGULO, S. C.; GUILGE, M. S.; CAVANI, G. DE R.; DE CASTRO, A. L.; CINCOTTO, M. A.. Estimativa da porosidade de argamassas de cimento e cal pelo método de cálculo de volumes. **Ambiente Construído**, v. 9, n. 4, p. 175-187, 2009.

QUARCIONI, Valdecir Ângelo; CINCOTTO, Maria Alba. Influência da cal em propriedades mecânicas de argamassas. In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, 6., 2005. Florianópolis, Santa Catarina. **Anais...** Florianópolis, 2005, p. 233-250.

QUEROL, X.; MORENO, N.; UMAÑA, J. C.; ALASTUEY, E.; HERNÁNDEZ, E.; LÓPEZ-SOLER, A.; PLANA, F. Synthesis of zeolites from coal fly ash: an overview. **International Journal of Coal Geology**, v. 50, p. 413-423, 2002.

RAFIEIZONOZ, Mahdi; MIRZA, Jahangir; SALIM, Mohd Razman; HUSSIN, Mohd Warid; KHANKHAJE, Elnaz. Investigation of coal bottom ash and fly ash in concrete as replacement for sand and cement. **Construction and Building Materials**, v. 116, p. 15-24, 2016.

REPETTE, W. L.; SIQUEIRA, L. V. M.; ONGUERO, L.; CRUZ, A. G. F.; DALMORO, A. J.; PALOMBO, M. G. Uso de cinza pesada na produção de concreto autoadensável. **VI Congresso de Inovação Tecnológica em energia elétrica (VI CITENEL)**. Fortaleza, CE. 2011.

RAGO, F.; CINCOTTO, M. A. Influência do tipo da cal hidratada na reologia de pastas. **Boletim Técnico 233**, São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1999.

RODRIGUES, M. P. S. F. F. **Mortars for old masonries renders. The influence of binders**. 2004. Doctoral Thesis. Nova University of Lisbon., Lisbon, 2004.

ROHDE, Geraldo Mario; MACHADO, Claudomiro de Souza. Quantificação das cinzas de carvão fóssil produzidas no Brasil. **Boletim Técnico 36**, Porto Alegre: Cientec, 2016.

RUBBER MANUFACTURES ASSOCIATION – RMA. **Scrap Tire Management Summary**. RMA, Washington, DC, 2016. 19 p.

SANTOS, Heraldo Barbosa dos. **Ensaio de aderência das argamassas de revestimento**. 2008. 50f. Monografia (Especialização em Construção Civil). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

SAYURI, Tahara; ROZENFELD, Henrique. **Planejamento de Experimentos (DOE)**. Portal de conhecimentos. 2014. Disponível em: <<http://www.portaldeconhecimentos.org.br/index.php/por/Conteudo/Planejamento-de-Experimentos-DOE>> Acesso em: 26 out. 2016.

SCARTEZINI, L.M.B.; JUCA, T.R.; TEIXEIRA, F.; ANTONELLI, G.; CASCUDO, O.; CARASEK, H. Influencia do preparo da base na aderência e na permeabilidade a água dos revestimentos de argamassa. **Ambiente Construído**, v. 2, p. 85-92, 2002

SEGRE, Nadia; OSTERTAG, Claudia; MONTEIRO, Paulo José Melaragno. Effect of tire rubber particles on crack propagation in cement paste. **Materials Research**, v. 9, n. 3, p. 311 – 320, 2006.

SEGRE, Nadia Cristina. **Reutilização de borracha de pneus usados como adição em pasta de cimento**. 1999. 92f. Tese (Doutorado). Instituto de Química da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1999.

SHEARER, Christopher R.; KURTIS, Kimberly. Use of biomass and co-fired fly ash in concrete. **ACI Materials Journal**, v. 112, n. 2, p. 209-218, 2015.

SHU, Xiang; HUANG, Baoshan. Recycling of waste tire rubber in asphalt and Portland cement concrete: an overview. **Construction and Building Materials**, 2013. Disponível em <<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.027>>. Acesso em: 24 ago. 2015.

SIDERIS, K. K.; SAVVA, A. E.; PAPAYIANNI, L. Sulfate resistance and carbonation of plain and blended cements. **Cement and concrete composites**, v. 28, p. 47-56, 2006.

SILVA JÚNIOR, Francisco Alves da. **Avaliação do efeito da adição do resíduo de borracha de pneu e brita calcária na formação de compósitos cimentícios**. 2014. 184f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais). Universidade do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.

SIQUEIRA, Jacilene Siqueira de. **Reciclagem de resíduo a partir de cinzas de carvão mineral: produção de argamassas**. 2011. 91f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal do Pará, Belém, 2011.

SU, Haolin; YANG, Jian; LING, Tung-Chai; GHATAORA, Gurmeh S.; DIRAR, Samir. Properties of concrete prepared with waste tyre rubber particles of uniform and varying sizes. **Journal of Cleaner Production**, v.91, p. 288-296, 2015.

SUPIT, Steve W. M.; SHAIKH, Faiz U. A.; SAKER, Prabir 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.

THE JAPAN AUTOMOTIVE TYRE MANUFACTURES ASSOCIATION - JATMA. **Current status on scrap tyre (used tyre) recycling.** (2017). Disponível em: <<http://www.jatma.or.jp/english/tyrerecycling/report01.html>> Acesso em: 08 ago. 2017.

TRACTEBEL ENERGIA. **Complexo Jorge Lacerda e o meio ambiente.** [2015?]. Disponível em < <http://www.portalsatc.com/site/adm/arquivos/1903/30820101144271.pdf> > Acesso em: 28 set. 2016.

TRISTÃO, Fernando Avancini. **Influência da Composição Granulométrica da Areia nas Propriedades das Argamassas de Revestimento.** 1995. 197f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1995.

VIANA, M., JOUANNIN, P., PONTIER, C., CHULIA, D. About pycnometric density measurements. **Talanta**, França, v. 57, p. 583-593, 2002.

VOTORAN. **Cimentos.** Disponível em <[www.votoran.com.br](http://www.votoran.com.br)> Acesso em: 14 jun. 2016.

YLDIRIM, Korkmaz; SÜMER, Mansur. 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.

YU, Jing; LU, Cong; LEUNG, Christopher 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.