



**TONY MATHEUS CARVALHO EUGÊNIO**

**PROPRIEDADES FÍSICAS, MECÂNICAS E  
TÉRMICAS DE ARGAMASSAS DE  
REVESTIMENTO COM UTILIZAÇÃO DE  
RESÍDUOS DE PNEU**

**LAVRAS - MG**

**2016**

**TONY MATHEUS CARVALHO EUGÊNIO**

**PROPRIEDADES FÍSICAS, MECÂNICAS E TÉRMICAS DE  
ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO COM UTILIZAÇÃO DE  
RESÍDUOS DE PNEU**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biomateriais, área de concentração em Compósitos e Nanocompósitos Lignocelulósicos, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Giovanni Francisco Rabelo  
Orientador

Prof. Dr. Rafael Farinassi Mendes  
Coorientador

**LAVRAS – MG**

**2016**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca  
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Eugênio, Tony Matheus Carvalho.

Propriedades físicas, mecânicas e térmicas de argamassas de revestimento com utilização de resíduos de pneu / Tony Matheus Carvalho Eugênio. - 2016.

139 p. : il.

Orientador(a): Giovanni Francisco Rabelo.

Coorientador(a): Rafael Farinassi Mendes

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Lavras, 2016.

Bibliografia.

1. Pneus. 2. Resíduos. 3. Isolamento térmico. I. Rabelo, Giovanni Francisco. II. Mendes, Rafael Farinassi. III. Título.

**TONY MATHEUS CARVALHO EUGÊNIO**

**PROPRIEDADES FÍSICAS, MECÂNICAS E TÉRMICAS DE  
ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO COM UTILIZAÇÃO DE  
RESÍDUOS DE PNEU**

**PHYSICAL, MECHANICAL AND THERMAL PROPERTIES OF  
MORTAR COATING WITH THE USE OF TIRE WASTE**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biomateriais, área de concentração em Compósitos e Nanocompósitos Lignocelulósicos, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 15 de setembro de 2016.

Prof. Dr. Antônio Carlos Neri UFLA

Prof. Dr. Reginaldo Barbosa Fernandes CEFET-MG

Prof. Dr. Giovanni Francisco Rabelo  
Orientador

Prof. Dr. Rafael Farinassi Mendes  
Coorientador

**LAVRAS - MG**

**2016**

Aos meus pais, Antônio Donizette  
Eugênio e Maria Aparecida Carvalho  
Eugênio, pela confiança, amor,  
ensinamentos e dedicação.

DEDICO

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por me indicar o caminho certo e me ajudar sempre nas escolhas que tive que tomar.

Aos meus pais por toda a atenção e incentivo na estrada até aqui.

À minha irmã, por todos os momentos importantes que passamos em família.

À minha noiva, Jéssica Cristine de Souza, por estar sempre ao meu lado, dando-me apoio e incentivo nos momentos difíceis.

Ao professor Dr. Giovanni Francisco Rabelo, pela orientação, confiança, paciência e amizade.

Ao coorientador Dr. Rafael Farinassi Mendes, pelas colaborações, sugestões, apoio, paciência e amizade.

Ao Lucas Abreu, Laércio, Danilo, Alan, Cláudio Henrique e demais amigos da pós-graduação e da graduação da UFLA, pela ajuda nos trabalhos desenvolvidos, momentos de descontração, paciência e companheirismo.

Aos membros da banca de defesa, pelas correções, sugestões e avaliação deste trabalho.

Ao Laboratório de Microscopia Eletrônica e Análise Ultraestrutural da Universidade Federal de Lavras e à Fapemig, pelo fornecimento dos equipamentos e suporte técnico para experimentos envolvendo microscopia eletrônica.

Ao Centro Universitário de Lavras, por ceder o Laboratório Multidisciplinar de Materiais de Construção para complementação dos estudos desenvolvidos neste trabalho.

À Universidade Federal de Lavras (UFLA), em especial ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biomateriais, pela oportunidade de cursar o mestrado e à Capes, pela concessão da bolsa, o que tornou possível a realização deste trabalho.

“A menos que modifiquemos a nossa maneira de pensar, não seremos capazes de resolver os problemas causados pela forma como nos acostumamos a ver o mundo.”

(Albert Einstein)

## RESUMO

Objetivou-se neste trabalho avaliar o uso de partículas de borracha e de cinzas, obtidas da queima de borracha de pneus inservíveis, como reforço em argamassa de revestimento, aplicadas em camada única e redução na transferência de calor, visando a aplicações de melhoria no conforto térmico de edificações e melhoria das propriedades mecânicas de argamassa. Foram empregados os percentuais de 0%, 5%, 10%, 15% e 20% em volume de partículas de borracha em substituição ao agregado miúdo e 0%, 2,5%, 5% e 10% em volume de cinzas de partículas de pneu em substituição ao aglomerante. Entre os materiais avaliados, o melhor indicado para emprego como isolamento térmico foi o que levou em sua formulação 20% de partículas de borracha de pneu; porém, esse tratamento apresentou as maiores reduções na resistência mecânica. Outros tratamentos se destacaram no isolamento térmico, mostrando uma baixa condutividade térmica, como foi o caso dos tratamentos com 15% de partículas de pneu e todos os tratamentos contendo cinzas de borracha de pneu. Algumas proporções de cinzas em substituição ao cimento também se comportaram de maneira positiva quanto à resistência à compressão. Comprovou-se o potencial do uso das cinzas de borracha de pneu como um substituto parcial para o cimento Portland, sendo utilizadas como material pozolânico. Tanto a borracha quanto a cinza de pneu proporcionaram densidades aparentes menores nos compósitos em comparação com a argamassa de referência. O aumento de partículas de borracha de pneu em substituição ao agregado miúdo impactou negativamente na trabalhabilidade da argamassa, enquanto o aumento de cinzas em substituição ao aglomerante melhorou a trabalhabilidade.

**Palavras-chave:** Pneus. Resíduos. Borracha. Cinzas. Isolamento térmico.

## ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate the use of rubber particles and ash, obtained from rubber burning scrap tires as a reinforcement in mortar coating, applied in a single layer and reduction in heat transfer, aiming to improve their applications in thermal comfort of buildings and the mechanical properties of mortar. Percentages of 0%, 5%, 10%, 15% and 20% by volume of rubber particles were used in replacement of fine aggregate and 0%, 2.5%, 5% and 10% by volume of ash particles tire to replace the binder. Among the materials tested, the most suitable for use as thermal insulation was the one that had 20% of tire rubber particles in its formulation; however, this treatment had the greatest reductions in mechanical strength. Other treatments have excelled in thermal insulation, showing a low thermal conductivity, as in the case of treatments with 15% tire particles and all treatments with rubber tire ashes. Some proportions of ash cement mortars also behaved in a positive manner, like compressive strength. The potential use of the tire rubber ashes showed to be a partial replacement for Portland cement, and they can be used as a pozzolanic material. Tire rubber particles and tire rubber ashes presented lower densities, compared to the reference mortar. The increase in tire rubber particles to replace fine aggregates negatively impacted mortar workability, while increasing ash to replace binder improved workability.

**Keywords:** Tires. Waste. Rubber. Ash. Thermal insulation.

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 – A) Esquema de uma parede revestida com chapisco, emboço e reboco; B) e parede revestida com chapisco e massa única. ....  | 34 |
| Figura 2 – Prensa hidráulica elétrica digital utilizada na ruptura dos corpos de prova de prova. ....  | 44 |
| Figura 3 – Conjunto de peneiras utilizadas para ensaio de granulometria.....   | 46 |
| Figura 4 – Conjunto de peneiras da serie normal sobre o agitador mecânico.....   | 47 |
| Figura 5 – Raspas de pneu antes do peneiramento .....  | 49 |
| Figura 6 – Raspas de pneu passantes na peneira com malha de 1,5 mm. ....   | 50 |
| Figura 7 – Frasco de Chapmam utilizado na obtenção da massa específica das partículas de borracha de pneu.....   | 51 |
| Figura 8 – Estrutura do filtro de lavagem de gases.....  | 53 |
| Figura 9 – Queima das partículas de pneu no filtro de lavagem de gases. ....   | 53 |
| Figura 10 – Cinzas das partículas de borracha de pneu após peneiramento. ....  | 54 |
| Figura 11 – Argamassadeira utilizada para homogeneização da mistura cimentícia. ....   | 60 |
| Figura 12 – Forma utilizada para moldagem dos corpos de prova. ....  | 60 |
| Figura 13 – Câmaras térmicas ligadas ao sistema de coleta de dados. ....   | 61 |
| Figura 14 – Esquema do conjunto de câmaras térmicas com a disposição dos termopares, da lâmpada incandescente e do corpo de prova.....   | 62 |
| Figura 15 – Estrutura das câmaras térmicas. A) Câmaras sobrepostas com termopar ambiente na parte externa; B) Imagem da câmara termográfica com sensor infravermelho mostrando que o isolamento das câmaras foi eficiente.....   | 63 |
| Figura 16 – Imagem do interior da câmara térmica inferior. A) Imagem mostrando a lâmpada utilizada para emissão de calor e o termopar que controla a temperatura que chega à amostra; B) Imagem da câmara termográfica do inferior da câmara inferior mostrando a emissão de calor pela lâmpada..... | 64 |
| Figura 17 – Porta-amostras das câmaras térmicas. A) Imagem da tampa da câmara inferior, mostrando em detalhe onde é acoplado o corpo de prova e por onde passa o calor gerado pela   |    |

|  |    |
|--|----|
| lâmpada; B) Dissipação do calor promovido pela lâmpada passando somente pela abertura entre as caixas onde fica acoplado o termopar. ....  | 64 |
| Figura 18 – Equipamento utilizado para medir a radiação que chega ao corpo de prova emitida pela lâmpada incandescente. ....   | 66 |
| Figura 19 – Corpos de prova da argamassa A (referência) e argamassa B (com adição de pozolana) nos moldes cilíndricos em câmara úmida.....   | 67 |
| Figura 20 – Cimento e cinza de borracha de pneu, nas proporções estabelecidas nos traços, pré-homogeneizados, antes da adição na argamassa maturada. ....  | 70 |
| Figura 21 – Medição do índice de consistência. A) Mesa <i>flow table</i> automatizada e molde tronco cônico, utilizados para determinação do índice de consistência; B) Espalhamento da argamassa, após executadas 30 quedas por meio da mesa <i>flow table</i> , para posterior medição do espalhamento com paquímetro..... | 71 |
| Figura 22 – Máquina universal de ensaios mecânicos com o corpo de prova devidamente posicionado para o ensaio de resistência a compressão. A) Início do ensaio; B) Corpo de prova rompido. ....  | 72 |
| Figura 23 – Corpos de prova utilizados no ensaio de densidade de massa aparente em processo de cura ao ar livre.....   | 74 |
| Figura 24 – Porcentagem retida nas peneiras da série normal para a areia e partículas de borracha de pneu. ....  | 76 |
| Figura 25 – Porcentagem retida acumulada nas peneiras da série normal para a areia e partículas de borracha de pneu e zonas ótimas e utilizáveis estabelecidas pela NBR 7211 (ABNT, 2009b) .....   | 77 |
| Figura 26 – Imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura das partículas de borracha de pneu. A) Escala de 1 mm; B) Escala de 100 $\mu\text{m}$ ; C) Escala de 50 $\mu\text{m}$ .....  | 81 |
| Figura 27 – Elementos identificados nas amostras de partículas de borracha de pneu pela técnica espectrometria de fluorescência de raios X por reflexão total. Zn = Zinco; Nb = Nióbio; S = Enxofre; Fe = Ferro; Ga = Gálio; Ca = Cálcio; P = Fósforo; K= Potássio; Cl = Cloro; Ti = Titânio. ....                           | 82 |
| Figura 28 – Curvas TG e DTG das partículas de borracha de pneu. ....   | 83 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 29 – Imagens das cinzas de borracha de pneu obtidas por microscopia eletrônica de varredura. A) Escala de 10 $\mu\text{m}$ ; B) Escala de 2 $\mu\text{m}$ . .....  | 85  |
| Figura 30 – Elementos identificados nas amostras de cinzas de borracha de pneu pela técnica espectrometria de fluorescência de raios X. Zn = Zinco; S = Enxofre; Nb = Nióbio; Ca = Cálcio; Ga = Gálio; P = Fósforo; K= Potássio; Fe = Ferro; Cl = Cloro. .... | 86  |
| Figura 31 – Resistência à compressão do cimento Portland CII E 32 e CII F 32. ....  | 87  |
| Figura 32 – Relação entre resistência à compressão das argamassas versus porcentagem de material pozolânico.....  | 89  |
| Figura 33 – Relação da densidade aparente das argamassas no estado endurecido versus porcentagem de borracha de pneu em substituição a areia. ....  | 91  |
| Figura 34 – Relação da densidade aparente das argamassas no estado endurecido versus porcentagem de cinzas de borracha de pneu em substituição ao cimento.....  | 93  |
| Figura 35 – Densidade aparente das argamassas no estado endurecido de todos os tratamentos estudados. ....  | 95  |
| Figura 36 – Relação da resistência à compressão da argamassa no estado endurecido versus porcentagem de partículas de borracha de pneu em substituição ao agregado miúdo.....   | 98  |
| Figura 37 – Relação da resistência à compressão da argamassa no estado endurecido versus porcentagem de cinzas de borracha de pneu em substituição ao cimento.....  | 101 |
| Figura 38 – Resistência à compressão da argamassa no estado endurecido de todos os tratamentos estudados.....   | 105 |
| Figura 39 – Relação entre densidade aparente no estado endurecido versus resistência à compressão das argamassas com substituições parciais de cimento por cinzas de pneu e areia por partículas de borracha. ....  | 106 |
| Figura 40 – Curvas de variação da temperatura em função do tempo de exposição ao calor obtidas nas câmaras térmicas para a argamassa de referência e as argamassas contendo partículas de borracha de pneu.....   | 108 |
| Figura 41 – Gradiente de temperatura monitorado entre as câmaras térmicas durante o tempo de ensaio. ....   | 109 |

|   |     |
|---|-----|
| Figura 42 – Gradiente de temperatura monitorado na câmara térmica superior durante o tempo de ensaio.....   | 109 |
| Figura 43 – Curvas de variação da temperatura em função do tempo de exposição ao calor obtidas nas câmaras térmicas para a argamassa de referência e as argamassas contendo cinzas de borracha de pneu. ....  | 112 |
| Figura 44 – Curvas de variação da temperatura em função do tempo de exposição ao calor obtidas nas câmaras térmicas para a argamassa de referência, a argamassa com 20% de partículas de pneu, a argamassas com 2,5% de cinzas de pneu e a argamassa combinada, composta das substituições de 20% de borracha de pneu e 2,5% de cinzas.....                         | 114 |
| Figura 45 – Condutividade térmica das argamassas contendo partículas de borracha de pneu e cinzas de borracha de pneu. ....   | 115 |
| Figura 46 – Imagem capturadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) relativa à argamassa de referência (sem a presença de partículas de borracha de pneu ou de cinzas de borracha de pneu) Escala de 200 $\mu\text{m}$ . ....   | 119 |
| Figura 47 – Imagens capturadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) da argamassa com substituição de 20% de agregado miúdo por partículas de borracha de pneu. A) Escala de 200 $\mu\text{m}$ ; B) Escala de 30 $\mu\text{m}$ .....  | 120 |
| Figura 48 – Imagens capturadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) da argamassa com substituição de 2,5% do aglomerante por cinzas de borracha de pneu. A) Escala de 200 $\mu\text{m}$ ; B) Escala de 20 $\mu\text{m}$ ; C) Escala de 20 $\mu\text{m}$ . ....   | 121 |
| Figura 49 – Imagens capturadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) do tratamento combinado, relativo à argamassa com substituição de 2,5% do aglomerante por cinzas de borracha de pneu e 20% do agregado miúdo por partículas de borracha de pneu. A) Escala de 200 $\mu\text{m}$ ; B) Escala de 100 $\mu\text{m}$ ; C) Escala de 20 $\mu\text{m}$ ..... | 123 |

## LISTA DE TABELAS

|   |     |
|---|-----|
| Tabela 1 – Composição dos materiais utilizados nos pneus de passeio e carga. ....   | 22  |
| Tabela 2 – Características químicas do cimento CP II E 32 utilizado. ....   | 42  |
| Tabela 3 – Quantidade de material em massa para confecção dos corpos de prova. ....   | 43  |
| Tabela 4 – Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo. ....   | 45  |
| Tabela 5 – Espessuras para a camada de revestimento de argamassa. ....  | 55  |
| Tabela 6 – Porcentagem de borracha em substituição à areia e de cinza em substituição ao cimento nos diferentes tratamentos. .... | 58  |
| Tabela 7 – Traços em volume utilizados na confecção dos corpos de prova para ensaio de isolamento térmico. ....                   | 58  |
| Tabela 8 – Traços em massa utilizados na confecção dos corpos de prova para ensaio de isolamento térmico. ....                    | 59  |
| Tabela 9 – Quantidade de material em massa para elaboração dos corpos de prova para ensaio de pozolanicidade. ....                | 67  |
| Tabela 10 – Quantidade de material em massa a ser utilizado no ensaio de resistência à compressão da argamassa. ....              | 69  |
| Tabela 11 – Dimensão máxima e módulo de finura característica dos agregados miúdos. ....  | 78  |
| Tabela 12 – Massa específica e massa unitária dos agregados miúdos. ....  | 79  |
| Tabela 13 – Índice de consistência (IC) e relação água/aglomerante (A/A) das argamassas. ....                                     | 96  |
| Tabela 14 – Valores de condutividade térmica de alguns materiais comuns na construção civil. ....                                 | 118 |

## SUMÁRIO

|                |  |    |
|----------------|--|----|
| <b>1</b>       | <b>INTRODUÇÃO</b> .....  | 17 |
| <b>2</b>       | <b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....   | 21 |
| <b>2.1</b>     | <b>Pneus inservíveis</b> .....   | 21 |
| <b>2.1.1</b>   | <b>Composição dos pneus</b> .....  | 22 |
| <b>2.1.1.1</b> | <b>Borracha Natural</b> .....  | 22 |
| <b>2.1.1.2</b> | <b>Borracha sintética</b> .....  | 24 |
| <b>2.1.2</b>   | <b>Descarte de pneus no Brasil</b> .....   | 25 |
| <b>2.1.2.1</b> | <b>Reaproveitamento dos pneus na construção civil</b> .....                          | 26 |
| <b>2.2</b>     | <b>Propriedades térmicas importantes no isolamento térmico entre ambientes</b> ..... | 29 |
| <b>2.2.1</b>   | <b>Transferência de calor</b> .....  | 29 |
| <b>2.2.1.1</b> | <b>Condução</b> .....  | 29 |
| <b>2.2.1.2</b> | <b>Convecção</b> .....   | 30 |
| <b>2.2.1.3</b> | <b>Radiação</b> .....  | 31 |
| <b>2.2.2</b>   | <b>Condutividade térmica</b> .....   | 31 |
| <b>2.2.3</b>   | <b>Isolantes térmicos empregados na construção civil</b> .....                       | 32 |
| <b>2.3</b>     | <b>Revestimentos construtivos</b> .....  | 33 |
| <b>2.3.1</b>   | <b>Chapisco</b> .....  | 35 |
| <b>2.3.2</b>   | <b>Emboço</b> .....  | 36 |
| <b>2.3.3</b>   | <b>Reboco</b> .....  | 37 |
| <b>2.3.4</b>   | <b>Massa única</b> .....   | 37 |
| <b>2.4</b>     | <b>Propriedades mecânicas da argamassa</b> .....                                     | 37 |
| <b>2.4.1</b>   | <b>Materiais pozolânicos</b> .....   | 38 |
| <b>3</b>       | <b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....  | 40 |
| <b>3.1</b>     | <b>Matéria-prima</b> .....   | 41 |
| <b>3.1.1</b>   | <b>Cimento Portland</b> .....  | 41 |
| <b>3.1.2</b>   | <b>Cal Hidratada</b> .....   | 45 |
| <b>3.1.3</b>   | <b>Areia natural</b> .....   | 45 |
| <b>3.1.4</b>   | <b>Borracha de pneu</b> .....  | 49 |
| <b>3.1.5</b>   | <b>Cinzas da borracha de pneu</b> .....  | 52 |
| <b>3.2</b>     | <b>Isolamento térmico e condutividade térmica</b> .....                              | 54 |
| <b>3.3</b>     | <b>Ensaio mecânicos das argamassas no estado endurecido</b> .....                    | 66 |
| <b>3.3.1</b>   | <b>Ensaio de pozolanicidade</b> .....  | 66 |
| <b>3.3.2</b>   | <b>Ensaio de resistência à compressão das argamassas</b> .....                       | 68 |
| <b>3.4</b>     | <b>Caracterização das argamassas no estado endurecido</b> .....                      | 72 |
| <b>3.4.1</b>   | <b>Microscopia eletrônica de varredura (MEV)</b> .....                               | 72 |
| <b>3.4.2</b>   | <b>Densidade aparente no estado endurecido</b> .....                                 | 73 |

|         |  |     |
|---------|--|-----|
| 3.5     | Análise estatística .....  | 75  |
| 4       | <b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....  | 76  |
| 4.1     | <b>Caracterização dos materiais utilizados na elaboração das argamassas</b> .....                                    | 76  |
| 4.1.1   | <b>Ensaio de granulometria, massa específica e massa unitária dos agregados miúdos</b> .....                         | 76  |
| 4.1.2   | <b>Partículas de borracha de pneu</b> .....  | 80  |
| 4.1.2.1 | <b>Microscopia eletrônica de varredura (MEV)</b> .....   | 80  |
| 4.1.2.2 | <b>Espectrometria de fluorescência de raios X por reflexão total (TXRF) das partículas de borracha de pneu</b> ..... | 81  |
| 4.1.2.3 | <b>Termogravimetria e análise térmica diferencial</b> .....  | 83  |
| 4.1.3   | <b>Cinzas de borracha de pneu</b> .....  | 84  |
| 4.1.3.1 | <b>Microscopia eletrônica de varredura</b> .....   | 84  |
| 4.1.3.2 | <b>Espectrometria de fluorescência de raios X por reflexão total (TXRF) das cinzas de borracha de pneu</b> .....     | 85  |
| 4.1.4   | <b>Cimento Portland</b> .....  | 87  |
| 4.2     | <b>Pozolanicidade das cinzas de borracha de pneu</b> .....   | 88  |
| 4.3     | <b>Caracterização das argamassas produzidas</b> .....  | 90  |
| 4.3.1   | <b>Densidade aparente das argamassas no estado endurecido</b> .....  | 90  |
| 4.3.2   | <b>Relação A/A e trabalhabilidade</b> .....  | 95  |
| 4.3.3   | <b>Ensaio de resistência à compressão das argamassas</b> .....   | 98  |
| 4.3.4   | <b>Relação densidade resistência à compressão</b> .....  | 105 |
| 4.3.5   | <b>Isolamento térmico</b> .....  | 107 |
| 4.3.6   | <b>Microscopia eletrônica de varredura (MEV)</b> .....   | 118 |
| 5       | <b>CONCLUSÃO</b> .....   | 124 |
|         | <b>REFERÊNCIAS</b> .....   | 126 |

## 1. INTRODUÇÃO

O setor da construção civil engloba todas as atividades relativas à produção de obras de construção, como edifícios, estradas, portos, aeroportos, canais de navegação, túneis, instalações prediais, obras de saneamento, de fundações e de terra em geral.

A construção civil é um segmento de grande importância para a economia, empregando um grande número de pessoas e gerando riqueza e desenvolvimento ao país. Por outro lado, esse segmento é um grande gerador de impactos ambientais pelo consumo de recursos naturais, pela modificação da paisagem e pela geração de resíduos (SCHERRER; SILVA; BRITO, 2014). O consumo de recursos naturais pela construção civil é um fator de grande preocupação, uma vez que esse setor é considerado o que mais consome recursos naturais. A estimativa é que a construção civil seja responsável por algo entre 20 e 50% do total de recursos naturais consumidos pela sociedade (JOHN, 2000). A exploração exagerada de matérias-primas em grandes quantidades reduz os recursos naturais disponíveis no planeta e contribui para o aumento da degradação ambiental (SANTOS; DALLA VALENTINA; SOUZA, 2015).

Com a intensa industrialização, desenvolvimento tecnológico, crescimento populacional e consumo diversificado de bens e serviços, os resíduos se transformaram em graves problemas urbanos com um gerenciamento oneroso e complexo (ANGULO; ZORDAN; JOHN, 2001), sendo necessárias ações que visem a reduzir, reutilizar ou reciclar esse material de maneira a amenizar os danos decorrentes do seu descarte em locais inadequados e que causam danos, algumas vezes, irreparáveis ao meio ambiente, assim como também na saúde humana.

O aproveitamento de resíduos na composição de novos materiais vem crescendo rapidamente em todas as atividades que permitem a sua inserção para

melhoramento de algumas propriedades ou para redução de custos, trazendo melhorias técnicas e operacionais. Existe uma constante busca por materiais com desempenho elevado e que ofereça melhores propriedades mecânicas, térmicas e acústicas, assim como um baixo custo de implantação, manutenção e rapidez de execução.

O ser humano passa um grande tempo da sua vida em ambientes fechados, que podem englobar as edificações de moradia ou edificações relativas ao trabalho e, muitas vezes, esses ambientes não possuem situações adequadas ao uso, gerando, muitas vezes, condições inadequadas de qualidade do ar no interior das edificações, desconforto térmico, problemas de saúde e também a perda de produtividade, que é um fator que vem sendo cada dia mais explorado pelas empresas, objetivando uma melhor qualidade de vida dos trabalhadores e conseqüentemente um melhor desempenho nas atividades laborais.

A qualidade do ar e o conforto térmico em ambientes interiores estão relacionados às características do ambiente, que podem afetar a saúde e o conforto dos ocupantes de uma edificação (FELIX et al., 2010); portanto, existe a necessidade de que esse ambiente seja o mais adequado e adaptado ao bem-estar de quem os frequenta, de forma que, fatores que possam causar danos à saúde ou ao bem-estar dessas pessoas, como ruído, temperatura extrema, excesso de umidade, radiação não ionizante, vibrações, dentre outros, sejam reduzidos ou eliminados desses locais.

Hoje em dia, os principais desafios que enfrentam o setor da construção estão focados na melhoria da sua eficiência energética e na redução do impacto ambiental. Dessa forma, materiais ecológicos, utilizando recursos renováveis, estão em pleno desenvolvimento e consistem em uma solução interessante para elaboração de materiais isolantes térmicos e acústicos (CHABANNES et al., 2014). Um dos métodos eficazes para melhorar a eficiência energética dos edifícios, diminuindo o consumo de energia, é melhorar as propriedades

térmicas de argamassa de revestimento pela elaboração ou utilização de materiais isolantes (JIANG et al., 2016). As argamassas para melhoria do isolamento são habitualmente utilizadas nas paredes dos edifícios e são um material elaborado de cimento Portland e agregado miúdo (areia), podendo conter ainda outras adições e aditivos.

Uma forma eficaz de melhorar as propriedades térmicas de argamassa de revestimento é a utilização de partículas de borracha recicladas. Esses materiais têm a capacidade de absorver e liberar energia a certa faixa de temperaturas, o que os torna muito eficazes para bloquear o calor transmitido do exterior para o interior de um edifício (MESHGIN; XI; LI, 2012). Quando as partículas de borracha são utilizadas como aditivo em argamassa de revestimento, as propriedades térmicas da argamassa são melhoradas enquanto algumas propriedades mecânicas como a resistência a compressão podem declinar ou permanecerem as mesmas, dependendo da quantidade de material utilizado na argamassa.

Muitos autores vêm utilizando a borracha de pneu como material de reforço ou agregado miúdo em estruturas de concreto e argamassa na construção civil. No Brasil, uma parte dos pneus inservíveis é reaproveitada de diversas formas, como em solados de sapato, materiais de vedação, dutos pluviais, pisos para quadras poliesportivas, pisos industriais e tapetes para automóveis. Existe também o uso da borracha moída de pneus em asfalto para uso em pavimentação e em argamassa, visando ao isolamento térmico; porém, a grande maioria desses pneus inservíveis é utilizada como combustível alternativo nas indústrias de cimento (COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM - CEMPRE, 2016).

Dentre os pneus inservíveis que não são aproveitados como matéria-prima e que são descartados de forma incorreta em aterros e lixões, correspondem a cerca de 0,5% de todo o lixo urbano brasileiro, gerando um

grande volume em aterros devido à dificuldade de compactação desse tipo de material (FRANÇA, 2004). Outro fator preocupante quanto a esse resíduo é a queima a céu aberto, que libera gases e gera uma fumaça negra de forte odor, contendo poluentes, como o dióxido de enxofre. A destinação fica sob a responsabilidade da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), Lei 12.305 de agosto de 2010, que incentiva e implementa apoio às soluções compartilhadas entre cidades e estados, nos planos de gestão de resíduos (BRASIL, 2010).

O uso dos resíduos de pneus inservíveis como materiais de isolamento térmico nas construções reduzem o consumo de energia e, conseqüentemente, o uso de recursos naturais, além de garantir a redução de um causador de graves problemas ambientais e ainda melhorar o conforto térmico de quem permanece nesses ambientes.

Nesse contexto, este trabalho vem para alvitrar a utilização de pneus inservíveis como matéria-prima em novos materiais isolantes na construção civil objetivando ainda avaliar o uso das partículas e das cinzas, obtidos através de borracha de pneus inservíveis, sendo utilizados como reforço em argamassa de revestimento, visando a uma menor transferência de calor e, conseqüentemente, um melhor conforto térmico no interior das edificações, enquanto mantem a resistência à compressão dentro dos limites estabelecidos na norma vigente.

## **2. REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 Pneus inservíveis**

De acordo com a resolução CONAMA 416/09 (BRASIL, 2009), pneu ou pneumático é um componente de um sistema de rodagem, constituído de elastômeros, produtos têxteis, aço e outros materiais e contendo fluido(s) sobre pressão, que quando montado em uma roda de veículo, transmite tração dada à sua aderência ao solo, sustenta elasticamente a carga do veículo e resiste à pressão provocada pela reação do solo.

Quando um pneu não tem mais condições para ser utilizado no rolamento de automóveis, e também não pode mais ser reformado, ele recebe o nome de pneu inservível e a partir desse ponto, ele deve ser destinado à reciclagem ou reutilização. O pneu inservível é um resíduo que, se não houver um controle relativo ao seu descarte, pode vir a prejudicar o meio ambiente.

Com a resolução 416 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (BRASIL, 2009), a reciclagem de pneus inservíveis passou a ser obrigatória e os fabricantes e importadores de pneus novos, com peso unitário superior a 2,0 kg, são obrigados a coletar e dar destinação adequada aos pneus inservíveis existentes no território nacional, sendo para cada pneu novo comercializado para o mercado de reposição, as empresas fabricantes ou importadoras devem dar destinação adequada a um pneu inservível.

No ano de 2015, o Brasil produziu um total de 68.631.000 unidades de pneus (ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE PNEUMÁTICOS - ANIP, 2015). Quase metade de toda a produção anual brasileira de pneumáticos é descartada nesse mesmo período. Esses pneus, muitas das vezes, são descartados em campos, terrenos baldios, aterros sanitários, beiras de estrada, córregos ou queimados a céu aberto, gerando gases poluentes devido à constituição da borracha.

### 2.1.1 Composição dos pneus

Dentre os componentes encontrados em maior quantidade nos pneus, estão a borracha estireno-butadieno (SBR), que apresenta resistência à abrasão e aos esforços, os óleos, que são misturas de hidrocarbonetos aromáticos que servem para conferir maciez à borracha e aumentar sua trabalhabilidade durante sua confecção, e o enxofre, que é usado para ligar as cadeias de polímeros dentro da borracha e também endurecer e prevenir deformação excessiva a elevadas temperaturas (GOULART, 1999). O acelerador é tipicamente um composto organo-sulfúrico que age como um catalisador para o processo de vulcanização. O óxido de zinco e o ácido esteárico também agem para controlar a vulcanização e realçar as propriedades físicas da borracha.

A composição e a porcentagem em peso de cada material utilizado para a construção dos pneus de automóvel, caminhão e ônibus são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição dos materiais utilizados nos pneus de passeio e carga.

| <b>Materiais</b>                              | <b>Pneu de automóvel (%)</b> | <b>Pneu de carga (%)</b> |
|---|------------------------------|--------------------------|
| Borracha natural                              | 14                           | 27                       |
| Borracha sintética                            | 27                           | 14                       |
| Negro de fumo                                 | 28                           | 28                       |
| Aço   | 14-15                        | 14-15                    |
| Tecido, aceleradores, antiozônio, óleos, etc. | 16-17                        | 16-17                    |

Fonte: Lagarinhos e Tenório (2008).

#### 2.1.1.1 Borracha Natural

A borracha natural é um polímero de poli-(cis-1,4-isopreno), apresentando algumas propriedades que a tornam única devido à sua estrutura intrínseca, alta massa molar e presença de outros componentes como proteínas, carboidratos, lipídios e minerais presentes no látex (RIPPEL; BRAGANÇA, 2009).

Cerca de 2500 plantas são produtoras do látex; porém, somente o látex da *Hevea brasiliensis* se estabelece como fonte comercial importante do látex de borracha natural e correspondente a 99% da produção de látex em todo o mundo (SANCHES, 2012). Por ter moléculas maiores e mais pesadas que a borracha sintética, a borracha natural tem uma estrutura mais estável, se desgastando menos com o atrito além de ser mais elástica. Esse compósito proporciona baixa geração de calor, alta resistência a rupturas, boa resistência a abrasão e tem características elásticas na construção do pneu.

De acordo com o IAC (Instituto Agrônomo de Campinas), a produção mundial de borracha natural em 2012 foi de 11.327 mil toneladas, dos quais a Tailândia é a maior produtora com 31,00% da produção, seguida da Indonésia com 26,61%, Malásia com 7,63%, Índia com 8,11% e Vietnã com 7,60%. O Brasil produziu cerca de 1,5% da produção mundial, assumindo uma posição distante dos maiores produtores, o que se deve, provavelmente, ao descaso para um produto de tão alto valor econômico-social. Desde a década de 50, quando o Brasil se tornou definitivamente um país importador de borracha natural de seringueira, o déficit em relação à produção interna desse produto no mercado interno vem crescendo a cada ano por falta de planejamento e de uma política proativa com investimentos em novos plantios.

A borracha natural é um material estratégico que não pode ser substituído por borrachas sintéticas (poli(butadieno-estireno), borracha butílica, policloropreno e poli-isopreno) em diversos tipos de aplicações. A utilização da borracha natural abrange uma diversidade de artefatos, principalmente devido às excelentes propriedades mecânicas que ela pode conferir (SANTIN; PINTO; JACOBI, 2012).

O fato de poder ser utilizada nos mais variados produtos acontece em virtude de suas propriedades especiais, como resiliência, flexibilidade, elasticidade, resistência à abrasão, à corrosão e ao impacto, fácil adesão a

tecidos e aço, propriedades isolantes, impermeabilidade a líquidos e gases, capacidade de dispersar calor, maleabilidade a baixas temperaturas e também à relação entre preço e desempenho das borrachas sintéticas que se equiparam à borracha natural.

Dentre os materiais em que a borracha natural está presente, pode-se destacar os adesivos, preservativos, luvas descartáveis, material cirúrgico, revestimentos, impermeabilização de fios e tecidos, pisos e também na indústria de pneumáticos, que tem um enfoque muito grande nesse tipo de borracha consumindo quase 75% da borracha produzida no mundo, segundo o IAC (Instituto Agrônômico de Campinas).

O consumo de borracha natural no mundo vem crescendo muito e, uma das explicações para essa elevação no consumo mundial do produto, é o aumento na produção mundial de carros de passeio, que saiu de aproximadamente 28,9 milhões de unidades produzidas em 2006 para aproximadamente 37,40 milhões em 2015 (IAC, 2015).

#### **2.1.1.2 Borracha sintética**

Sempre houve um grande esforço para a produção de borracha sintética com intenção de substituir a borracha natural. No início da Primeira Grande Guerra, foram obtidos tipos inferiores de borracha a partir de 2,3-dimetilbutadieno na Alemanha e na antiga União Soviética (MARTINS, 2005). A obtenção dessa borracha com custo mais baixo e maior grau de pureza do 1,3-butadieno incentivou o desenvolvimento da pesquisa para se conseguir borrachas à base de polibutadieno (MANO; MENDES, 1999; PIRES, 2000). Esses novos produtos, apesar de ter um custo mais baixo, não apresentavam propriedades elásticas tão notáveis quanto às apresentadas pela borracha natural (MANO; MENDES, 1999).

A borracha sintética obtida do petróleo tem a composição química bastante semelhante à da borracha natural, suas propriedades físicas são viáveis para alguns produtos e inviáveis para vários outros devido a algumas propriedades inferiores. Ela pode ser sintetizada através da polimerização de uma variedade de monômeros, como o isopreno (2-metil-1,3-butadieno), o 1,3-butadieno, o cloropreno (2-cloro-1,3-butadieno), e o isobutileno (metilpropeno). O elastômero de estireno-butadieno (SBR) é uma borracha sintética, mas que se assemelha à borracha natural, embora menos elástica e mais homogênea. O SBR é uma borracha muito consumida no mundo e utilizada na confecção das bandas de rodagem de pneus de algumas categorias de carros (SALINI, 2000). Ela também é considerada uma borracha de uso geral, excluindo-se alguns tipos de utilização, como pneus de aviões e caminhões pesados. Quase todos os produtos provenientes da borracha podem ser fabricados total ou parcialmente com o SBR, substituindo ou se combinando com a borracha natural e outros elastômeros.

### **2.1.2 Descarte de pneus no Brasil**

O aumento do número de veículos que circulam todos os dias provoca o aumento na quantidade de pneus inservíveis. Dados estatísticos mostram que, no Brasil, são geradas 300 mil toneladas de pneus que não servem mais para a rodagem nos automóveis a cada ano, das quais apenas 10% são recicladas (SILVA et al., 2012).

Segundo a ANIP (2015), a produção de pneumáticos, incluindo as categorias carga, caminhoneta, passeio, moto, agrícola, OTR, industrial e avião, chegou a 68.631.000 unidades no ano de 2015. Desse valor, o país exportou 13.851.710 unidades e importou 30.176.900 unidades de pneus. A estimativa é que cerca de 30 milhões de pneus são descartados por ano, sendo muitos retidos

pelos donos nas residências ou abandonados nos mais diversos locais, sem nenhuma preocupação com os transtornos ambientais.

Uma questão de difícil solução é a acomodação final dos pneus. Um sério problema que a população enfrenta é o gerenciamento e a destinação final dos resíduos gerados pela sociedade. Os pneus que são descartados são uma parte significativa desse problema, já que são de difícil compactação, ocupando muito espaço tanto na armazenagem quanto no transporte, são inflamáveis e geram gases tóxicos quando queimados e representam uma ameaça à saúde pública porque servem como ambiente perfeito para a proliferação de insetos e ratos, dois grandes agentes de transmissão de doenças (LACERDA, 2001).

O destino final consciente de resíduos sólidos gerados pelo homem tem sido objeto de muitas pesquisas que acabam tendo como foco principal o aproveitamento desses resíduos para gerar materiais alternativos (CINTRA; PAIVA; BALDO, 2014). Adicionar em aplicações de engenharia os produtos reciclados, em muitos casos, pode alterar ou melhorar, sob baixa relação custo/benefício, propriedades com reflexos positivos no desempenho do produto final. Nesse sentido, a construção civil é uma das áreas que tem absorvido grande quantidade de resíduos sólidos reciclados em constituintes de materiais empregados, como é o caso dos resíduos de pneu.

#### **2.1.2.1 Reaproveitamento dos pneus na construção civil**

A aplicação de resíduos na composição de novos materiais é uma intenção mundial que vem aumentando rapidamente dentro dos ramos da atividade econômica e consideram a diminuição de custos, trazendo, por vezes, melhorias, facilidades técnicas e operacionais. Tal prática visa a diminuir o acúmulo desse resíduo na natureza, contribuindo assim para uma solução mais sustentável para a área da engenharia civil e a sociedade.

A utilização dos pneus triturados em vez dos materiais de construção utilizados convencionalmente apresenta diversos benefícios, como densidade reduzida, melhores propriedades de drenagem e melhor isolamento térmico e acústico (KAMIMURA, 2002). Os pneus descartados inteiros podem ser utilizados em diversas aplicações, como, por exemplo, em obras de contenção, nas margens de rios para evitar desmoronamentos, construções de quebra-mares, etc. (ODA; FERNANDES, 2001). Existem ainda outras aplicações onde o pneu é empregado na construção civil, entre elas estão o uso como material de enchimento de peso leve, na drenagem em campo séptico, no aterro em estradas, no suporte de base de estrada, no sistema de drenagem de gases em aterros sanitários, como material para compostagem, como estabilizadores de encostas, no controle de erosão, em diques, em barragens, como isolante térmico e acústico, na drenagem de aterro sanitário, como aditivos para pavimentos asfálticos e pistas esportivas, em cobertura de parques infantis, em concretos leves, etc. (KAMIMURA, 2002).

O concreto, assim como a argamassa com adição de borracha de pneu pode ser um excelente material quando submetido a efeitos de impacto e que não necessita de alta resistência mecânica (ALBUQUERQUE et al., 2006). A borracha de pneus ou o material em si são atrativos para usar como um subproduto, uma vez que a carcaça obtida a partir de reciclagem é fácil de transportar, além do que a carcaça obtida a partir de pneus não oferece grandes riscos, os tamanhos podem ser padronizados e também tem alta resistência ao intemperismo e envelhecimento (GRANZOTTO; SOUZA, 2013). Os pneus podem ser ainda transformados em óleo, gás e enxofre. Além disso, os arames que existem nos pneus radiais podem ser separados por meios magnéticos. Uma tonelada de pneus rende cerca de 530 kg de óleo, 40 kg de gás, 300 kg de negro de fumo e 100 kg de aço (AMBIENTE BRASIL, 2015).

Vários autores fizeram a utilização dos resíduos de pneus em seus trabalhos. Pinaffi et al. (2013) avaliaram a resistência à compressão de um concreto produzido com resíduos de borrachas de pneus em substituição gradativa à areia lavada na estrutura nas proporções de 15, 20 e 30% em volume, obtendo ganhos de leveza, onde a redução de massa e peso específico de materiais em engenharia civil é desejável, pois pode tornar a estrutura final mais leve. Por outro lado, os ensaios de resistência à compressão apresentaram uma diminuição significativa conforme feita a substituição, uma vez que a resistência à compressão do concreto é fator decisivo para utilização, tanto para função estrutural e não estrutural.

Baroni (2007) utilizou os pneus inservíveis para estabilização de taludes através da construção de um muro de gravidade sendo constituído por camadas horizontais de pneus preenchidos com rocha basáltica. Dentre as principais conclusões do autor, além da economia, este tipo material, quando utilizado nos muros, apresenta uma solução ambientalmente correta para os pneus inservíveis, apresentando uma ótima alternativa para contenção de taludes e aterros podendo acomodar pequenos recalques diferenciais.

Granzotto e Souza (2013) apresentaram experimentos em concretos de pavimentação com diferentes taxas de adição de pó de borracha nas proporções de 5, 10 e 15% em peso utilizando o traço 1 : 2 : 3 (cimento : areia : cascalho), onde a areia foi substituída nas porcentagens citadas por borracha de pneu e observaram que a utilização de borracha como agregado fino é perfeitamente viável. Os resultados experimentais revelaram que a adição de borracha até 5% em substituição à areia pode produzir concretos com resistência à compressão e resistência à tração semelhante à obtida para o concreto normal.

Herrero, Mayor e Hernández-Olivares (2013) realizaram um estudo em argamassas com a adição de várias frações e tamanhos de partículas de borracha de pneu inservível, em volume, avaliando as propriedades físicas e mecânicas,

bem como a condutividade térmica e as propriedades de isolamento. Os resultados experimentais obtidos para as amostras com adição de borracha mostraram uma melhoria no desempenho térmico e acústico, bem como uma redução da densidade.

Todas as utilizações do pneu nos trabalhos citados apresentaram alguma vantagem, podendo ser essa, na diminuição do peso do concreto, na solução dos problemas relacionados aos resíduos sólidos e, quando se trata da resistência à compressão e tração, mostrando que novos estudos devem ser feitos para o aprimoramento do uso do pneu na construção civil.

## **2.2 Propriedades térmicas importantes no isolamento térmico entre ambientes**

### **2.2.1 Transferência de calor**

A mudança de calor ocorre pela diferença de temperatura que existe entre dois pontos. Essa diferença pode funcionar como a força motriz que leva calor das coordenadas de temperatura mais alta para as coordenadas de temperatura mais baixa. Esse fenômeno visa a alcançar uma situação termodinâmica mais estável, resultante da uniformização das temperaturas (ÇENGEL, 2009). No interior dos isolantes térmicos, o calor se movimenta através dos três mecanismos de transmissão, sendo eles a condução, convecção e radiação.

#### **2.2.1.1 Condução**

Condução de calor em uma substância é a transferência de energia de partículas mais energéticas para partículas adjacentes menos energéticas. Pode ocorrer em sólidos, líquidos ou gases (ÇENGEL, 2009). A condução térmica pode ser também considerada como a transferência de energia térmica entre dois corpos que estão em contato direto. Para que ocorra essa transferência de energia, deve haver uma diferença de potencial térmico. Os átomos ou

moléculas do material mais quente encontram-se mais agitados em relação aos átomos do material mais frio. No caso de sólidos, seus constituintes vibram em torno de uma posição de equilíbrio. Essa vibração é transferida de átomo para átomo por meio das forças interatômicas, de tal forma que o contato entre os átomos da superfície mais quente e os átomos da superfície mais fria faz com que a vibração seja transferida para os átomos do corpo com menor temperatura (MATTOS; DRUMOND, 2004).

### **2.2.1.2 Convecção**

Na convecção, há a necessidade da existência de um fluido, sujeito a movimentos macroscópicos, através do qual o calor se propaga. Refere-se à transferência de calor entre a superfície e um fluido em movimento, quando se encontram em temperatura diferentes. Ocorre pela difusão devido ao movimento molecular aleatório e ao transporte de energia, conforme o movimento macroscópico do fluido (KUNZLER, 2003). Os fenômenos de convecção aceleram a uniformização da temperatura, já que fazem a condução de calor dentro das moléculas que antes estavam distantes e conserva altas as diferenças de temperatura na fonte de calor e meio (ÇENGEL, 2009). A convecção é um modo de transferência de energia entre a superfície sólida e a líquida ou gás adjacente que está em movimento. Há a convecção natural, que ocorre sempre quando um corpo é inserido num fluido a uma temperatura maior ou menor do que a do corpo. Em decorrência da diferença de temperatura, o calor flui entre o fluido e o corpo e causa uma variação de densidade nas camadas fluidas localizadas nas proximidades da superfície. Há também a convecção forçada, quando o movimento é resultante de um agente externo, como uma bomba ou um ventilador.

### **2.2.1.3 Radiação**

A radiação é a energia emitida pela matéria na forma de ondas eletromagnéticas como resultado de variações das configurações eletrônicas dos átomos ou moléculas. Ela não necessita de um meio suporte, podendo ocorrer em vácuo e fundamenta-se nas propriedades emissoras dos corpos. Sempre que houver uma elevação de temperatura de um sólido, os seus átomos e moléculas vão ficar excitados e contraem níveis energéticos não fundamentais; com isso, uma tendência para voltar a estados energéticos mais baixos e à sua superfície emite radiação eletromagnética (ÇENGEL, 2009). Ela pode ser entendida como o processo de termotransferência a partir da propagação de energia por meio de ondas eletromagnéticas. Todos os corpos emitem e recebem radiação eletromagnética continuamente, estabelecendo, assim, uma contínua transferência de energia (MATTOS; DRUMOND, 2004).

### **2.2.2 Condutividade térmica**

Uma das propriedades físicas de maior importância em um material é a condutividade térmica. Ela é a propriedade que estabelece os níveis de temperatura de trabalho de um material, sendo um parâmetro importante em problemas envolvendo transferência de calor em regime estacionário.

Os baixos valores de condutividade térmica são determinados, quando se pretende diminuir perdas ou ganhos de calor, para materiais de uso em isolamento (SANTOS, 2002). Os metais sólidos possuem os maiores valores de condutividade térmica. Eles são os melhores condutores de calor, enquanto os gases apresentam valores muito pequenos de condutividade térmica, sendo esses maus condutores ou isolantes térmicos.

A condutividade térmica de produtos de construção é um parâmetro cada vez mais importante que influencia significativamente a energia associada com aquecimento e arrefecimento dos edifícios.

Além da condutividade térmica, o calor específico e a difusividade térmica são propriedades importantes que possibilitam analisar a utilização de materiais na construção civil na busca pela melhoria das condições de conforto térmico e habitabilidade nos ambientes. O calor específico é uma quantidade termodinâmica importante em altas temperaturas, e está associado ao consumo de energia durante o aquecimento, enquanto que a difusividade térmica é uma medida da rapidez com a qual o calor se propaga através do material e é importante em problemas envolvendo estado não estacionário de trocas de calor (SANTOS et al., 2004). De modo geral, a condutividade térmica tende a ser maior para os sólidos, decrescendo para os líquidos e sendo muito baixa nos gases (KUNZLER, 2003).

### **2.2.3 Isolantes térmicos empregados na construção civil**

A qualidade de vida da população dentro das edificações pode sofrer sérios transtornos devido à carga térmica provenientes das altas e baixas temperaturas externas às construções. Alguns materiais empregados na construção civil, como os blocos cerâmicos e o próprio concreto armado, já possuem certa característica isolante, mas, às vezes, não são suficientes para determinadas aplicações em que se necessita de elevado grau de atenuação. Para essa atenuação suplementar, pode-se empregar, por exemplo, lã de vidro, lã de rocha, espuma rígida à base de PVC, fibra mineral etc. (CATAI; PENTEADO; DALBELLO, 2006).

Podem ser utilizados outros materiais, como o poliestireno, poliuretano, e até cerâmica, quando alocados no meio de outros materiais, como as placas e telhas sanduíche. O poliestireno expandido e a espuma de poliuretano são mais comumente utilizados para isolamento em temperaturas mais baixas (abaixo de 80°C ou 90°C), pois podem se degradar pelo calor. Nesses materiais, podem ser colocados aditivos para melhorar o comportamento quanto à combustibilidade e

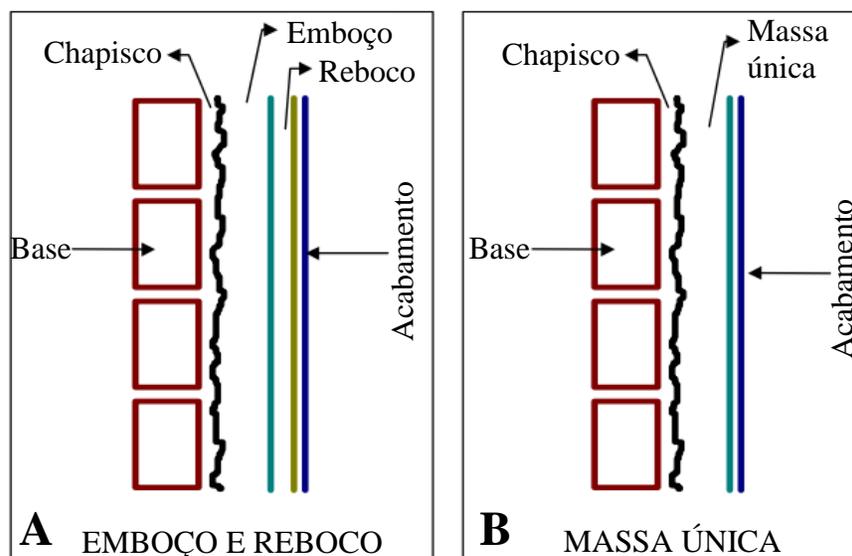
resistência ao fogo por mais tempo. Já no caso de temperaturas mais elevadas, os materiais à base de lã apresentam melhor desempenho, suportando temperaturas de até 250°C, ao passo que as lãs de rocha suportam temperaturas um pouco mais elevadas e as lãs cerâmicas suportam temperaturas acima de 1000°C (CARDOSO, 2010).

### **2.3 Revestimentos construtivos**

Argamassa é uma mistura homogênea de agregado(s) miúdo(s), aglomerante(s) inorgânico(s) e água, contendo ou não aditivos, com propriedades de aderência e endurecimento, podendo ser dosada em obra ou em instalação própria (argamassa industrializada) (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 2001).

Os tipos e a espessura dos revestimentos variam também de acordo com o método construtivo empregado (VASQUES; PIZZO, 2014) e, dentre os tipos que variam por causa desse fator, os de maior importância nesse estudo são o chapisco, o emboço, o reboco, mostrados na Figura 1A e massa única mostrados na Figura 1B.

Figura 1 – A) Esquema de uma parede revestida com chapisco, emboço e reboco; B) e parede revestida com chapisco e massa única.



Fonte: Maciel, Barros e Sabbatini (1988).

O sistema convencional é formado por pilares, vigas e lajes de concreto armado, sendo os vãos preenchidos com tijolos cerâmicos para vedação. O peso da construção, neste caso, é distribuído nos vigas, fundações, pilares e lajes, e por isso, as paredes são conhecidas como não portantes. Na construção de elementos como pilares e vigas, são usados aço estrutural e formas de madeira. Após a construção das paredes, é preciso rasgá-las para embutir as instalações hidráulicas e elétricas. A etapa de revestimento, caracterizada pela aplicação do chapisco, massa grossa (emboço), massa fina (reboco) e pintura (VASQUES; PIZZO, 2014).

Os tipos e a espessura dos revestimentos variam também de acordo com o método construtivo empregado e, segundo as normas NBR 13749 (ABNT, 2013) e NBR 13753 (ABNT, 1996b), a argamassa pode ter uma espessura total

que varia entre 5 e 20 mm para paredes internas, entre 20 e 30 mm para paredes externas, menor que 20 mm para tetos internos e externos e entre 15 e 25 mm para contrapiso. O que faz essas variações nas espessuras dos revestimentos são as camadas de chapisco, emboço e reboco.

Em vários países, a produção de revestimento tem sido feita através da utilização de projeção mecânica contínua de argamassas (AUSTIN; ROBINS; GOODIER, 2002). No Brasil, o lançamento manual de revestimento ainda é o mais utilizado.

Os revestimentos das paredes são uma parte significativa das edificações e contribuem para a proteção contra ações climáticas, mecânicas e/ou ambientais (CINTRA; PAIVA; BALDO, 2014). Um dos revestimentos tradicionais e que no Brasil seu uso é de grande relevância é o revestimento à base de argamassa.

As principais funções do revestimento à base de argamassa são: proteger as estruturas de vedação das edificações da ação direta dos agentes agressivos, melhorar e conferir isolamento térmico e acústico, regularizar a superfície para que fique preparado para um posterior acabamento ou acréscimo de outro revestimento, sendo, portanto, fatores que determinam a escolha dos itens que compõem o revestimento de uma obra (CINTRA; PAIVA; BALDO, 2014).

### **2.3.1 Chapisco**

Constitui a primeira camada aplicada nos blocos cerâmicos e sua função é garantir que o emboço ou massa grossa consiga se aderir ao máximo ao substrato. O chapisco pode ser aplicado de forma tradicional, industrializado ou rolado (SANTOS, 2008). Na forma tradicional, é utilizada argamassa de cimento, areia e água, adequadamente dosada, resultando em uma película rugosa, aderente e resistente. Esse material apresenta um elevado índice de desperdício, uma vez que para sua aderência, ele deve ser lançado por meio da colher de pedreiro contra a parede, o que faz com que parte do material sofra

reflexão e a superfície fique parcialmente coberta. Pode ser aplicado sobre alvenaria e estrutura.

O chapisco industrializado consiste em uma argamassa semelhante à argamassa colante, na qual é necessário acrescentar água no momento da mistura. A aplicação é realizada com desempenadeira dentada e seu uso é feito somente sobre superfície de concreto, na forma rolada, onde há a utilização do rolo para sua aderência na parede. Para esse tipo de aplicação, a argamassa é formada por uma mistura de cimento e areia, com adição de água e resina acrílica. Pode ser aplicada tanto na estrutura quanto na alvenaria, proporcionando elevada produtividade e maior rendimento do material.

### **2.3.2 Emboço**

O emboço é uma camada de revestimento com a função de regularizar a superfície com ou sem chapisco (SANTOS, 2008). Além de distribuir e absorver tensões oriundas das movimentações da base, contribui para a estanqueidade da vedação, propiciando uma superfície que permita receber outra camada de reboco ou de outro tipo de revestimento.

O emboço é a camada que deve ser realizada posteriormente ao chapisco, sendo necessário, para a sua execução, montar, com o auxílio do prumo, um quadro com quatro taliscas por vez, fixadas com uma pequena quantidade de argamassa, com o intuito de que o emboço fique nivelado e a parede, quase finalizada para o acabamento final. A massa é aplicada com o auxílio de uma régua, regularizada com o auxílio de um sarrafo, e posteriormente o acabamento é realizado com uma desempenadeira de madeira para minimizar o consumo do reboco. A espessura dessa camada é de cerca de 2,5 cm, em média, sobre tijolos cerâmicos comuns (GISAH; THOMPSON, 2011).

### **2.3.3 Reboco**

É a última camada aplicada posteriormente ao emboço ou diretamente sobre o substrato. Sua função é a de regularizar qualquer imperfeição que possa ter ocorrido na execução do emboço, sendo aplicada com desempenadeira de madeira (VASQUES; PIZZO, 2014). Ela deve propiciar uma superfície adequada para o revestimento decorativo, como pisos cerâmicos ou pintura (SANTOS, 2008).

### **2.3.4 Massa única**

Os revestimentos constituídos por camada única, também conhecido como massa única ou reboco paulista, cumprem as funções de regularização da base e acabamento. Esse tipo de revestimento consiste em um único tipo de argamassa aplicado à base e sobre ele é aplicada uma camada decorativa como a pintura, assentamento de piso, dentre outros, sendo a alternativa mais utilizada no Brasil para revestimentos (CARASEK, 2007). A massa única pode receber acabamento sarrafeado, desempenado, camurçado, raspado, tratados quimicamente, entre outros (PEREIRA, 2014). A aparência final desse tipo de revestimento é mais grosseira que quando utilizado o sistema convencional de reboco e emboço, uma vez que o emboço possui areia média na sua composição, ao passo que o reboco é feito com areia peneirada.

## **2.4 Propriedades mecânicas da argamassa**

As principais propriedades mecânicas que devem apresentar as argamassas de revestimento são as resistências à compressão, à tração, à flexão e ao cisalhamento. De todas essas propriedades, a mais importante é a resistência à compressão, pois, geralmente, as paredes de alvenaria estão submetidas a carregamentos verticais mais intensos que os horizontais, produzidos pelo vento e sismos (MOHAMAD; RIZZATTI; ROMAN, 2011). Vários autores mostram que a resistência à compressão de concretos elaborados com agregados

reciclados tem uma resistência à compressão menor que concretos produzidos com agregados naturais para um mesmo consumo de cimento. Quando a matriz cimentícia é menos resistente que o agregado reciclado, esse passará a ter influência na resistência da argamassa, assim como na do concreto, uma vez que esses compósitos cimentícios possivelmente se romperão no agregado (CABRAL, 2007).

Os materiais de construção, quando são submetidos a temperaturas elevadas, algumas mudanças podem ocorrer em suas características, tais como a transformação de fase, perda de peso, e vínculo agregado de cimento e que afetam diretamente suas propriedades mecânicas (AKÇAÖZOĞLU et al., 2014).

#### **2.4.1 Materiais pozolânicos**

A propriedade pozolânica é encontrada em materiais silicosos ou silico-aluminosos, que, por si só, possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante; entretanto, quando são finamente triturados, esses apresentam a característica de reagirem em meio aquoso e a temperatura ambiente junto ao hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), adquirindo propriedades ligantes, ou seja, cimentícias e, portanto, insolúveis em água (FERREIRA; SILVEIRA; DAL MOLIN, 1997). A utilização de pozolanas em substituição parcial do cimento deve-se à presença de fases ativas em sua constituição química. A reação pozolânica tem como resultado a produção de fases químicas com maior estabilidade e poder aglomerante, sendo os principais responsáveis pela resistência das pastas de cimento hidratadas (CARMO; PORTELLA, 2008). Depois de certo tempo, a sílica deixa de reagir quimicamente, de maneira significativa como aglomerante e passa a atuar fisicamente, como *filler* inerte, através do efeito *filler*.

No efeito *filler*, o material fino preenche os vazios entre as partículas maiores de cimento, sendo também responsável pelo aumento da fluidez da

pasta de cimento com relações água/aglomerante muito baixas (TORALLES-CARBONARI et al., 2010).

A importância da pozolana torna-se de tal ordem que sua finura permite se posicionar entre as partículas de cimento, preenchendo os vazios (efeito físico – *filler*) e proporcionando a transformação em C-S-H (efeito químico) quando a sílica da pozolana é combinada com o hidróxido de cálcio do cimento. O fenômeno físico explica a diminuição do teor de vazios, pois ocorre enquanto não se iniciam as reações pozolânicas, tendo em vista preenchimento dos espaços existentes que seriam ocupados pelo ar (ROJAS; COBRERA, 2002).

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

O desenvolvimento deste projeto foi realizado no complexo laboratorial da Unidade Experimental de Produção de Painéis de Madeira (UEPAM), localizado na Universidade Federal de Lavras, Lavras-MG, Brasil e também no Laboratório Multidisciplinar de Materiais de Construção localizado na Unilavras, Lavras-MG, Brasil.

Na primeira etapa do projeto, foi feita a aquisição dos materiais necessários para elaboração das argamassas de revestimento, a pesagem, peneiramento e separação desses materiais, a sua caracterização e a produção dos corpos de prova para o ensaio de isolamento térmico, ensaio de resistência à compressão do cimento Portland e ensaio de densidade aparente.

As cinzas também foram obtidas nesta etapa após o peneiramento da borracha e queima das partículas de pneu em um filtro de lavagem de gases. Foram também produzidos nesta etapa corpos de prova cilíndricos com dimensões de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, que foram utilizados no ensaio de resistência à compressão da argamassa, conforme recomendado pela NBR 13279 (ABNT, 1995) e também os corpos de prova de 15 cm de largura, 15 cm de comprimento e 2 cm de altura que foram utilizados no ensaio de isolamento térmico.

Na segunda etapa, foram feitos os ensaios de resistência à compressão do cimento Portland CII E 32, segundo a norma NBR 7215 (ABNT, 1996a) e ensaio de compressão da argamassa de acordo com a NBR 13279 (ABNT, 1995) confeccionada a partir das substituições propostas. Para isso, foram produzidos corpos de prova cilíndricos com dimensões de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura. Outras caracterizações das argamassas foram feitas nesta etapa, tais como a densidade aparente, pozolanicidade da cinza de borracha de pneu com base na norma NBR 5752 (ABNT, 2014a), ensaio de isolamento térmico em câmaras

térmicas, determinação da condutividade térmica e microscopia eletrônica de varredura dos corpos de prova de argamassa.

### **3.1 Matéria-prima**

Os materiais que foram utilizados no desenvolvimento desse projeto são cimento Portland CP II E 32, cimento Portland CP II F 32, cal hidratada do tipo CH-III, areia, partículas de borracha de pneu e cinzas das partículas de borracha de pneu.

#### **3.1.1 Cimento Portland**

Os cimentos utilizados no decorrer da pesquisa foram o cimento Portland CP II E 32, da marca Holcim e o cimento Portland CP II F-32, da marca Cauê. O cimento CP II E 32 foi escolhido por ser a classe de cimento mais utilizada no Brasil e foi usado para confecção de todos os corpos de prova, com exceção dos elaborados para o ensaio de pozolanicidade, em que, por exigência na norma NBR 5752 (ABNT, 2014a), foi necessária a utilização do cimento Portland CP II F 32, por não conter pozolanas em sua constituição.

A fabricação de todos os corpos de prova, com exceção dos que foram produzidos para o ensaio de pozolanicidade, foi feita utilizando o mesmo lote de cimento, com o intuito de evitar variações da composição química e também evitar que afete o comportamento mecânico e o seu isolamento térmico. A caracterização química, fornecida pelo fabricante do cimento CP II E 32, está apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 – Características químicas do cimento CP II E 32 utilizado.

| <b>Composição Química</b>      |          |
|--------------------------------|----------|
| Determinação                   | Teor (%) |
| SiO <sub>2</sub>               | 24,04    |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 7,17     |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 2,3      |
| CaO                            | 57,45    |
| MgO                            | 3,44     |
| SO <sub>3</sub>                | 1,69     |
| K <sub>2</sub> O               | 0,57     |
| PF (1000°C)                    | 5,27     |

Fonte: Adaptado de Souza (2007).

Para a caracterização mecânica do cimento, foi realizado o ensaio de resistência à compressão do cimento Portland CII E 32 utilizando a norma NBR 7215 (ABNT, 1996a), que consiste na determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura elaborados com argamassa com traço 1 : 3 (cimento : areia normal), em massa, e com relação água/aglomerante de 0,48. A argamassa foi preparada por meio de um misturador mecânico e compactada manualmente com um soquete para argamassa em uma forma cilíndrica.

Foram confeccionados 6 corpos de prova para o ensaio nas idades de 3, 7 e 28 dias, totalizando 18 corpos de prova, sendo necessários 3 amassamentos com as quantidades descritas na Tabela 3. As argamassas foram elaboradas por meio da mistura mecânica em uma argamassadeira, colocando na cuba para a mistura, primeiramente a água, seguida do cimento. A mistura desses dois materiais foi feita em velocidade baixa por 30 segundos. Passado esse tempo foi adicionada a areia normalizada e a velocidade do misturador foi aumentada, permanecendo por mais 30 segundos. O misturador, então, foi desligado por 90 segundos e a argamassa deixada em repouso por esse tempo. O misturador foi

religado em velocidade alta por mais 60 segundos e a argamassa foi colocada nos moldes.

Tabela 3 – Quantidade de material em massa para confecção dos corpos de prova.

| <b>Material</b>                    | <b>Massa para mistura (gramas)</b> |
|------------------------------------|------------------------------------|
| Cimento Portland CP II E 32        | 624 ± 0,4                          |
| Água                               | 300 ± 0,2                          |
| Areia normal - fração grossa       | 468 ± 0,3                          |
| Areia normal - fração média grossa | 468 ± 0,3                          |
| Areia normal - fração média fina   | 468 ± 0,3                          |
| Areia normal - fração fina         | 468 ± 0,3                          |

Fonte: ABNT (1996a).

A operação de moldagem dos corpos de prova foi feita imediatamente após a fabricação da argamassa e executada em quatro camadas dentro de cada molde, sendo essas camadas divididas de forma igual em altura. Em cada uma das camadas foram executados 30 golpes com o soquete, até atingir o topo do molde, rasando o molde ao final com régua metálica. Os corpos de prova foram colocados em uma câmara úmida onde permaneceram por 24 horas, período após o qual foram desenformados, identificados e colocados submersos em uma solução de água e cal virgem até o dia do ensaio, que foi de 3, 7 e 28 dias. Para a ruptura dos corpos de prova foi utilizada uma prensa hidráulica elétrica digital, modelo CI e capacidade de 0 á 1000 KN (FIGURA 2), com uma velocidade de carregamento de 0,25 MPa/s. A resistência individual de cada corpo de prova foi obtida dividindo-se a carga de ruptura pela área da seção do corpo de prova e posteriormente foi feita a média das resistências individuais dos seis corpos de prova de mesma idade.

Figura 2 – Prensa hidráulica elétrica digital utilizada na ruptura dos corpos de prova de prova.



Fonte: Do autor (2016).

Os cimentos foram submetidos também à análise de granulometria, segundo a NBR 11579 (ABNT, 2012), sendo feito o peneiramento inicial na peneira de 75  $\mu\text{m}$  (200 mesh) por 5 minutos para eliminação das partículas mais finas. Posteriormente continuou-se o peneiramento por mais 20 minutos e o material passante pela peneira foi descartado. Para finalizar, foi feito um terceiro peneiramento por 60 segundos, aplicando uma inclinação de aproximadamente 60° na peneira e tanto o cimento passante quanto o cimento retido na peneira foram coletados e pesados separadamente para a obtenção do índice de finura do cimento Portland, que foi calculado pela Equação 1:

$$F = \frac{RC}{M} \times 100 \quad (1)$$

Em que:

F = índice de finura do cimento, em porcentagem;

R = resíduo do cimento na peneira 75  $\mu\text{m}$ , em g;

M = massa inicial do cimento, em g;

C = fator de correção da peneira utilizada no ensaio.

### 3.1.2 Cal Hidratada

Foi utilizada uma cal hidratada da marca Votorantim classe CH-III, para confecção de todos os corpos de prova, exceto para os elaborados para o ensaio de compressão do cimento Portland (ABNT, 1996a), que exige a utilização apenas de cimento e areia, e para os elaborados para o ensaio de pozolanicidade (ABNT, 2014a), que exige o uso de cimento, areia e o material pozolânico a ser testado, não sendo necessário o uso da cal.

### 3.1.3 Areia natural

A areia utilizada foi adquirida como areia média e foi ensaiada segundo a NBR NM 248 (ABNT, 2003), de forma a verificar a sua composição granulométrica e comparação com os limites de distribuição granulométrica do agregado miúdo especificados pela NBR 7211 (ABNT, 2009b), mostrados na Tabela 4.

Tabela 4 – Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo.

| <b>Porcentagem, em massa, retida acumulada</b> |                    |            |                    |                 |
|--|--------------------|------------|--------------------|-----------------|
| Peneira [mm]                                   | Limites inferiores |            | Limites Superiores |                 |
|  | Zona utilizável    | Zona ótima | Zona ótima         | Zona utilizável |
| 4,75   | 0,00%              | 0,00%      | 5,00%              | 10,00%          |
| 2,36   | 0,00%              | 10,00%     | 20,00%             | 25,00%          |
| 1,18   | 5,00%              | 20,00%     | 30,00%             | 50,00%          |
| 0,6  | 15,00%             | 35,00%     | 55,00%             | 70,00%          |
| 0,3  | 50,00%             | 65,00%     | 85,00%             | 95,00%          |
| 0,15   | 85,00%             | 90,00%     | 95,00%             | 100,00%         |

Fonte: NBR 7211 (2009b).

Para este ensaio, a areia foi seca em estufa por 24 horas a 105°C para atingir a constância de massa, uma vez que a umidade total desse material era de 1,17%. Posteriormente, foi peneirada na peneira de malha correspondente a 1,5 mm para eliminação de pedriscos maiores e outros materiais grosseiros presentes, uma vez que, pela análise dos resultados dos ensaios de granulometria e através de avaliação visual, decidiu-se peneirar a areia com o objetivo de eliminar os grãos mais grossos e, em virtude disso, reduzir a dimensão máxima característica. Além disso, esse peneiramento também foi feito objetivando a obtenção de um agregado mais apropriado para produzir uma argamassa de revestimento interno que resulte em um melhor acabamento. Depois de peneirada, a areia foi então colocada em um conjunto de peneiras da série normal estabelecidas pela NBR NM 248 (ABNT, 2003). As malhas das peneiras da série normal utilizadas foram: 4,75; 2,36; 1,18; 0,60; 0,30 e 0,15 mm, como podem ser vistas na Figura 3. No final do conjunto de peneiras ainda se encontra o fundo para peneiras para coleta do material passante na peneira de 0,15 mm.

Figura 3 – Conjunto de peneiras utilizadas para ensaio de granulometria



Fonte: Do autor (2016).

Essas peneiras foram submetidas a uma vibração por um agitador mecânico, como ilustra a Figura 4, por um tempo de 15 minutos, para permitir a separação e classificação prévia dos diferentes tamanhos de grãos da amostra.

Figura 4 – Conjunto de peneiras da serie normal sobre o agitador mecânico.



Fonte: Do autor (2016).

O material retido em cada uma das peneiras foi então coletado para determinação da porcentagem retida em cada peneira, da dimensão máxima característica, do módulo de finura e da porcentagem retida acumulada para elaboração da curva granulométrica. As curvas granulométricas foram comparadas com as zonas ótimas e zonas utilizáveis para agregados miúdos obtidas através da NBR 7211 (ABNT, 2009b).

Para o ensaio de massa específica absoluta da areia natural, foi utilizado o frasco de Chapman seguindo recomendações da norma NBR NM 52 (ABNT, 2009a), onde foram colocados 200 cm<sup>3</sup> de água no frasco e deixado em repouso para que a água aderida às paredes do frasco escoassem por completo.

Posteriormente, foi adicionado 500 gramas de areia seca em estufa em temperatura de 105°C por 24 horas. A leitura do nível atingido pela água no gargalo do frasco de Chapmam indica o volume ocupado pelo conjunto água-agregado miúdo. Para obtenção do valor da massa específica, foi utilizada a Equação 2:

$$\lambda = \frac{500}{L - 200} \quad (2)$$

Em que:

$\lambda$  - Massa específica do agregado miúdo

L - Leitura do frasco de Chapmam

A determinação da massa unitária da areia foi realizada conforme as exigências da NBR NM 45 (ABNT, 2006), que consistiu no despejo do agregado em um recipiente metálico de 0,020 m<sup>3</sup> de uma altura menor que 50 mm da borda do recipiente, pesagem do material e cálculo da massa unitária, de acordo com a Equação 3.

$$\mu = \frac{m_{r+a} - m_r}{v_r} \quad (3)$$

Em que:

$\mu$  - massa unitária do agregado, em quilogramas por metro cúbico;

$m_{r+a}$  - massa do recipiente mais o agregado, em quilogramas;

$m_r$  - massa do recipiente vazio, em quilogramas;

$v_r$  - volume do recipiente, em metros cúbicos.

### 3.1.4 Borracha de pneu

As rasas de pneu foram obtidas de uma unidade reformadora localizada na cidade de Lavras-MG e são materiais provenientes do processo de raspagem na reforma dos pneus. Essas rasas são extraídas através de uma das etapas da recauchutagem, onde uma máquina faz a raspagem e escariação dos pneus, gerando grande quantidade desse material. Foi utilizado apenas um lote de uma tonelada para este estudo. As rasas ficaram armazenadas em local seco e sem qualquer outra impureza. As partículas apresentam formatos e tamanhos diversos (FIGURA 5); por isso, foi necessário um peneiramento na peneira de malha equivalente a 1,5 mm para homogeneização (FIGURA 6).

Figura 5 – Rasas de pneu antes do peneiramento



Fonte: Do autor (2016)

Figura 6 – Raspas de pneu passantes na peneira com malha de 1,5 mm.



Fonte: Do autor (2016).

Essas partículas já peneiradas foram submetidas ao ensaio de granulometria de agregados miúdos para avaliação e comparação da curva granulométrica desse material com a curva granulométrica da areia e também com os limites de distribuição granulométrica dos agregados miúdos. Para obtenção da curva granulométrica das partículas de borracha de pneu, elas foram secas em estufa em temperatura de 105°C por 24 horas, para remoção da umidade até a constância de massa. Por ter um menor escoamento ou fluidez ao passar pelas peneiras que a areia, esse material foi sendo adicionado nas peneiras em menores quantidades obedecendo às proporções estabelecidas pela NBR NM 248 (ABNT, 2003), para obtenção da porcentagem retida em cada peneira, porcentagem retida acumulada, módulo de finura e dimensão máxima característica. As curvas granulométricas para as partículas de borracha de pneu também foram comparadas com as zonas ótimas e zonas utilizáveis para agregados miúdos prescritas na NBR 7211 (ABNT, 2009b).

Para o ensaio de massa específica absoluta das partículas de borracha de pneu, foi utilizado o frasco de Chapman (FIGURA 7) de acordo com norma NBR NM 52 (ABNT, 2009a) adaptada, onde foi empregado álcool etílico em

substituição à água devido à sua alta densidade não permitir que a borracha se misturasse ao líquido (LINTZ et al., 2010). A determinação da massa unitária da borracha foi realizada conforme as exigências da NBR NM 45 (ABNT, 2006).

Figura 7 – Frasco de Chapman utilizado na obtenção da massa específica das partículas de borracha de pneu.



Fonte: Do autor (2016).

Também foi feita uma microscopia eletrônica de varredura para análise da estrutura das partículas de pneu. Para isso, utilizou-se o microscópio eletrônico de varredura modelo LEO EVO 40 XVP Zeiss, obtendo imagens por meio de elétrons secundários, nas escalas de 50  $\mu\text{m}$ , 100  $\mu\text{m}$  e 1 mm.

Outra caracterização realizada foi a termogravimetria e análise térmica diferencial, com o objetivo de avaliar a variação de massa da amostra durante o aquecimento em função da temperatura. Outra importância dessa caracterização é avaliar a temperatura em que as partículas de borracha de pneu podem ser submetidas, sem que comprometa suas propriedades. Foi realizada ainda a espectrometria de fluorescência de raios X por reflexão total (TXRF – *Total Reflection X-Ray Fluorescence*) para análise da composição química do material

onde as amostras foram trituradas e peneiradas em malha de nylon de 50  $\mu\text{m}$  e pesadas 50 mg de cada amostra de borracha de pneu e cinzas de borracha de pneu. O aparelho de espectroscopia de raios X por reflexão total é conectado ao software Spectra, que, ao final da análise, exibe os espectros e uma tabela com vários parâmetros calculados, entre eles a concentração dos elementos. Alguns parâmetros técnicos do aparelho de TXRF S2 Picofox™ utilizados são: tensão 20 kV; corrente 0,602 mA; Anodo Mo; monocromador 17.500 multicamadas; detector de Si; fonte de raios X tubo de cerâmica metal, resfriado a ar, MCB50-0.7G; alvo de Mo com filamento de W; janela de Be 100  $\mu\text{m}$ ; e energia 17,5 keV.

### **3.1.5 Cinzas da borracha de pneu**

As cinzas da borracha de pneu foram obtidas a partir da queima das partículas de pneu já peneiradas, em um filtro de lavagem de gases localizado na UEPAM (Unidade experimental de painéis de madeira). Para o processo da queima, as partículas foram colocadas em um recipiente tampado, acoplado à base do filtro e estruturado de forma a impossibilitar a saída de gases nocivos ou materiais particulados sem algum tratamento para o ambiente externo, direcionando toda a fumaça para que passasse pelo lavador de gases (FIGURA 8).

Figura 8 – Estrutura do filtro de lavagem de gases.



Fonte: Do autor (2016).

Foi queimada, no reator mostrado na Figura 9, uma quantidade de 200 (duzentos) gramas de partículas de pneu por vez. A fumaça da queima passou por um “lavador de fumaça” que consiste de cinco aspersores, gerando uma água residuária com compostos químicos que ficaram armazenados em um tambor para ser utilizados em outros trabalhos.

Figura 9 – Queima das partículas de pneu no filtro de lavagem de gases.



Fonte: Do autor (2016).

Após fazer a queima da borracha de pneu, a cinza foi deixada para resfriamento até atingir a temperatura ambiente. Essa cinza foi triturada em um liquidificador industrial para obtenção de partículas finas e passadas na peneira de 200 mesh (75  $\mu\text{m}$ ) para homogeneização, com o objetivo de se obter partículas as mais finas possíveis para que possam ser utilizadas como pozolanas no cimento. As pozolanas constituem-se de materiais silicosos ou silicoaluminosos que, quando fragmentados em partículas muito pequenas, em contato com a água, reagem e se combinam com o hidróxido de cálcio, passando a exibir propriedades aglomerantes (OLIVEIRA et al., 2004) (FIGURA 10).

Figura 10 – Cinzas das partículas de borracha de pneu após peneiramento.



Fonte: Do autor (2016).

As cinzas foram armazenadas em local seco e sem qualquer impureza até o momento de sua utilização na argamassa. Esse material também passou por espectrometria de fluorescência de raios X por reflexão total, para análise de sua composição química.

### **3.2 Isolamento térmico e condutividade térmica**

O ensaio de isolamento térmico foi realizado para avaliar o amortecimento da carga térmica entre dois ambientes termicamente isolados e com temperaturas iniciais iguais, em consequência do uso de argamassa composta por diferentes porcentagens de partículas de borracha de pneu e cinzas

de borracha de pneu. Esse ensaio foi realizado em corpos de prova de 15 cm de comprimento por 15 cm de largura e 2 cm de espessura. As medidas de largura e comprimento escolhidas para elaboração dos corpos de prova de argamassa para isolamento térmico foram em razão da melhor disposição devido ao tamanho da abertura para a passagem de calor nas câmaras térmicas, e a espessura foi escolhida de acordo com as especificações para a camada de revestimento de argamassa descritas na NBR 13749 (ABNT, 2013), mostradas na Tabela 5.

Tabela 5 – Espessuras para a camada de revestimento de argamassa.

| <b>Revestimento</b> | <b>Espessura (mm)</b> |
|---------------------|-----------------------|
| Parede interna      | $5 \leq e \leq 20$    |
| Parede externa      | $20 \leq e \leq 30$   |
| Tetos               | $e \leq 20$           |

Fonte: ABNT (2013).

Esses materiais ensaiados foram elaborados a partir do traço em volume 1 : 2 : 9 (cimento : cal: areia), que é uma proporção muito utilizada no Brasil para revestimentos internos (SILVA, 2006). Foi utilizado, como matriz cimentícia, o cimento CPM E 32 por ser a classe de cimento mais utilizada no Brasil. A areia empregada foi peneirada em peneira de abertura igual a 1,5 mm e seca em estufa em temperatura de 105° C por 24 horas, para eliminação da umidade até a constância de massa. A borracha de pneu utilizada foi seca em estufa em temperatura de 50°C por 24 horas e peneirada em peneira de malha equivalente a 1,5 mm. Já a cinza utilizada foi peneirada na peneira de malha equivalente a 75 µm ou 0,075 mm. As quantidades dosadas para produção dos corpos de prova foram feitas em frascos com volumes aferidos.

A formulação empregada na produção dos corpos de prova para o ensaio de isolamento térmico foi baseada em estudos anteriores (AL-AKHRAS; SMADI, 2004; GANJIAN; KHORAMI; MAGHSOUDI, 2009; MOUSTAFA; ELGAWADY, 2015; RAGHAVAN; HUYNH; FERRARIS, 1998), sendo: 0%,

5%, 10%, 15% e 20% em volume de partículas de pneu em substituição ao agregado miúdo e 0%, 2,5%, 5%, 7,5% e 10% em volume de cinzas de pneu em substituição ao aglomerante, além da combinação entre a substituição de areia por partículas de borracha de pneu e cimento por cinzas de pneu, de acordo com os melhores resultados de substituição no ensaio de isolamento, e no ensaio de resistência à compressão, totalizando 10 tratamentos. Para confecção dos corpos de prova houve a necessidade de se transformar os traços em volume para traços em massa, uma vez que as medições mesmo sendo executadas em frascos com volumes aferidos tem uma menor precisão que os traços em massa. Os proporcionamentos dos materiais, em massa, foram definidos a partir da determinação da massa unitária do cimento, da cal hidratada, da areia, das partículas de borracha de pneu e das cinzas de borracha de pneu.

A Equação 4 apresenta o proporcionamento: uma unidade de volume de cimento, “a” unidades de volume de cal, “b” unidades de volume de areia, “c” unidades de volume de borracha de pneu e “d” unidades de volume de cinzas de borracha de pneu.

$$1 : a : b : c : d \quad (4)$$

A NBR NM 45 (ABNT, 2006) define massa unitária de um agregado no estado solto como sendo a relação entre a massa do agregado lançado em recipiente definido conforme as dimensões do agregado e o volume desse recipiente. A transformação do traço em volume da Equação 4 para massa, utilizando-se as massas unitárias de cada material, ficará com o proporcionamento apresentado na Equação 5.

$$1 \cdot m_{uc} : a \cdot m_{uk} : b \cdot m_{ua} : c \cdot m_{ub} : d \cdot m_{ui} \quad (5)$$

Em que:

$m_{uc}$  = massa unitária do cimento [ $g/cm^3$ ];

$m_{uk}$  = massa unitária da cal [ $g/cm^3$ ];

$m_{ua}$  = massa unitária da areia [ $g/cm^3$ ];

$m_{ub}$  = massa unitária das partículas borracha de pneu [ $g/cm^3$ ];

$m_{ui}$  = massa unitária das cinzas de borracha de pneu [ $g/cm^3$ ].

Dividindo-se a Equação 5 pela massa unitária do cimento ( $m_{uc}$ ), de modo a obter uma unidade de massa de cimento, será obtido o proporcionamento apresentado na Equação 6.

$$1 : a (m_{uk} / m_{uc}) : b (m_{ua} / m_{uc}) : c (m_{ub} / m_{uc}) : d (m_{ui} / m_{uc}) \quad (6)$$

Para melhor entendimento, os tratamentos foram nomeados com letras e números que correspondem a qual resíduo foi adicionado em substituição ao agregado miúdo e ao cimento e a quantidade desse resíduo na composição de cada argamassa. A nomenclatura é apresentada na Tabela 6

Dos tratamentos empregados nesse trabalho, T1 foi a referência (B0C0), T2, T3, T4 e T5 foram substituições de areia por borracha (B5C0, B10C0, B15C0 e B20C0), T6, T7, T8 e T9 foram substituições de cinza no cimento (B0C2,5, B0C5, B0C7,5, B0C10) e T10 corresponde a combinação entre as melhores substituições quanto ao isolamento e quanto a resistência à compressão (B20C2,5). Os traços em volume e em massa utilizados nos tratamentos são mostrados na Tabela 7 e Tabela 8, respectivamente.

Tabela 6 – Porcentagem de borracha em substituição à areia e de cinza em substituição ao cimento nos diferentes tratamentos.

| <b>Tratamentos</b> | <b>Nomenclatura</b> | <b>% borracha</b> | <b>% cinza</b> |
|--------------------|---------------------|-------------------|----------------|
| T1                 | B0C0                | 0                 | 0              |
| T2                 | B5C0                | 5                 | 0              |
| T3                 | B10C0               | 10                | 0              |
| T4                 | B15C0               | 15                | 0              |
| T5                 | B20C0               | 20                | 0              |
| T6                 | B0C2,5              | 0                 | 2,5            |
| T7                 | B0C5                | 0                 | 5              |
| T8                 | B0C7,5              | 0                 | 7,5            |
| T9                 | B0C10               | 0                 | 10             |
| T10                | B20C2,5             | 20                | 2,5            |

Fonte: Do autor (2016).

Tabela 7 – Traços em volume utilizados na confecção dos corpos de prova para ensaio de isolamento térmico.

| <b>Tratamentos</b> | <b>Cimento</b> | <b>Cal</b> | <b>Areia</b> | <b>Borracha</b> | <b>Cinza</b> |
|--------------------|----------------|------------|--------------|-----------------|--------------|
| B0C0               | 1,00           | 2,00       | 9,00         | 0,00            | 0,00         |
| B5C0               | 1,00           | 2,00       | 8,55         | 0,45            | 0,00         |
| B10C0              | 1,00           | 2,00       | 8,10         | 0,90            | 0,00         |
| B15C0              | 1,00           | 2,00       | 7,65         | 1,35            | 0,00         |
| B20C0              | 1,00           | 2,00       | 7,20         | 1,80            | 0,00         |
| B0C2,5             | 0,98           | 2,00       | 9,00         | 0,00            | 0,03         |
| B0C5               | 0,95           | 2,00       | 9,00         | 0,00            | 0,05         |
| B0C7,5             | 0,93           | 2,00       | 9,00         | 0,00            | 0,08         |
| B0C10              | 0,90           | 2,00       | 9,00         | 0,00            | 0,10         |
| B20C2,5            | 0,98           | 2,00       | 7,20         | 1,80            | 0,03         |

Fonte: Do autor (2016).

Tabela 8 – Traços em massa utilizados na confecção dos corpos de prova para ensaio de isolamento térmico.

| <b>Tratamentos</b> | <b>Cimento</b> | <b>Cal</b> | <b>Areia</b> | <b>Borracha</b> | <b>Cinza</b> |
|--------------------|----------------|------------|--------------|-----------------|--------------|
| B0C0               | 1,00           | 1,52       | 13,48        | 0,00            | 0,00         |
| B5C0               | 1,00           | 1,52       | 12,81        | 0,17            | 0,00         |
| B10C0              | 1,00           | 1,52       | 12,13        | 0,34            | 0,00         |
| B15C0              | 1,00           | 1,52       | 11,46        | 0,51            | 0,00         |
| B20C0              | 1,00           | 1,52       | 10,78        | 0,67            | 0,00         |
| B0C2,5             | 0,98           | 1,52       | 13,48        | 0,00            | 0,01         |
| B0C5               | 0,95           | 1,52       | 13,48        | 0,00            | 0,02         |
| B0C7,5             | 0,93           | 1,52       | 13,48        | 0,00            | 0,03         |
| B0C10              | 0,90           | 1,52       | 13,48        | 0,00            | 0,05         |
| B20C2,5            | 0,98           | 1,52       | 10,78        | 0,67            | 0,01         |

Fonte: Do autor (2016).

Para a confecção dos corpos de prova, as quantidades de cada material foram pesadas e misturadas para serem homogeneizados com a ajuda de uma argamassadeira como apresentado na Figura 11. Primeiramente foram colocados na argamassadeira a areia, borracha de pneu, cal hidratada e água em quantidades definidas a partir do proporcionamento utilizado e foi feita a mistura por 4 minutos em baixa rotação. Essa argamassa de cal e agregado miúdo permaneceu 24 horas em descanso, tempo correspondente ao tempo de maturação da argamassa, exigida na NBR 13276 (ABNT, 2005); posteriormente, foi adicionado o aglomerante (cimento e cinza da borracha de pneu) e a água eventualmente perdida por evaporação, de acordo com as porcentagens de cada tratamento, e executada novamente a homogeneização do material na argamassadeira, em baixa rotação, por mais 4 minutos.

Figura 11 – Argamassadeira utilizada para homogeneização da mistura cimentícia.



Fonte: Do autor (2016).

Com as argamassas já prontas, foram colocadas nas formas metálicas para moldagem dos corpos de prova, que foram utilizados no ensaio de isolamento térmico. Esta forma metálica, apresentada na Figura 12, tem capacidade para 9 corpos de prova.

Figura 12 – Forma utilizada para moldagem dos corpos de prova.



Fonte: Do autor (2016).

A argamassa ficou dentro das formas por 7 dias durante os quais a cura foi feita por molhamento. Após esse período, os corpos de prova foram

desenformados, identificados e mantidos em câmara úmida até completarem 28 dias, idade na qual eles foram levados para uma estufa e mantidos em temperatura de 50°C por 24 horas, para remoção da umidade e conduzidos ao ensaio de isolamento térmico. Esse ensaio foi feito em um conjunto de duas câmaras sobrepostas, como é mostrado na Figura 13, fabricadas de MDP (*Medium Density Particleboard*) de bagaço de cana, revestidas interiormente por uma camada de isopor de dois cm e mais internamente por uma manta térmica para que não haja interferência da temperatura ambiente na temperatura do interior das câmaras.

Figura 13 – Câmaras térmicas ligadas ao sistema de coleta de dados.

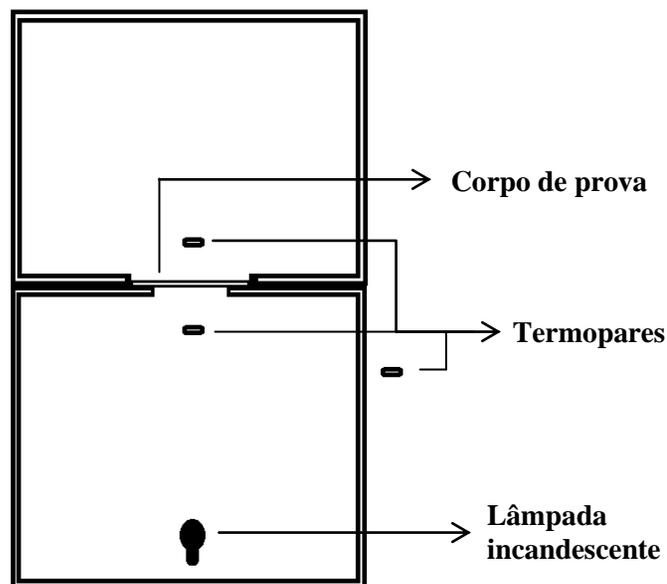


Fonte: Do autor (2016).

No centro da câmara inferior, foi instalada uma lâmpada incandescente para produção de calor que está conectada a uma plataforma de desenvolvimento de hardware, microcontrolada de código aberto (ardoíno), que recebe a leitura de um termopar e mantém a temperatura deste termopar sempre constante. No ardoíno ocorre a entrada dos dados, que é a voltagem registrada pelo termopar, a

interpretação desses dados que estão sendo recebidos e a geração de novos dados (se a lâmpada deve acender ou apagar). Com isso, esse sistema faz com que a lâmpada tenha uma oscilação entre estar acesa e apagada, mantendo a temperatura do termopar o mais estável possível. Existem nas câmaras, dois termopares, um em cada câmara, que monitoram a temperatura em posições específicas desse ambiente termicamente isolado. Mais um termopar monitora a temperatura ambiente (externa às câmaras). Dentre os termopares que estão localizados no interior das câmaras, existe um localizado na câmara inferior, próximo ao corpo de prova, que é o termopar responsável por manter a temperatura que chega à amostra sempre constante e outro termopar localizado na câmara superior, em posição espelhada em relação ao corpo de prova, ao termopar da câmara inferior. O esquema das disposições das câmaras, lâmpada, termopares e corpo de prova podem ser vistos na Figura 14.

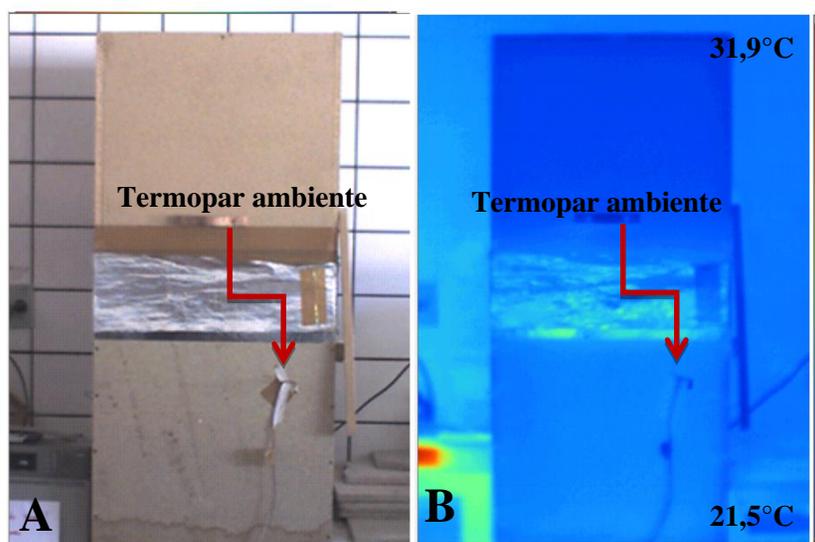
Figura 14 – Esquema do conjunto de câmaras térmicas com a disposição dos termopares, da lâmpada incandescente e do corpo de prova.



Fonte: Do autor (2016).

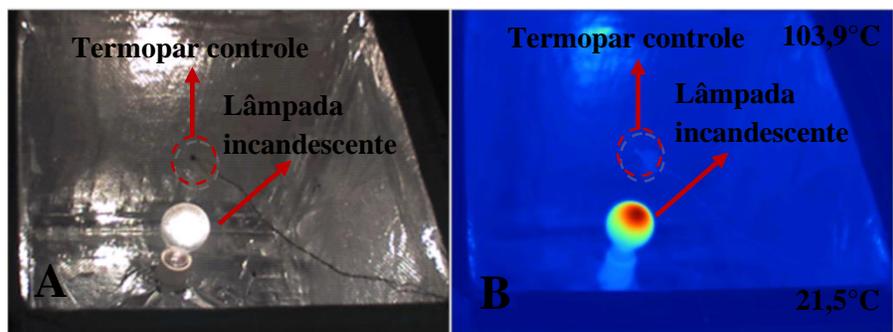
Para avaliar a possível dissipação de calor por outros locais das câmaras, que não seja pela amostra, foram feitas imagens com uma câmera termográfica com sensor infravermelho, da marca Fluke, modelo TI55FT20/54/7.5, com precisão de  $\pm 0,05^{\circ}\text{C}$ . As imagens detalhadas de cada parte das câmaras obtidas pela câmera termográfica estão apresentadas na Figura 15, Figura 16 e Figura 17.

Figura 15 – Estrutura das câmaras térmicas. A) Câmaras sobrepostas com termopar ambiente na parte externa; B) Imagem da câmera termográfica com sensor infravermelho mostrando que o isolamento das câmaras foi eficiente.



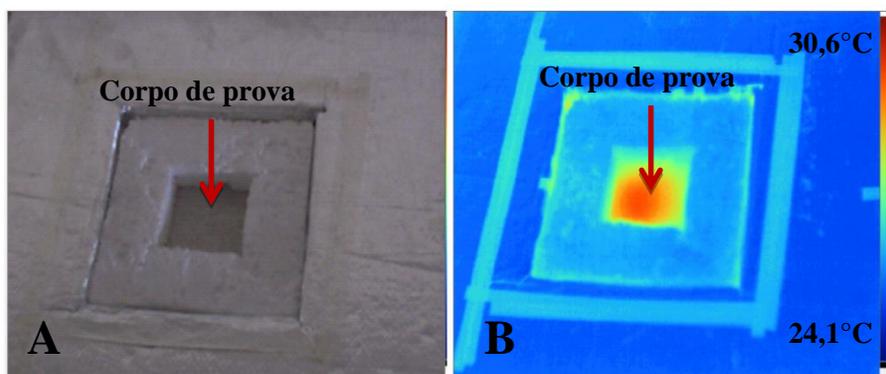
Fonte: Do autor (2016).

Figura 16 – Imagem do interior da câmara térmica inferior. A) Imagem mostrando a lâmpada utilizada para emissão de calor e o termopar que controla a temperatura que chega à amostra; B) Imagem da câmera termográfica do inferior da câmara inferior mostrando a emissão de calor pela lâmpada.



Fonte: Do autor (2016).

Figura 17 – Porta-amostras das câmaras térmicas. A) Imagem da tampa da câmara inferior, mostrando em detalhe onde é acoplado o corpo de prova e por onde passa o calor gerado pela lâmpada; B) Dissipação do calor promovido pela lâmpada passando somente pela abertura entre as caixas onde fica acoplado o termopar.



Fonte: Do autor (2016).

No interior da câmara inferior, é gerado calor por meio de uma lâmpada incandescente de 100 W. O calor que sai da lâmpada, por radiação, chega até a amostra onde é registrada a temperatura por um dos termopares localizado nessa

posição. O calor passa pela amostra e chega ao outro termopar localizado na câmara superior, que faz a leitura da tensão e armazena em um banco de dados. Para cada amostra, são feitas 1000 leituras e cada leitura é feita em um intervalo de 12 segundos, totalizando 3,33 horas (200 minutos) por amostra. O isolamento térmico foi determinado pela diferença de voltagem dos termopares localizados nas duas câmaras em posições equidistantes do corpo de prova, que é convertida em temperatura.

Devido à falta de um equipamento para medir de forma direta a condutividade térmica das amostras de argamassa, foi utilizado um equipamento desenvolvido no próprio laboratório para esse fim, que indiretamente fornece esse resultado. O princípio do método de determinação da condutividade térmica foi o mesmo utilizado por Silva (2010). O aquecimento do corpo de prova foi monitorado até a estabilização da temperatura e os valores foram coletados, tanto da face exposta à radiação da lâmpada quanto da face não exposta. De posse desses dados, da radiação que chega à amostra obtida por um medidor de radiação (FIGURA 18) e das espessuras médias de cada amostra, foi utilizada a Equação 7, para determinação da condutividade térmica das argamassas de revestimento.

$$K = P \cdot E / \Delta T \quad (7)$$

Em que:

K – Condutividade térmica [W/m°C];

P – Radiação por medida de área [W/m<sup>2</sup>];

E – Espessura do corpo de prova [m];

$\Delta T$  – Variação de temperatura observada [°C].

Figura 18 – Equipamento utilizado para medir a radiação que chega ao corpo de prova emitida pela lâmpada incandescente.



Fonte: Do autor (2016).

### 3.3 Ensaios mecânicos das argamassas no estado endurecido

#### 3.3.1 Ensaio de pozolanicidade

Nesse ensaio, foi utilizada a norma NBR 5752 (ABNT, 2014a) para determinação do índice de desempenho de materiais pozolânicos com cimento Portland aos 28 dias. Para esse ensaio, foram utilizados o cimento CII F 32, areia normalizada, cinza da borracha de pneu e água, em que foram confeccionadas duas argamassas diferentes (A e B), tendo a argamassa A em sua composição cimento, areia normalizada e água somente e a argamassa B, cimento, areia normalizada, cinza de borracha de pneu e água. Na argamassa A, em que foi feito uso da cinza de borracha de pneu, a mesma foi empregada no lugar do cimento em uma porcentagem de 25% em massa. As quantidades de matérias utilizadas em cada uma das argamassas apresentam-se na Tabela 9, das quais foram confeccionados 12 corpos de prova para cada argamassa, sendo, portanto, necessários quatro amassamentos com as quantidades descritas.

Tabela 9 – Quantidade de material em massa para elaboração dos corpos de prova para ensaio de pozolanicidade.

| Material                           | Massa para mistura (gramas) |             |
|------------------------------------|-----------------------------|-------------|
|                                    | Argamassa A                 | Argamassa B |
| Cimento Portland CP II F 32        | 624                         | 468         |
| Cinza de borracha de pneu          | -                           | 156         |
| Água                               | 300                         | 300         |
| Areia normal - fração grossa       | 468                         | 468         |
| Areia normal - fração média grossa | 468                         | 468         |
| Areia normal - fração média fina   | 468                         | 468         |
| Areia normal - fração fina         | 468                         | 468         |

Fonte: Do autor (2016).

O processo de mistura, moldagem, cura e ruptura dos corpos de prova são os mesmos descritos para o ensaio de compressão do cimento Portland, pela norma NBR 7215 (ABNT, 1996a), em que as amostras após moldadas permaneceram por 24 horas nos moldes em uma câmara úmida (FIGURA 19) e após esse tempo foram levados para imersão em uma solução de água e cal virgem, até o dia da ruptura dos corpos de prova em uma prensa hidráulica elétrica digital utilizando uma velocidade de carregamento de 0,25 MPa/s.

Figura 19 – Corpos de prova da argamassa A (referência) e argamassa B (com adição de pozolana) nos moldes cilíndricos em câmara úmida



Fonte: Do autor (2016).

O índice de desempenho com cimento Portland, aos 28 dias, foi calculado pela Equação 8:

$$I_{CIMENTO} = \frac{fcB}{fcA} \times 100 \quad (8)$$

Em que:

$I_{CIMENTO}$  - Índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias;

$fcB$  - Resistência média aos 28 dias dos corpos de prova da argamassa B;

$fcA$  - Resistência média aos 28 dias dos corpos de prova da argamassa A.

Para que a cinza de pneu seja classificada como material pozolânico, os resultados do ensaio de pozolanicidade devem estar de acordo com os requisitos estabelecidos na NBR 12653 (ABNT, 2014b).

### 3.3.2 Ensaio de resistência à compressão das argamassas

Este ensaio teve como objetivo analisar a resistência das argamassas no estado endurecido quanto ao uso da borracha de pneu em substituição parcial ao da areia, quanto ao uso da cinza de borracha de pneu em substituição parcial do cimento. Para esse ensaio, foi utilizada a norma NBR 13279 (ABNT, 1995), por meio da qual foram elaborados traços de argamassa, em massa, tomando como referência o traço em volume 1 : 2 : 9 (cimento : cal : areia), muito utilizado no Brasil para revestimentos internos, (SILVA, 2006). Os traços em volume foram convertidos em traços em massa, uma vez que, para elaboração da argamassa segundo a NBR 13276 (ABNT, 2005), é recomendada a utilização, para cada mistura com água, 2,5 quilos de material seco. As quantidades utilizadas encontram-se na Tabela 10.

Tabela 10 – Quantidade de material em massa a ser utilizado no ensaio de resistência à compressão da argamassa.

| <b>Quantidade de material [gramas]</b> |         |        |         |          |       |
|--|---------|--------|---------|----------|-------|
| Tratamentos                            | Cimento | Cal    | Areia   | Borracha | Cinza |
| B0C0                                   | 156,21  | 238,05 | 2105,74 | 0,00     | 0,00  |
| B5C0                                   | 161,31  | 245,81 | 2065,69 | 27,20    | 0,00  |
| B10C0                                  | 166,75  | 254,09 | 2022,93 | 56,23    | 0,00  |
| B15C0                                  | 172,56  | 262,96 | 1977,20 | 87,28    | 0,00  |
| B20C0                                  | 178,80  | 272,46 | 1928,15 | 120,58   | 0,00  |
| B0C2,5                                 | 152,44  | 238,25 | 2107,53 | 0,00     | 1,79  |
| B0C5                                   | 148,66  | 238,45 | 2109,32 | 0,00     | 3,57  |
| B0C7,5                                 | 144,87  | 238,65 | 2111,11 | 0,00     | 5,37  |
| B0C10                                  | 141,07  | 238,86 | 2112,91 | 0,00     | 7,16  |
| B20C2,5                                | 174,50  | 272,73 | 1930,03 | 120,70   | 2,04  |

Fonte: Do autor (2016).

As argamassas foram preparadas com antecedência de 24 horas da moldagem das formas, que corresponde ao tempo de maturação, sendo colocados na argamassadeira a areia, cal hidratada e água em quantidades definidas com base no proporcionamento utilizado e misturadas em velocidade baixa por 4 minutos. Após a mistura, a argamassa sem adição de cimento e cinza de borracha de pneu foi pesada para que, transcorrido o tempo de maturação, a quantidade de água evaporada durante esse tempo, pudesse ser repostada. As quantidades de cada tratamento referentes ao cimento e à cinza da borracha de pneu foram misturadas, nos tratamentos que continham cinza de borracha de pneu em seu traço (T6 a T9 – B0C2,5 a B0C10), (FIGURA 20) e só foram acrescentadas na argamassa após o tempo de maturação, juntamente com a reposição da água evaporada e foi realizada uma nova homogeneização por 4 minutos, em velocidade baixa.

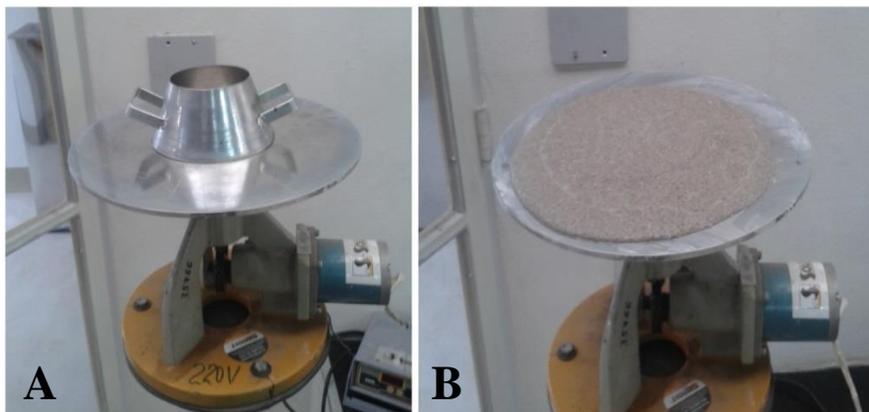
Figura 20 – Cimento e cinza de borracha de pneu, nas proporções estabelecidas nos traços, pré-homogeneizados, antes da adição na argamassa maturada.



Fonte: Do autor (2016).

Logo após a preparação, a argamassa foi colocada no molde tronco cônico, de modo centralizado sobre uma mesa elétrica *flow table* (FIGURA 21A), para avaliação do índice de consistência, conforme determinação da NBR 13276 (ABNT, 2005). O enchimento do molde tronco cônico foi realizado em três camadas sucessivas, com alturas aproximadamente iguais e foram aplicados em cada uma delas 15, 10 e 5 golpes, respectivamente, com o soquete, para uma melhor distribuição da argamassa e, ao final, foi completado o restante do volume do cone e fazendo o rasamento com régua metálica rente à borda do molde. Foram aplicadas 30 quedas de maneira uniforme na mesa *flow table*, onde a argamassa sofreu um espalhamento, de forma a ocupar um espaço circular sobre a mesa (FIGURA 21B), e foram feitas 3 medições do espalhamento com auxílio de um paquímetro para determinação do índice de consistência através da média das 3 medições.

Figura 21 – Medição do índice de consistência. A) Mesa *flow table* automatizada e molde tronco cônico, utilizados para determinação do índice de consistência; B) Espalhamento da argamassa, após executadas 30 quedas por meio da mesa *flow table*, para posterior medição do espalhamento com paquímetro.



Fonte: Do autor (2016).

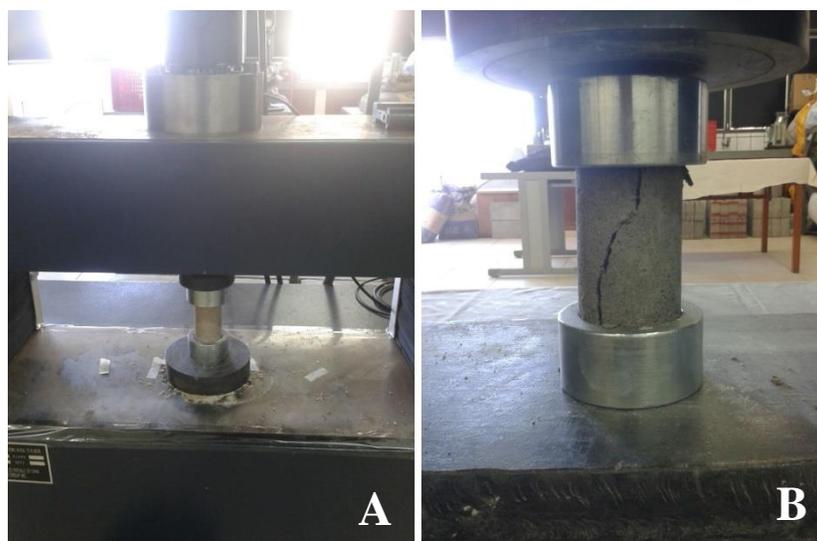
Terminado o processo de mistura e determinação do índice de consistência, a argamassa de cada tratamento foi colocada nas formas, com dimensões de 10 cm de altura e 5 cm de diâmetro, onde a moldagem dos corpos de prova foi feita em quatro camadas de alturas aproximadamente iguais, em que cada camada recebeu 30 golpes uniformes com soquete, e ao final, foi rasada no topo dos moldes com régua, segundo as recomendações da NBR 7215 (ABNT, 1996a).

Para cada tratamento, nesse ensaio foram utilizados 6 corpos de prova que permaneceram por 24 horas nos moldes, em câmara úmida e, após esse tempo, foram desenformados, identificados e colocados em uma solução de água e cal virgem até completarem a idade de 28 dias, idade em que foram rompidos (FIGURA 22A e FIGURA 22B).

Para execução da ruptura das argamassas e determinação da resistência à compressão, foi utilizada uma máquina universal de ensaios mecânicos da marca

Arotec, equipada com célula de carga de 30 toneladas. A velocidade de carregamento utilizada na máquina de ensaio foi de  $(0,25 \pm 0,05)$  MPa/s até a ruptura da amostra (FIGURA 22B).

Figura 22 – Máquina universal de ensaios mecânicos com o corpo de prova devidamente posicionado para o ensaio de resistência a compressão. A) Início do ensaio; B) Corpo de prova rompido.



Fonte: Do autor (2016).

O cálculo da resistência à compressão foi então calculado, dividindo-se a carga de ruptura pela área da seção do corpo de prova.

### **3.4 Caracterização das argamassas no estado endurecido**

#### **3.4.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)**

A MEV foi utilizada para avaliar a interface entre a matriz cimentícia e as partículas de borracha de pneu, assim como as cinzas de borracha de pneu utilizadas na produção dos corpos de prova de isolamento térmico, além da análise da porosidade das argamassas. As amostras passaram inicialmente por dois banhos de ouro, sendo posteriormente avaliadas mediante a utilização de

um microscópio eletrônico de varredura da marca Zeiss Modelo DSM 940<sup>a</sup>, pertencente ao Departamento de Fitopatologia da Universidade Federal de Lavras.

Para esse ensaio, foi utilizada uma parcela representativa de uma região fraturada dos corpos de prova utilizados nas câmaras térmicas referentes aos tratamentos B0C0, B20C0, B0C2,5 e B20C2,5, que correspondem aos tratamentos de referência, 20% de partículas de borracha de pneu, 2,5% de cinzas de borracha de pneu e o tratamento combinado entre 2,5% de cinzas e 20% de borracha, respectivamente.

#### **3.4.2 Densidade aparente no estado endurecido**

No presente trabalho, foi avaliada a densidade aparente da argamassa no estado endurecido, segundo a NBR 13280 (ABNT, 2005). O ensaio foi realizado para 6 corpos de prova de cada um dos tratamentos. As amostras foram moldadas, adensadas e curadas e o ensaio foi feito na idade de 28 dias.

Para o preparo dos corpos de prova, foi feita a mistura dos componentes de cada traço de acordo com o proporcionamento estabelecido em cada tratamento. Foi aplicada uma fina camada de óleo mineral nas faces internas do molde prismático com dimensões de 4 cm de largura, 4 cm de altura e 16 cm de comprimento e, posteriormente, introduzida uma porção de argamassa preparada. Com o auxílio do nivelador de camadas, foi feito o espalhamento da argamassa no molde e, em seguida, foram aplicadas 30 quedas através da mesa de adensamento. Posteriormente, foi colocada mais uma camada de argamassa no molde, e depois de novamente uniformizar o espalhamento, foram aplicadas novamente mais 30 quedas na mesa de adensamento. Os corpos de prova foram desmoldados 48 horas após a moldagem e permaneceram ao ar livre até o dia do ensaio de densidade de massa (FIGURA 23).

Figura 23 – Corpos de prova utilizados no ensaio de densidade de massa aparente em processo de cura ao ar livre.



Fonte: Do autor (2016).

Completando os 28 dias de cura, os corpos de prova foram, então, pesados em uma balança com resolução de 0,1g e foram medidos sua altura e seu diâmetro em duas posições diferentes, com auxílio de um paquímetro.

A densidade de massa foi calculada pela Equação 9.

$$d = \frac{m}{V} \cdot 1000 \quad (9)$$

Em que:

$d$ – densidade de massa [Kg/m<sup>3</sup>];

$m$ – massa [g];

$V$  – Volume do corpo de prova [cm<sup>3</sup>].

### **3.5 Análise estatística**

Os dados foram avaliados em delineamento inteiramente casualizado, tendo sido realizada análise de variância e regressão, ambos a 5% de significância. Para os dados densidade aparente, resistência à compressão e condutividade térmica, foram utilizados análise de variância e teste de média Scott-Knott, todos a 5% de significância.

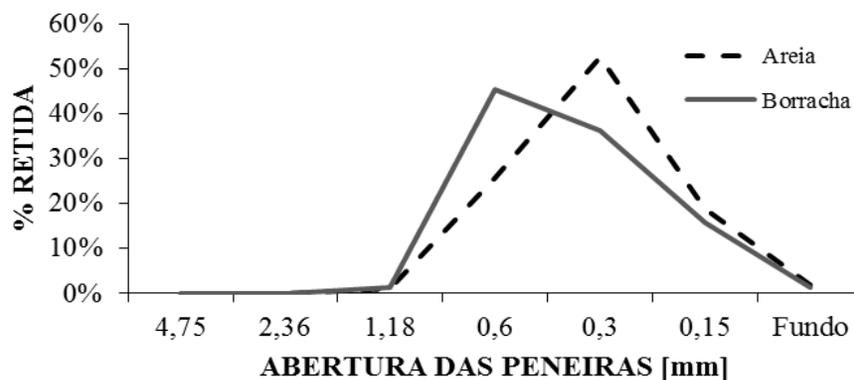
## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Caracterização dos materiais utilizados na elaboração das argamassas

#### 4.1.1 Ensaio de granulometria, massa específica e massa unitária dos agregados miúdos

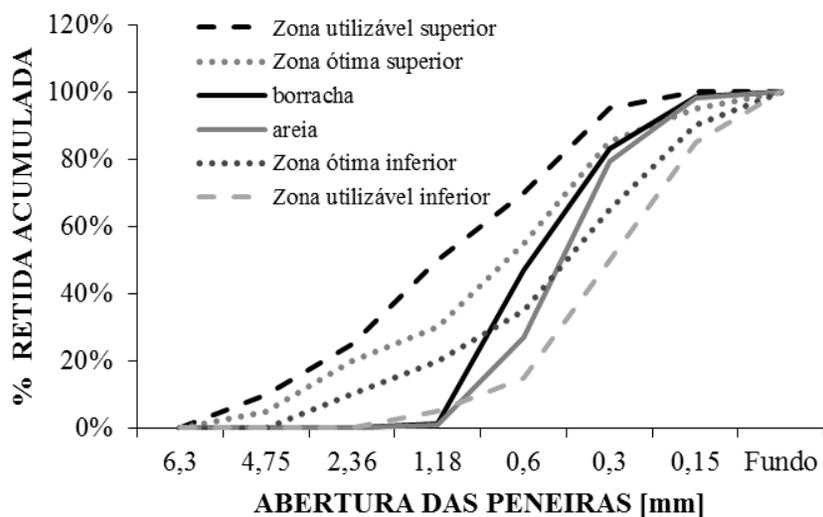
Como salientado por outros autores, a distribuição de tamanho é uma das propriedades mais importantes dos agregados, pois afeta a trabalhabilidade dos compósitos (ETXEBERRIA et al., 2007; TAM; WANG; TAM, 2007). As curvas granulométricas de porcentagem retida e porcentagem retida acumulada nas peneiras da série normal, referentes aos ensaios de granulometria segundo a NBR NM 248 (ABNT, 2003) realizados na areia e nas partículas de borracha de pneu, encontram-se na Figura 24 e Figura 25, respectivamente. Na Figura 25, também se encontram as zonas utilizáveis e zonas ótimas estabelecidas pela NBR 7211 (ABNT, 2009b).

Figura 24 – Porcentagem retida nas peneiras da série normal para a areia e partículas de borracha de pneu.



Fonte: Do autor (2016).

Figura 25 – Porcentagem retida acumulada nas peneiras da série normal para a areia e partículas de borracha de pneu e zonas ótimas e utilizáveis estabelecidas pela NBR 7211 (ABNT, 2009b)



Fonte: Do autor (2016).

As curvas granulométricas da areia natural e das partículas de borracha de pneu apresentam certa semelhança e isso pode ser comprovado pela proximidade dos valores do módulo de finura dos agregados miúdos analisados, como pode ser visto na Tabela 11, na qual a areia apresentou um módulo de finura de 3,05 mm, enquanto as partículas de borracha de pneu apresentaram um módulo de finura de 3,30 mm.

Quanto à dimensão máxima característica, que corresponde à peneira na qual o agregado apresenta uma porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% em massa, tanto a areia quanto as partículas de borracha tiveram um valor de 1,18 mm, o que significa que o peneiramento feito na peneira de 1,5 mm para ambos os agregados miúdos foi conveniente para que apresentassem diâmetros que favorecessem o acabamento do revestimento interno, o que também fez com que a curva granulométrica saísse da zona

utilizável inferior na peneira de malha equivalente a 1,18 mm. No restante das peneiras, ambas permaneceram dentro das zonas utilizáveis.

Tabela 11 – Dimensão máxima e módulo de finura característica dos agregados miúdos.

| <b>Propriedades físicas granulométricas</b> | <b>Areia [mm]</b> | <b>Borracha [mm]</b> |
|---|-------------------|----------------------|
| Dimensão máxima característica              | 1,18              | 1,18                 |
| Módulo de finura                            | 3,05              | 3,30                 |

Fonte: Do autor (2016).

Apesar de os dois agregados apresentarem valores de módulo de finura próximos, a areia apresenta uma pequena percentagem de material mais fino que as partículas de borracha de pneu, sendo observada a maior percentagem de material retido na peneira de 0,3 mm, enquanto as partículas de borracha de pneu apresentaram maior quantidade de material retido na peneira de 0,6 mm, como mostrado na Figura 24. Vasconcelos e Akasaki (2010) obtiveram valores para dimensão máxima característica para a areia de 2,36 mm e, para as partículas de borracha de pneu, 4,75 mm. Os valores de módulo de finura obtidos por esses autores foram de 3,86 mm para a borracha e 2,66 mm para a areia, mostrando que a areia utilizada teve partículas bem mais finas que a borracha e uma maior variação entre os diâmetros dos agregados.

Fioriti, Ino e Akasaki (2007) já observaram valores para dimensão máxima característica de 4,76 mm para as partículas de borracha de pneu e 2,34 mm para a areia, enquanto os valores de módulo de finura foram de 3,27 para as partículas de borracha e 2,38 para a areia, mostrando também que os agregados de areia foram mais finos que as partículas de borracha de pneu. Os valores de dimensão máxima característica encontrados nesse trabalho, tanto a areia quanto as partículas de borracha, foram de 1,18 mm. Essa igualdade de valores, relativos à dimensão máxima característica, aconteceu devido ao peneiramento

feito, anteriormente ao ensaio de granulometria, visando a uma pré-homogeneização dos agregados miúdos, fazendo com que esses materiais apresentassem partículas com diâmetros inferiores a 1,5 mm (malha da peneira utilizada no peneiramento).

Também devido a essa pré-homogeneização dos agregados, os valores de módulo de finura se mostraram mais próximos, ainda que as partículas de borracha tivessem diâmetro levemente mais fino (FIGURA 24).

Na Tabela 12 estão expostos os valores de massa específica e massa unitária dos agregados miúdos seguindo as normas NBR NM 52 (ABNT, 2009a) E NBR NM 45 (ABNT, 2006).

Tabela 12 – Massa específica e massa unitária dos agregados miúdos.

| <b>Agregado miúdo</b> | <b>Massa unitária [Kg/m<sup>3</sup>]</b> | <b>Massa específica [Kg/m<sup>3</sup>]</b> |
|-----------------------|--|--|
| Areia                 | 1389,80 (0,46)                           | 2645,54 (11,43)                            |
| Borracha de pneu      | 340,00 (0,59)                            | 1176,59 (13,84)                            |

Os valores que se encontram dentro dos parênteses correspondem ao desvio-padrão.

Fonte: Do autor (2016).

A massa específica, obtida pelo frasco de Chapmam da areia utilizada, foi de 2645,54 Kg/m<sup>3</sup>, enquanto a massa específica das partículas de borracha de pneu foi de 1176,59 Kg/m<sup>3</sup>.

Foi observada uma diferença muito grande na massa unitária dos agregados, que variou de 340,00 Kg/m<sup>3</sup> da borracha de pneu para 1389,80 Kg/m<sup>3</sup> da areia, fazendo com que a densidade das argamassas produzidas refletisse essa diferença de massa, à medida que se substituiu a areia por borracha de pneu. Os valores encontrados neste trabalho para a areia estão em conformidade com os encontrados por Sousa, Oliveira e Cabral (2010), que avaliaram a massa específica de areia natural de rio e também de borracha proveniente do processo de desemborrachamento de pistas de pouso e decolagens de aeronaves e obtiveram valores de massa unitária para a areia de

1380 Kg/m<sup>3</sup> e para a borracha de 920 Kg/m<sup>3</sup>. Os valores encontrados para a borracha de pneu divergem dos encontrados por esses autores, provavelmente devido à maneira como a borracha foi obtida. No entanto, Queirós (2015), avaliando o desempenho de argamassas à base de cimento Portland para rejuntamento de placas cerâmicas tipo II com adição de pó de borracha de pneus inservíveis, obteve para massa unitária da borracha de pneu um valor de 340 Kg/m<sup>3</sup>, valor esse similar ao encontrado neste trabalho.

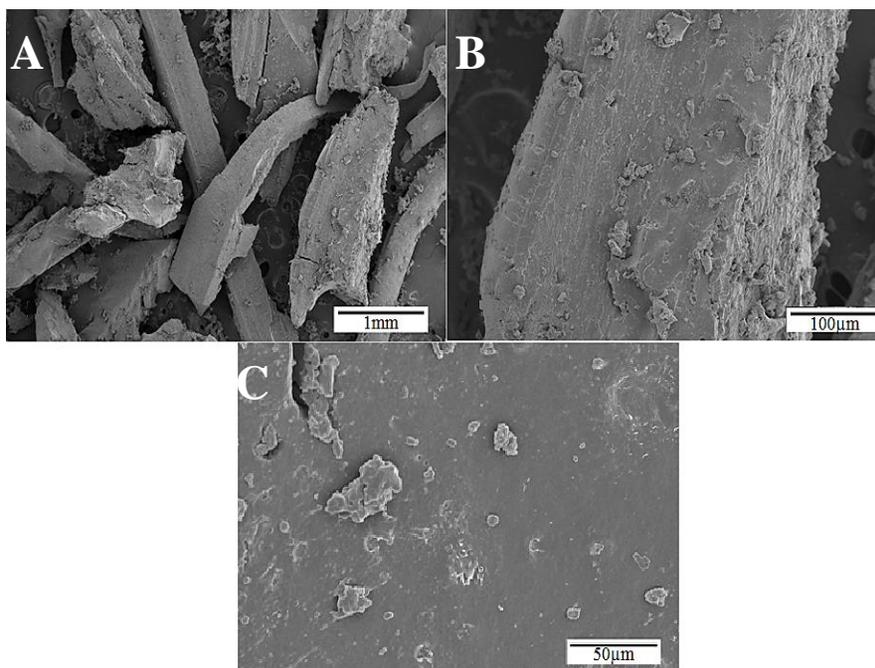
#### **4.1.2 Partículas de borracha de pneu**

As partículas de pneu utilizadas neste trabalho não passaram por nenhum tratamento químico ou qualquer tipo de lavagem, sofrendo apenas um peneiramento para homogeneização e para que sua granulometria se assemelhasse à da areia utilizada.

##### **4.1.2.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)**

A Figura 26 mostra as imagens da microscopia eletrônica de varredura realizada nas partículas de borracha utilizadas como substituição à areia. Essas partículas apresentam tamanhos e formatos irregulares (FIGURA 26A), estrutura áspera (FIGURA 26B), além de possuírem partículas menores aglomeradas e aderidas às maiores (FIGURA 26B e FIGURA 26C). As formas e tamanho dessas partículas podem influenciar em várias das propriedades estudadas neste trabalho. De acordo com Arnold (2011), quanto mais arredondado o agregado, menor a quantidade de água para se atingir o índice de consistência desejado. A forma dessas partículas também influencia a resistência mecânica e densidade aparente da argamassa, uma vez que um maior empacotamento dos grãos gera argamassas com menor quantidade de vazios e, conseqüentemente, com maior densidade aparente.

Figura 26 – Imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura das partículas de borracha de pneu. A) Escala de 1 mm; B) Escala de 100  $\mu\text{m}$ ; C) Escala de 50  $\mu\text{m}$ .

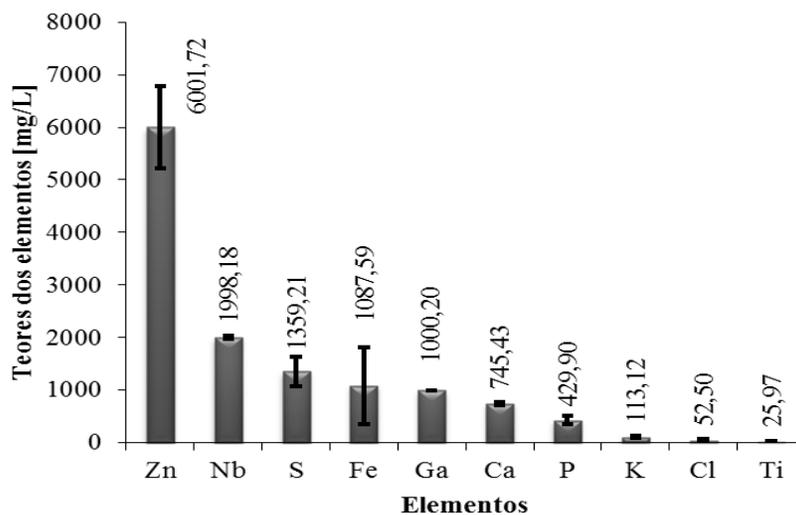


Fonte: Do autor (2016).

#### 4.1.2.2 Espectrometria de fluorescência de raios X por reflexão total (TXRF) das partículas de borracha de pneu

A composição química das partículas de borracha de pneu, obtidas por TXRF, são mostradas na Figura 27.

Figura 27 – Elementos identificados nas amostras de partículas de borracha de pneu pela técnica espectrometria de fluorescência de raios X por reflexão total. Zn = Zinco; Nb = Nióbio; S = Enxofre; Fe = Ferro; Ga = Gálio; Ca = Cálcio; P = Fósforo; K= Potássio; Cl = Cloro; Ti = Titânio.



Fonte: Do autor (2016).

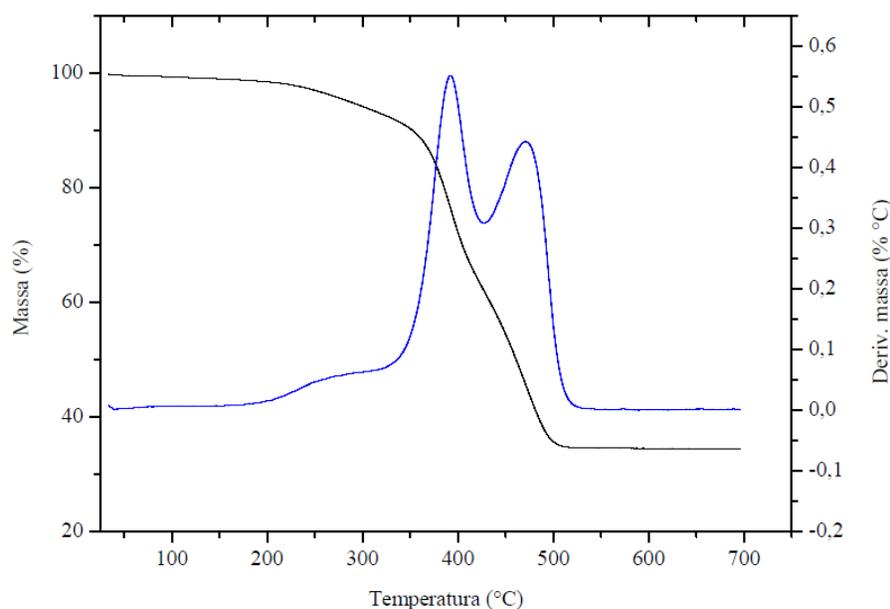
Os resultados da análise química elementar da borracha de pneu através da TXRF mostram a existência de zinco, nióbio, enxofre, ferro, gálio, cálcio, fósforo, potássio, cloro e titânio, em que o elemento predominante nesse material foi o zinco. Outros elementos que foram identificados nessas amostras, porém em quantidades ínfimas, foram o cobre, manganês, níquel, bromo e estrôncio. De acordo com Skoog, Holler e Nieman (2009), os elementos com número atômico baixo apresentam baixa sensibilidade analítica e baixo valor de energia de emissão; portanto, são mais difíceis de serem determinados por nessa técnica. Canova, Bergamasco e Angelis Neto (2007), que investigaram a utilização de resíduos de pneus inservíveis em argamassa e Faria (2015), que avaliou o efeito da incorporação de resíduo de borracha de pneus inservíveis nas

propriedades físicas e mecânicas da cerâmica vermelha, também observou a presença desses elementos na composição da borracha de pneus inservíveis.

#### 4.1.2.3 Termogravimetria e análise térmica diferencial

A Figura 28 apresenta as curvas obtidas através da termogravimetria e análise térmica diferencial da perda de massa das partículas de borracha de pneu em função da temperatura de exposição ao calor.

Figura 28 – Curvas TG e DTG das partículas de borracha de pneu.



Fonte: Do autor (2016).

A borracha de pneu apresentou um evento térmico na temperatura entre 194°C e 323°C. A perda de massa nessa temperatura foi de 5,90% e pode ser atribuída à volatilização de plastificantes, óleos e aditivos com baixo ponto de ebulição, presentes na composição da banda de rodagem.

Observa-se também um pico entre as temperaturas de 323°C e 428°C, com uma perda de massa de 30,74%, que pode ser causada pela termo oxidação

da borracha natural, que apresenta uma temperatura de degradação que ocorre em aproximadamente 365°C (SACHER; MACOINE; SINGLER, 1985).

O último pico, que ocorre na temperatura entre 428°C a 511°C, com perda de massa de 27,11%, é atribuído à degradação dos elastômeros BR e SBR (MENEZES, 2005). Scuracchio, Waki e Silva (2007) avaliaram as partículas trituradas de pneu por meio de análise de TG e DTG e observaram um evento térmico na temperatura entre 200°C e 350°C, que associaram à evaporação ou decomposição de óleos e aditivos presentes no composto da borracha e outros dois eventos térmicos entre os 350°C e 600°C. O primeiro caso, com um pico a 504°C, associaram à termo-oxidação da fase polimérica do material, e o segundo caso, com um pico a 558°C, devido à termo-oxidação do negro de fumo.

Williams e Besler (1995) verificaram decomposição de borracha de pneus sob atmosfera inerte. Eles atribuem os dois maiores eventos térmicos para as diferenças na temperatura de decomposição de borracha natural e sintética.

De acordo com os resultados obtidos neste trabalho, foi observado através das curvas termogravimétricas (TG/DTG) que as partículas de borracha apresentaram um bom comportamento quando foram expostas às temperaturas mais baixas (até 150°C), mostrando que durante o aquecimento sofrido, sua composição se manteve resistente a essas temperaturas, não perdendo suas propriedades, garantindo, assim, uma maior durabilidade em regiões mais quentes.

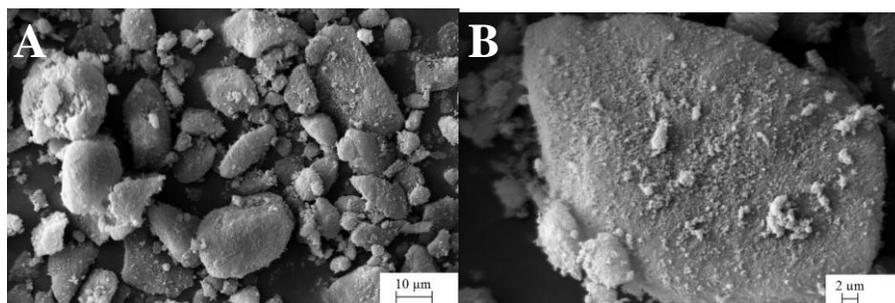
### **4.1.3 Cinzas de borracha de pneu**

#### **4.1.3.1 Microscopia eletrônica de varredura**

A microscopia eletrônica de varredura (FIGURA 29) mostra que as partículas de cinza de borracha de pneu têm tamanhos e formatos variados (FIGURA 29A), porém mais homogêneas e esféricas que as partículas de borracha vistas anteriormente, o que promove uma melhora na resistência

mecânica da argamassa, em comparação à argamassa com substituição somente de borracha. A maioria das partículas apresenta também uma grande rugosidade, além de apresentarem partículas menores aderidas às maiores (FIGURA 29B).

Figura 29 – Imagens das cinzas de borracha de pneu obtidas por microscopia eletrônica de varredura. A) Escala de 10  $\mu\text{m}$ ; B) Escala de 2  $\mu\text{m}$ .

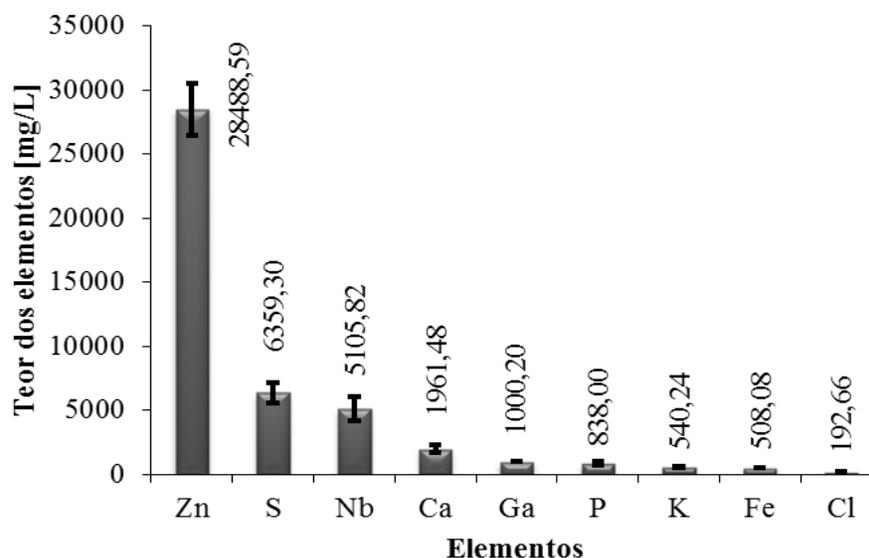


Fonte: Do autor (2016).

#### **4.1.3.2 Espectrometria de fluorescência de raios X por reflexão total (TXRF) das cinzas de borracha de pneu**

A composição química das partículas de cinzas de borracha de pneu, obtidas por TXRF, estão descritas na Figura 30.

Figura 30 – Elementos identificados nas amostras de cinzas de borracha de pneu pela técnica espectrometria de fluorescência de raios X. Zn = Zinco; S = Enxofre; Nb = Nióbio; Ca = Cálcio; Ga = Gálio; P = Fósforo; K= Potássio; Fe = Ferro; Cl = Cloro.



Fonte: Do autor (2016).

As cinzas de borracha de pneu apresentaram em sua composição os elementos zinco, enxofre, nióbio, cálcio, gálio, fósforo, potássio, ferro e cloro. O elemento predominante nesse material pela técnica TXRF foi o zinco, podendo existir outros elementos que essa técnica não seja capaz de identificar, como é o caso do elemento carbono, que possui número atômico baixo, apresentando baixa sensibilidade analítica e baixo valor de energia de emissão; portanto, é mais difícil de serem determinados por nessa técnica (SKOOG; HOLLER; NIEMAN, 2009). Outros elementos que foram identificados nessas amostras, porém em quantidades ínfimas, foram o tungstênio, cobre, níquel, titânio, manganês, cromo, rubídio, bromo e estrôncio. Em comparação à

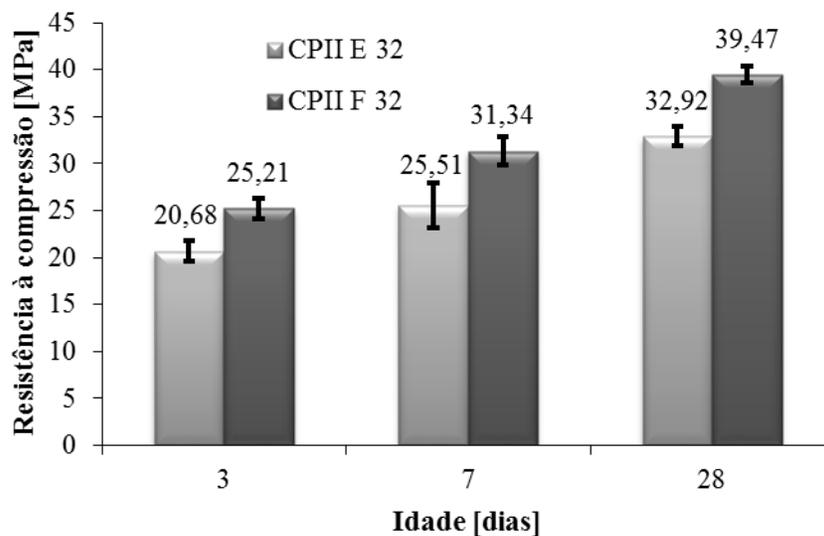
composição elementar da borracha de pneu, as cinzas apresentaram um aumento na concentração de todos os elementos com exceção do ferro.

#### 4.1.4 Cimento Portland

No ensaio de determinação da finura do cimento Portland CII E 32, foi obtido um valor de 4,04%, e o cimento CII F 32, um valor de 2,01%. Esses valores encontram-se dentro do limite de finura estabelecido pela NBR 11578 (ABNT, 1991) para essas classes de cimento, que devem apresentar valores menores que 12% para a quantidade retida na peneira de 75 micrômetros.

Os valores de resistência à compressão do cimento Portland CII E 32 e CII F 32, são mostrados na Figura 31.

Figura 31 – Resistência à compressão do cimento Portland CII E 32 e CII F 32.



Fonte: Do autor (2016).

Os valores encontrados para resistência a compressão dos cimentos CII E 32 e CII F 32, estão dentro dos valores estabelecidos pela norma NBR

11578 (ANBT, 1991), que exige valores de resistência a compressão para a idade de 3 dias maiores de 10 MPa, para a idade de 7 dias valores maiores que 20 MPa e para a idade de 28 dias, valores maiores que 32 MPa.

#### **4.2 Pozolanicidade das cinzas de borracha de pneu**

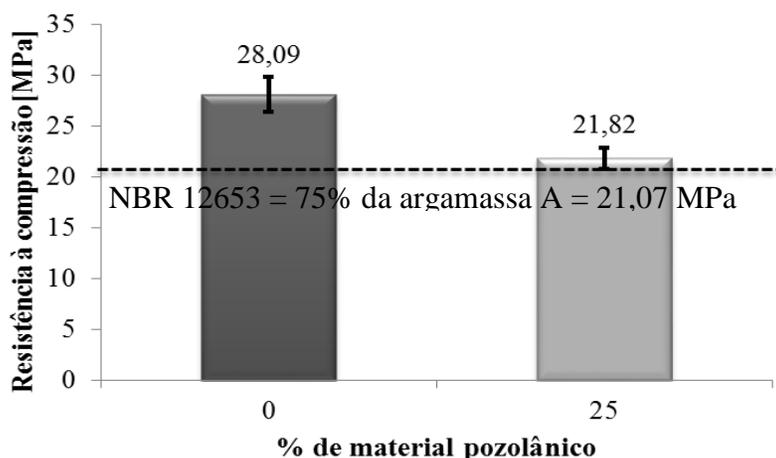
Na Figura 32, encontram-se os resultados obtidos de resistência à compressão no ensaio de índice de atividade pozolânica pela norma NBR 5752 (ABNT, 2014a), com a argamassa de referência e a argamassa com substituição de 25% do cimento pelo material pozolânico.

A argamassa de referência atingiu a máxima resistência à compressão de 28,09 MPa, enquanto a substituição de 25% do volume de cimento pelas cinzas de borracha de pneu reduziu a resistência para 21,82 MPa.

A norma NBR 12653 (ABNT, 2014b) estabelece que, para a argamassa produzida com 25% de material pozolânico, a resistência à compressão seja igual ou superior a 75% da resistência à compressão da argamassa de referência para comprovação do potencial pozolânico do material utilizado.

Com isso, o valor da resistência à compressão da argamassa contendo cinzas, seguindo exigências da norma, deveria ter um valor mínimo de 21,07 MPa. A argamassa com adição da cinza de borracha de pneu atingiu o percentual mínimo em relação à série de referência, atingindo uma resistência à compressão de 77,67% em relação à argamassa de referência. Esses resultados confirmam a viabilidade do uso das cinzas de borracha de pneu como um substituto parcial do cimento Portland.

Figura 32 – Relação entre resistência à compressão das argamassas versus porcentagem de material pozolânico.



Fonte: Do autor (2016).

Segundo Mehta e Monteiro (2008), a granulometria deve ser suficientemente fina para que ocorra o efeito *filler* (preenchimento de vazios), o que acarreta uma diminuição da porosidade, permeabilidade, aumento da resistência mecânica e durabilidade que pode ser causado pela melhora no empacotamento de partículas ou por uma leve reatividade do material que foi sendo potencializada pela elevação da área disponível para reação (GOBBI, 2014). Os valores de resistência à compressão da argamassa A com idade de 28 dias estão de acordo com os encontrados por Costa (2015) que avaliando o potencial pozolânico da cinza volante, proveniente da Termelétrica de Candiota/RS, como material de substituição parcial do cimento Portland, obteve valores de 28,3 MPa para a argamassa A (sem cinzas) e 19,9 MPa para a argamassa B (com 25% de cinzas em substituição ao cimento), valor abaixo do exigido pela norma, ao contrario do encontrado nesse trabalho. Sales e Alferes Filho (2014), estudando a utilização de pó de resíduo de cerâmica em

substituição parcial ao cimento Portland na produção de concretos, obtiveram, na análise da atividade pozolânica desse material, um índice de 76,9% para a argamassa B (com cinzas), mostrando que o material utilizado tem potencial para utilização como pozolana.

### **4.3 Caracterização das argamassas produzidas**

#### **4.3.1 Densidade aparente das argamassas no estado endurecido**

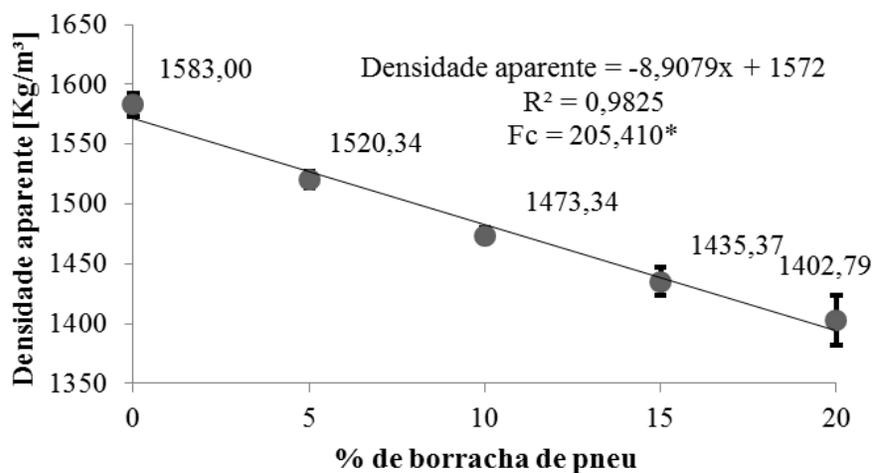
A Figura 33 mostra a relação entre densidade aparente e a porcentagem de partículas de borracha de pneu na argamassa. A densidade aparente da argamassa, seca ao ar livre por 28 dias, no estado endurecido, mostrou uma diminuição ao passo que se aumentou a quantidade substituída de areia pelas partículas de borracha de pneu. Observou-se uma variação na densidade de 1583,00 Kg/m<sup>3</sup> para as amostras sem partículas de borracha de pneu a 1402,79 Kg/m<sup>3</sup> para as amostras de argamassa com 20% de partículas de borracha de pneu em sua composição, resultando em uma diminuição de peso de cerca de 11% em relação à argamassa sem nenhuma substituição. A argamassa com 5% de borracha foi mais leve cerca de 4% que a argamassa de referência. Os resultados das argamassas com 10 e 15% de borracha em substituição à areia revelaram uma diminuição de peso de 7 e 9% respectivamente em relação à argamassa sem nenhuma substituição, portanto, o aumento da incorporação de borracha na argamassa diminui a densidade aparente da mesma e leva a um revestimento mais leve e com aplicações que podem ser benéficas na construção civil.

A densidade foi caracterizada por uma diminuição linear como uma função do teor de borracha. Estes resultados estão de acordo com os obtidos por Aiello e Leuzzi (2010), Benazzouk et al. (2007), Chen, Wang e Jhou (2013), Correia et al. (2010), Herrero, Mayor e Hernández-Olivares (2013), Ling (2012), Mohammed et al. (2012) e Turgut e Yesilata (2008).

A redução observada é atribuída à menor massa específica da borracha (1179,25 Kg/m<sup>3</sup>) em comparação a massa específica da areia natural utilizada (2645,50 Kg/m<sup>3</sup>), uma vez que alguns volumes específicos de areia (5%, 10%, 15% e 20%) foram substituídos por borracha de pneu e também devido a uma maior capacidade da borracha em aprisionar bolhas de ar à sua superfície áspera durante a preparação da argamassa fresca devido à sua natureza apolar (PEDRO; BRITO; VEIGA, 2012; SUKONTASUKKUL, 2009).

Fazzan (2011) constatou que os traços com resíduo de borracha apresentaram aumento nos valores de teor de ar incorporado, se comparado aos traços sem resíduo. De acordo com Granzotto (2010), a incorporação de ar à mistura do concreto também diminui a densidade; quanto maior o teor de ar incorporado menor será a densidade. A relação água/aglomerante também é um fator que pode causar diferença na densidade da argamassa; porém, de acordo com alguns autores, essa diferença é quase irrelevante (THOMASA et al., 2014).

Figura 33 – Relação da densidade aparente das argamassas no estado endurecido versus porcentagem de borracha de pneu em substituição a areia.



\* Análise de regressão significativa a nível de 5% de significância.

Fonte: Do autor (2016).

Os valores obtidos de densidade aparente para as argamassas com cinzas de borracha de pneu em substituição ao cimento são mostrados na Figura 34.

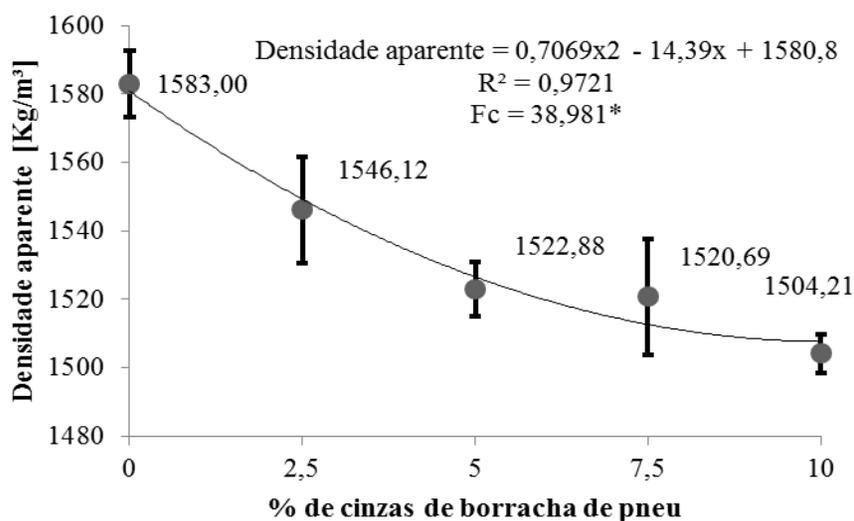
A adição de cinzas de borracha de pneu nas argamassas também influenciou na densidade aparente. Foi observada uma diminuição da densidade aparente de 1583,00 Kg/m<sup>3</sup> (argamassa de referência) para um valor de 1504,21 Kg/m<sup>3</sup> (argamassa com 10% de cinzas de borracha de pneu em substituição ao cimento), resultando em uma argamassa cerca de 5% mais leve. Para a argamassa com 2,5% de cinzas em substituição ao cimento, foi observada uma redução da densidade aparente de 2% em relação a referência, com um valor de 1546,12 Kg/m<sup>3</sup>. Já para as argamassas com 5 e 7,5% de substituição de cimento por cinzas, ambas tiveram uma redução de aproximadamente 4% em relação à argamassa sem nenhuma substituição, tendo valores de 1522,88 Kg/m<sup>3</sup> e 1520,69 Kg/m<sup>3</sup> respectivamente. Assim como foi explicado anteriormente para as partículas de borracha de pneu, a diminuição da densidade aparente das argamassas compostas de cinzas em substituição ao cimento aconteceu devido à diferença da massa específica entre o cimento e as cinzas de borracha de pneu.

Estudos realizados por Gupta, Chaudhary e Sharma (2014), utilizando borracha de pneus e cinzas das borrachas de pneu como substituição parcial do agregado miúdo no concreto, também evidenciaram que a densidade aparente dos compósitos cimentícios diminuiu com o aumento da percentagem de cinzas de borracha. Além disso, materiais como a sílica ativa contribuem para uma pequena redução na densidade aparente quando são utilizados como substituição de teores de cimento devido à menor massa específica desse material em relação à do cimento (MOHAMMED et al., 2012).

Bezerra et al. (2011), utilizando cinza de casca de arroz como material pozolânico em argamassas com substituição do cimento pelas cinzas, com traço 1 : 2 : 9, mostraram que os corpos de prova com 15 e 20% de cinzas apresentaram maior valor de densidade aparente que os demais e os corpos de

prova das argamassas com 6% de cinza obtiveram valores iguais aos dos corpos de prova de referência, pelo fato de as adições minerais agirem na argamassa e tornarem a matriz da pasta mais densa e, conseqüentemente, menos porosa, o que favorece a elevação da resistência mecânica devido ao preenchimento dos vazios.

Figura 34 – Relação da densidade aparente das argamassas no estado endurecido versus porcentagem de cinzas de borracha de pneu em substituição ao cimento.



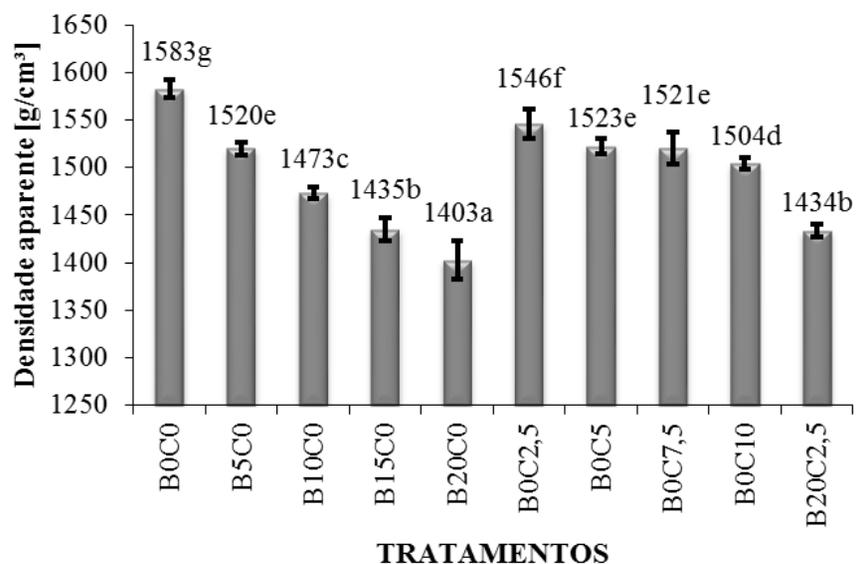
\* Análise de regressão significativa a nível de 5% de significância.

Fonte: Do autor (2016).

A Figura 35 mostra os valores obtidos de densidade aparente para todos os tratamentos. Os valores de densidade aparente dos tratamentos B15C0 e B20C2,5 não diferenciam estatisticamente pelo teste de média Scott-Knott, a 5% de significância, assim como os tratamentos B5C0, B0C5 e B0C7,5. A menor densidade aparente foi verificada no tratamento B20C0, enquanto a maior densidade foi verificada no tratamento B0C0.

A densidade correspondente ao tratamento com 2,5% de cinzas de borracha de pneu e 20% de partículas de borracha de pneu, em volume, foi de 1433,81 Kg/m<sup>3</sup>, mostrando que a borracha exerceu uma maior influência sobre a densidade aparente da argamassa que as cinzas, o que já era esperado, uma vez que a quantidade em volume de partículas de borracha de pneu usada como substituição à areia (20,0%) foi superior à quantidade de cinza como substituição do cimento (2,5%) no tratamento combinado. Al-Akhras e Smadi (2004) fizeram substituições de areia por cinza de borracha de pneu em argamassas e observaram uma diminuição no teor de ar das argamassas com o aumento da porcentagem das cinzas, o que atribuíram ao efeito de enchimento (*filler*) das cinzas na argamassa. Além disso, as cinzas foram utilizadas como um substituto parcial da areia, em peso. Uma vez que a cinza é menos densa que a areia, o volume do material de enchimento na mistura de argamassa foi muito grande e esse volume extra de material de enchimento preencheu os vazios de ar, resultando na diminuição da trabalhabilidade.

Figura 35 – Densidade aparente das argamassas no estado endurecido de todos os tratamentos estudados.



Fonte: Do autor (2016).

#### 4.3.2 Relação A/A e trabalhabilidade

Na Tabela 13, estão apresentados os valores de índice de consistência (IC) e as relações água/aglomerante (A/A) para as argamassas com substituição de partículas de borracha de pneu, argamassas com substituição de cinzas de borracha de pneu e para a argamassa com substituição combinada (B20C2,5). Analisando os resultados obtidos na Tabela 13 para a relação água/aglomerante, observa-se que, conforme a porcentagem de borracha de pneu aumenta, há um aumento na quantidade de água utilizada para se obter o índice de consistência de  $260 \pm 5$  mm, especificado na NBR 13276 (ABNT, 2005). Já para argamassas com substituição de cinzas de borracha de pneu, à medida que se aumentou a

quantidade de cinzas na argamassa, houve uma diminuição na quantidade de água utilizada.

Tabela 13 – Índice de consistência (IC) e relação água/aglomerante (A/A) das argamassas.

| <b>TRATAMENTOS</b> | <b>IC [mm]</b> | <b>A/A</b> |
|--------------------|----------------|------------|
| BOC0               | 260,69 (1,435) | 3,18       |
| B5C0               | 258,12 (1,329) | 3,26       |
| B10C0              | 255,86 (0,941) | 3,3        |
| B15C0              | 264,23 (0,874) | 3,3        |
| B20C0              | 259,01 (1,397) | 3,46       |
| B0C2,5             | 263,53 (0,929) | 4,19       |
| BOC5               | 264,47 (0,751) | 4,12       |
| B0C7,5             | 257,09 (0,910) | 4,06       |
| B0C10              | 256,33 (1,155) | 4,05       |
| B20C2,5            | 260,24 (1,973) | 3,51       |

Os valores que se encontram dentro dos parênteses correspondem ao desvio-padrão.

Fonte: Do autor (2016).

Granzotto (2010) constatou que a incorporação do agregado de borracha no concreto diminui a trabalhabilidade, devido à área superficial apresentada pelo agregado de borracha ser maior em relação à areia substituída, necessitando assim, aumentar a relação água/aglomerante para manter as mesmas trabalhabilidades. A perda da trabalhabilidade pode ser explicada devido à forma e à textura dos resíduos de borracha; com isso, podendo prejudicar o empacotamento das partículas.

Vários outros autores concluíram que o aumento de partículas de borracha de pneu tem resultado negativo na trabalhabilidade da argamassa (ANGELIN et al., 2015; CHEN; WANG; JHOU, 2013; ORTEGA et al., 2016; PEDRO; BRITO; VEIGA, 2012; SINGH et al., 2016), o que implica um gasto maior de água para que a trabalhabilidade das argamassas com maiores

quantidades de borracha sejam iguais às argamassas com pouca borracha em sua composição, ou seja, para um índice de consistência constante, a relação água/aglomerante tende a aumentar (pior trabalhabilidade) quando se aumenta a quantidade de partículas de borracha. A perda da trabalhabilidade observada nas argamassas com partículas de borracha de pneu pode ser atribuída ao aumento da fricção interna dessas partículas de borracha, em que o atrito no interior da massa, entre as próprias partículas e entre a borracha e pasta de cimento, é significativamente aumentada em função da maior quantidade dessas partículas na argamassa (ANGELIN et al., 2015; SINGH et al., 2016).

Os resultados mostram que as cinzas tiveram valores de relação água/aglomerante praticamente iguais, mostrando uma relação água/aglomerante diminuindo em função da quantidade de cinzas, o que indica uma melhora na trabalhabilidade com esse resíduo. Essa ocorrência pode ser atribuída à elevada superfície específica das cinzas, existindo uma relação entre a quantidade de finos e a água necessária (BEZERRA et al., 2011). Alguns autores observaram uma tendência semelhante quando partículas de borracha bem mais finas foram adicionadas às misturas sugerindo que partículas menores reduziram a fricção entre as partículas (ORTEGA et al., 2016).

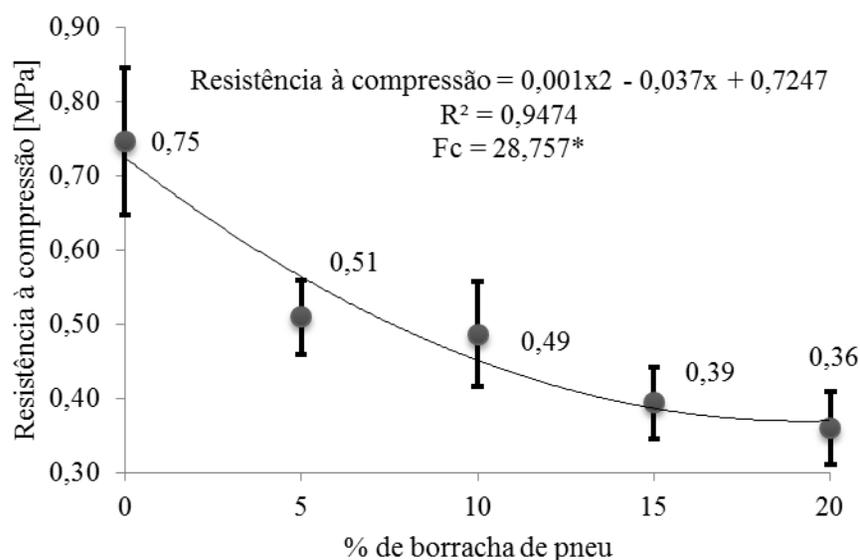
No tratamento combinado (2,5% de cinzas de borracha de pneu juntamente com 20% de partículas de borracha de pneu), a relação água/aglomerante foi maior que nas argamassas que tinham somente borracha de pneu em sua composição e menor que as argamassas somente com cinzas em sua composição, sendo afetada pelo teor de 20,0% de borracha de pneu, assim como também foi afetada pelo teor de 2,5% de cinzas. O pequeno aumento da trabalhabilidade desse tratamento em relação ao tratamento B20C0, onde foi observada uma variação de 3,51 do tratamento combinado para 3,46 do tratamento com 20% de borracha, deve-se à elevada superfície específica das

cinzas, que fez com que a fricção entre as partículas fosse menor, ocupando os espaços vazios causados pela borracha de pneu.

### 4.3.3 Ensaio de resistência à compressão das argamassas

Na Figura 36, encontram-se os valores de resistência à compressão das argamassas elaboradas a partir das substituições da areia por borracha de pneu.

Figura 36 – Relação da resistência à compressão da argamassa no estado endurecido versus porcentagem de partículas de borracha de pneu em substituição ao agregado miúdo.



\* Análise de regressão significativa a nível de 5% de significância.

Fonte: Do autor (2016).

Os resultados obtidos mostram que a utilização da borracha de pneu em substituição ao agregado miúdo afetou significativamente a resistência à compressão da argamassa. Quanto maior foi a proporção de partículas de borracha de pneu em substituição à areia natural, menor foi a resistência à compressão da argamassa de revestimento. A argamassa de referência mostrou

uma resistência à compressão aos 28 dias de 0,75 MPa. A substituição de 5% e 10% de areia por borracha de pneu promoveram uma redução na resistência à compressão de 32% e 35%, apresentando valores de 0,51 MPa e 0,49 MPa, respectivamente. Já as argamassas contendo 15% e 20% de borracha de pneu provocaram uma redução mais expressiva na resistência, sendo essa redução de 47% e 52%, em que os valores de resistência à compressão observados foram de 0,39 MPa e 0,36 MPa, respectivamente. Essa diminuição na resistência da argamassa com partículas de borracha de pneu está associada a vários fatores, dentre eles a fraca ligação entre as partículas de borracha e a pasta de cimento, assim como a maior deformação elástica das partículas de borracha em comparação com a dos agregados minerais tipicamente utilizados (KHATIB; BAYOMY, 1999). A falha na resistência à compressão ocorre na zona de transição, devido ao aparecimento de fendas iniciadas rapidamente em torno das partículas de borracha (WANG et al., 2006). Essa redução pode estar ligada ainda ao aumento no teor de ar incorporado no estado fresco, pelo fato da borracha ser um material altamente elástico e por sua menor massa específica, quando comparado à areia natural (ONUAGULUCHI, 2015).

Vários são os estudos que mostram a relação inversamente proporcional entre a porcentagem de partículas de pneu e resistência à compressão nos mais variados tipos de aplicação na construção civil. Canova, Bergamasco e Angelis Neto (2007) avaliando uma argamassa de revestimento utilizando o traço em volume 1 : 1,5 : 9 (cimento : cal virgem : areia) com adição de resíduos de pneus inservíveis nas proporções 0%, 6%, 8%, 10% e 12% do volume de agregado, obteve valores de resistência à compressão de 1,29 MPa, 1,21 MPa, 1,12 MPa, 1,03 MPa e 0,85 MPa, respectivamente. A máxima redução na resistência à compressão avaliada pelo autor foi de 34% em relação a argamassa de referência e ocorreu no tratamento com maior quantidade de partículas de pneu em adição na argamassa (12% de partículas de borracha de pneu).

Um estudo realizado por Chun-Sheng et al. (2005) avaliou a resistência à compressão de argamassas contendo 15% em volume de partículas de borracha de pneu e mostrou que a utilização de partículas de borracha na argamassa diminuiu a resistência em 20%. Batayneh, Marie e Asi (2008), avaliando as propriedades da argamassa fresca e propriedades mecânicas do concreto contendo partículas de borracha de pneu em substituição ao agregado miúdo, descobriram que o uso de borracha de pneus afeta negativamente a viabilidade das misturas de concreto. Além disso, relataram que a resistência à compressão aos 28 dias do concreto contendo 40% de partículas de borracha foi reduzida em 50%.

Outro estudo realizado por Khatib e Bayomy (1999) avaliou as propriedades mecânicas do concreto contendo granulado de borracha como um substituto aos agregados e mostrou que misturas contendo quantidades superiores a 20% de partículas de borracha de pneus, em termos de propriedades mecânicas, deve ser limitado a 20%.

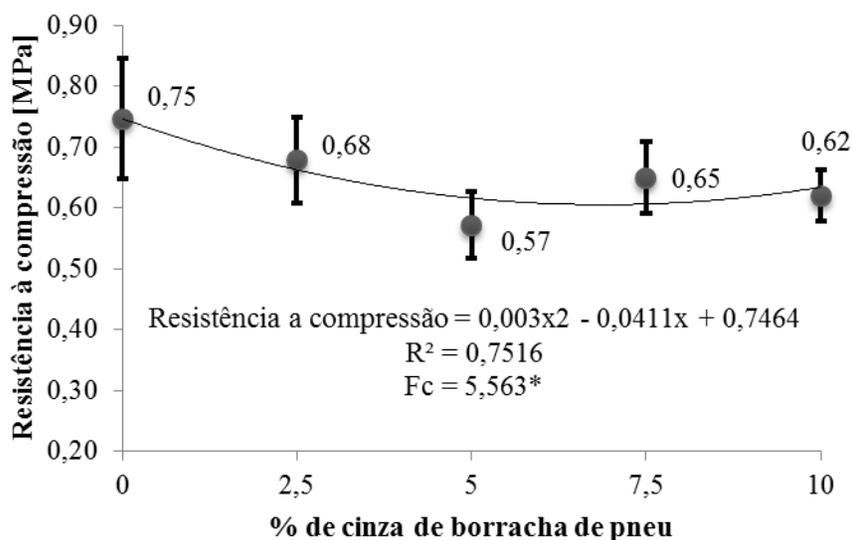
Romualdo et al. (2011), avaliando a resistência à compressão de uma argamassa de revestimento com adições de 0%, 5%, 10% e 15% de raspas de pneu avaliados aos 28 dias e utilizando corpos de prova cilíndricos com dimensão de 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura, obtiveram um valor de 19,00 MPa para o tratamento sem adição de raspas de pneu. Para o tratamento com 5% de raspas de pneu obteve um valor de 12,40 MPa, para os tratamentos com 10%, um valor de 8,96 e para os tratamentos com 15%, um valor de 5,76.

Afshinnia e Poursaee (2015) avaliaram a resistência à compressão de argamassa contendo 0%, 16%, e 24% de partículas de borracha em substituição ao agregado miúdo em corpos de prova cúbicos de 50 mm e chegou ao resultado de que a substituição do agregado por essas partículas afetou significativamente a resistência à compressão da argamassa. Através do emprego de 16% e 24% de

partículas de borracha como substituição do agregado miúdo, a resistência à compressão aos 28 dias diminuiu em 20% e 48%, respectivamente.

Na Figura 37 encontra-se a relação da resistência à compressão das argamassas elaboradas a partir das substituições de cimento por cinza de borracha de pneu.

Figura 37 – Relação da resistência à compressão da argamassa no estado endurecido versus percentagem de cinzas de borracha de pneu em substituição ao cimento.



\* Análise de regressão significativa a nível de 5% de significância.

Fonte: Do autor (2016).

Verificou-se que houve uma diminuição na resistência à compressão em função do aumento do teor de cinzas de borracha de pneu até os 5% de substituição. Quando o teor de cinzas de borracha foi aumentado de 5% para 7,5% em volume substituindo o cimento, houve um aumento na resistência à compressão, variando de 0,57 MPa (5% de cinzas) para 0,65 MPa (7,5% de cinzas), ou seja, um acréscimo de 14% na resistência à compressão.

A variação entre a resistência da argamassa de referência e a argamassa com 10% de cinzas foi de 17%, com valores de 0,75 MPa (referência) e 0,62 MPa (10% de cinzas), em que esse tratamento mostrou um leve aumento na resistência em relação ao tratamento com 5% de cinzas e uma pequena diminuição em relação ao tratamento com 7,5% de cinzas, levando a acreditar que exista uma tendência ao aumento ou estabilização da resistência à compressão de argamassas com substituição parcial do cimento por cinzas a partir de 10%. A redução da resistência até o nível de 5% de cinzas pode ser atribuído a leve reatividade do material que, a partir dessa porcentagem de substituição foi sendo potencializado pela elevação da área disponível para reação (GOBBI, 2014).

Os resultados mostram que a utilização das cinzas de borracha de pneu tem um pequeno efeito adverso sobre a resistência à compressão aos 28 dias de idade da argamassa de traço base 1 : 2 : 9 em volume até os 5% de substituição de cinzas, valor a partir do qual há um leve aumento até atingir os 7,5% de cinzas, passando a apresentar novamente valores levemente mais baixos a partir dos 10% de substituição, tendendo a uma estabilização ou ao aumento na resistência à compressão das argamassas a partir dessa quantidade de cinzas.

Bezerra et al. (2011), utilizando a cinza da casca de arroz como material pozolânico em substituição ao cimento nas proporções de 6%, 9%, 15%, 20% e 30%, para o traço 1 : 2 : 9, em massa, ensaiados em diferentes idades, mostraram um aumento na resistência à compressão em relação à argamassa de referência para todos os períodos de cura, exceto nas amostras com 6% de substituição de cinzas de casca de arroz. A autora atribuiu este aumento à reação das cinzas da casca de arroz com o hidróxido de cálcio formando o C-S-H, material resistente e estável, que favorece o aumento da resistência e diminuição da permeabilidade devido ao processo de refinamento dos poros (reação pozolânica). Nota-se que a curva de resistência à compressão obtida pela autora aos 28 dias com

substituição de até 9% de cimento substituído por cinzas, se assemelha a curva obtida nesse trabalho para as cinzas de borracha de pneu utilizadas como material pozolânico.

Singh e Siddique (2014) realizaram um estudo sobre a incorporação de cinzas obtidas a partir de uma usina térmica como substituto da areia natural em concreto com quantidades de substituição de até 100% da areia pelas cinzas. A resistência à compressão do concreto com 100% de cinza em substituição à areia natural não apresentou diferença significativa de resistência, quando comparada ao concreto convencional.

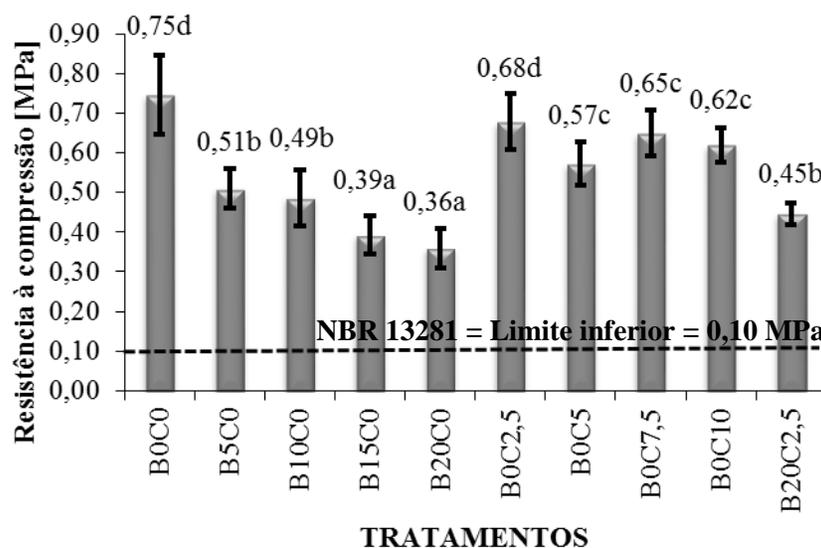
Gupta, Chaudhary e Sharma (2014), realizando o ensaio de resistência à compressão do concreto utilizando cinzas de borracha em substituição ao agregado miúdo aos 28 dias, observaram que a resistência à compressão do concreto contendo cinzas de borracha é diminuída com o aumento da porcentagem de cinzas. Al-Akhras e Smadi (2004) avaliaram a resistência à compressão de amostras de argamassa com substituição da areia por cinzas de borracha de pneu em diferentes idades e obtiveram um aumento na resistência à compressão com o aumento do teor de cinzas de borracha para todos os períodos de cura testados (3, 7, 28, e 90 dias). O aumento percentual na resistência à compressão obtido pelo autor foi maior em idades mais avançadas do que em idades precoces. A porcentagem de aumento na resistência à compressão de amostras de argamassa aos 28 dias foi de 12%, 14%, 23%, e 40% no teor de substituição de cinzas de 2,5%, 5%, 7,5%, e 10%, respectivamente. Vale ressaltar que as substituições feitas pelo autor foram da areia por cinzas de borracha de pneu e não em substituição ao cimento, como foi feito nesse trabalho. Segundo Malhotra e Metha (1996), o bom desempenho das argamassas com maiores substituições de cimento por cinzas, nas proporções acima de 10%, pode ser justificado pelo fato de haver preenchimento dos vazios da argamassa (efeito *filler*), quando há incorporação de resíduos, aumentando o

empacotamento das partículas e diminuindo, conseqüentemente, os vazios, favorecendo positivamente a resistência à compressão simples.

A Figura 38 apresenta os valores de resistência à compressão para todos os tratamentos assim como o valor limite inferior estabelecido na NBR 13281 (ABNT, 2001). Os valores de resistência à compressão dos tratamentos B0C0 e B0C2,5 (referência e 2,5% de cinzas) não diferenciam estatisticamente pelo Teste de média Scott-Knott, a 5% de significância, mostrando-se os tratamentos com maior resistência à compressão. Os tratamentos B0C5, B0C7,5 e B0C10 (5%, 7,5% e 10% de cinzas em substituição ao cimento), apresentaram valores menores para resistência à compressão em relação a referência e ao tratamento com 2,5% de cinzas, porém foram melhores que todos os demais. Esses tratamentos também não diferenciaram estatisticamente. O tratamento combinado (B20C2,5) composto por 2,5% de cinzas e 20% de borracha de pneu revelou-se igual estatisticamente aos tratamentos B5C0 e B10C0 (5% de partículas de pneu e 10% de partículas de pneu). Os menores valores de resistência à compressão foram verificados nos tratamentos B15C0 e B20C0 (15% de borracha e 20% de borracha) pelos fatores já explicados anteriormente, porém estes valores de resistência à compressão ainda se mostram superiores ao limite mínimo apresentado na NBR 13281 (ABNT, 2001), na qual é apresentado um valor mínimo de 0,10 MPa.

Essa diferenciação estatística deixa claro que o tratamento combinado (B20C2,5) mostrou-se melhor que o tratamento B20C0 e pior que o tratamento B0C2,5, evidenciando que as partículas de cinza de borracha de pneu exerceram influência sobre a resistência à compressão da argamassa quando utilizada em combinação com as partículas de borracha de pneu, melhorando a resistência. Isso pode ser explicado pelo efeito de enchimento (*filler*) da cinza, ocupando os espaços vazios entre a matriz cimentícia e as partículas de pneu.

Figura 38 – Resistência à compressão da argamassa no estado endurecido de todos os tratamentos estudados.

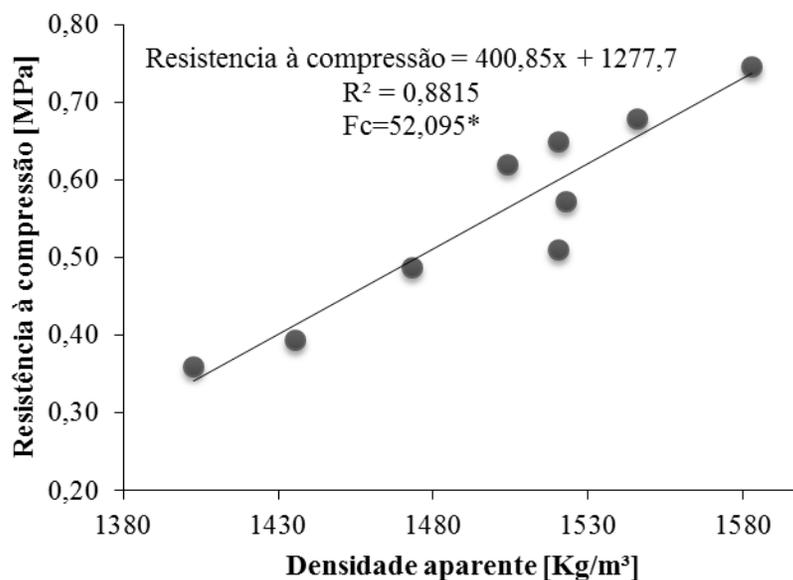


Fonte: Do autor (2016).

#### 4.3.4 Relação densidade resistência à compressão

A relação entre a resistência à compressão e à densidade aparente seca ao ar das argamassas de revestimento estudadas é mostrada na Figura 39, na qual a densidade variou de 1402,79 Kg/m<sup>3</sup> (20% de borracha) a 1583,00 Kg/m<sup>3</sup> (argamassa referência). A resistência à compressão da argamassa é diretamente proporcional à densidade aparente das mesmas (SAYADI et al., 2016). Os resultados mostram que quanto maior a densidade da argamassa, maior foi a resistência à compressão. Isso acontece devido ao menor teor de ar incorporado na argamassa nos tratamentos com menores quantidades de substituição, devido à capacidade da borracha em aprisionar bolhas de ar na sua superfície áspera durante a preparação da argamassa fresca, em função da sua natureza apolar.

Figura 39 – Relação entre densidade aparente no estado endurecido versus resistência à compressão das argamassas com substituições parciais de cimento por cinzas de pneu e areia por partículas de borracha.



\* Análise de regressão significativa a nível de 5% de significância.

Fonte: Do autor (2016).

Observou-se que a regressão nas argamassas foi significativa pela análise de variância ao nível de 5% de significância, em que foram obtidos valores de  $R^2 = 0,8815$ . Ling (2012), utilizando resíduos de borracha de pneu em substituição a areia nas proporções de 0%, 10%, 20% e 30% em blocos de pavimentação, demonstrou que a incorporação de partículas de borracha diminuiu a densidade dos corpos de prova e conseqüentemente reduziu também a resistência à compressão dos blocos de pavimentação, obtendo uma relação significativa entre essas duas variáveis.

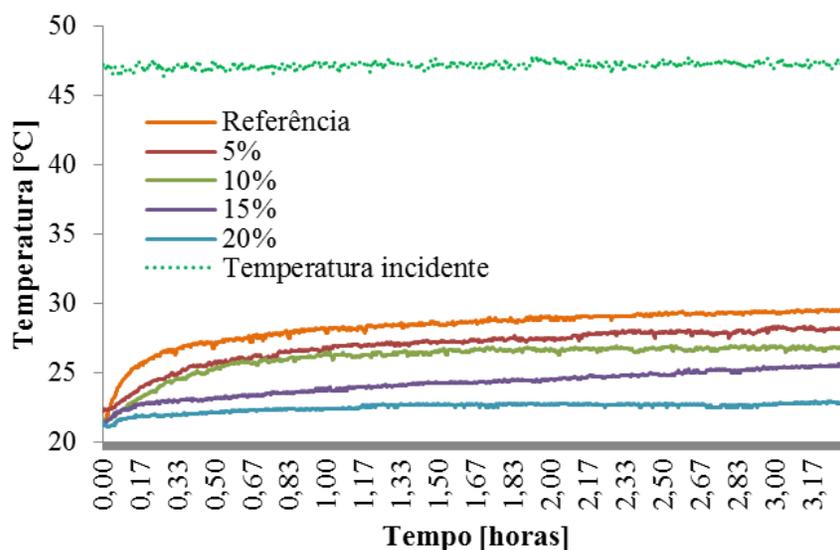
Outro estudo mostrando essa relação é o de Cintra, Paiva e Baldo (2014), que elaboraram argamassas leves para revestimento confeccionadas com

cimento, areia, cal, vermiculita e agregados de borracha de pneus reciclados. Analisando a relação densidade aparente e resistência à compressão para a argamassa sem borracha, o autor obteve relações inversamente proporcionais, ou seja, para argamassas sem borracha de pneu, a argamassa com maior densidade aparente foi a que teve a menor resistência à compressão. Já com relação às argamassas contendo borracha de pneu em sua composição a argamassa com maior teor de borracha foi a de maior densidade dentre todas, mas também foi a de maior resistência mecânica à compressão levando a uma relação direta entre as variáveis estudadas.

#### **4.3.5 Isolamento térmico**

Na Figura 40, são apresentadas as curvas correspondentes à variação de temperatura de cada tratamento com partículas de borracha de pneu relativa às argamassas B0C0, B5C0, B10C0, B15C0 e B20C0, que são os tratamentos com 0%, 5%, 10%, 15% e 20% de partículas de borracha de pneu em substituição ao agregado miúdo, além da temperatura incidente em função do tempo de exposição ao calor.

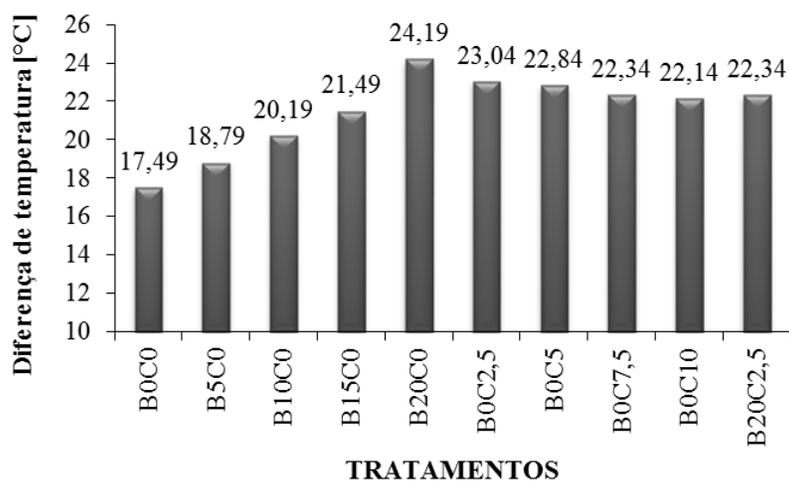
Figura 40 – Curvas de variação da temperatura em função do tempo de exposição ao calor obtidas nas câmaras térmicas para a argamassa de referência e as argamassas contendo partículas de borracha de pneu.



Fonte: Do autor (2016).

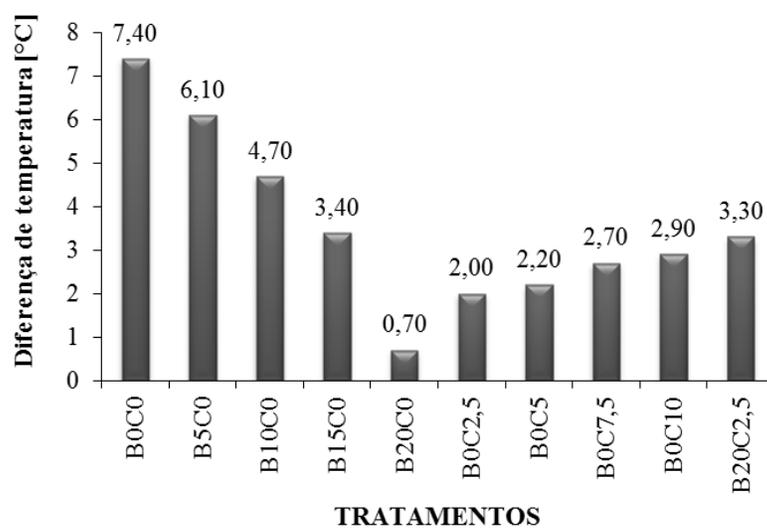
A diferença de temperatura entre câmaras foi feita a partir da média coletada pelo termopar incidente da câmara inferior e o máximo valor de temperatura coletada pelo termopar da câmara superior. Esse valor foi usado para complementar o entendimento e auxiliar na predição do isolamento térmico das argamassas. A média de temperatura do termopar incidente (controlado pelo arduino) foi de  $47,14^{\circ}$ . A variação de temperatura monitorada pelos termopares entre a máxima temperatura coletada pelo termopar da câmara superior e a média da temperatura incidente são mostradas na Figura 41. A diferença total de temperatura na câmara superior é mostrada na Figura 42.

Figura 41 – Gradiente de temperatura monitorado entre as câmaras térmicas durante o tempo de ensaio.



Fonte: Do autor (2016).

Figura 42 – Gradiente de temperatura monitorado na câmara térmica superior durante o tempo de ensaio.



Fonte: Do autor (2016).

Com relação aos tratamentos analisados contendo partículas de borracha em sua composição, a temperatura se mostrou mais constante (curva tendendo à linearidade) que na argamassa de referência, evidenciando uma melhora no isolamento quando se aumenta o uso das partículas de pneu. Nota-se que o tratamento B0C0 no intervalo de 0 a 0,33 hora apresentou gradiente de temperatura muito grande (variando 21,4°C a 26,4°C), o que indica que essa argamassa recebeu uma quantidade de calor e transmitiu parte desse calor em um curto período de tempo entre as câmaras, indicando uma maior condutividade térmica em relação às demais argamassas com partículas de borracha de pneu em sua composição e, conseqüentemente, um pior isolamento térmico. De 0,33 hora até aproximadamente 3,05 horas, o tratamento B0C0 continuou transmitindo calor ao termopar da câmara superior, com um gradiente de temperatura nesse intervalo de 26,4°C para 0,33 hora a 28,2°C para 3,05 horas. A partir desse tempo, a temperatura começou a se estabilizar. A temperatura máxima atingida na câmara superior para este tratamento foi de 29,6°C e a variação de temperatura do início ao final do ensaio no mesmo ambiente foi de 7,4°C e a variação entre as câmaras foi de 17,49°C.

Os tratamentos B5C0 e B10C0 apresentaram, até o tempo de aproximadamente 0,83 horas, um aumento mais acelerado na temperatura, variando de 22,2°C a 26,1°C para o B5C0 e de 21,4°C a 26,1°C para o B10C0. A partir desse tempo as curvas tem um leve aumento de temperatura de forma constante até o final do ensaio, tendendo a se estabilizar. A curva B5C0 teve um maior aumento de temperatura nesse intervalo chegando a temperatura máxima atingida na câmara superior de 28,3°C e o B10C0 uma temperatura máxima de 26,9°C, respectivamente. A variação de temperatura na câmara superior para o B5C0 e B10C0 foi de 6,1°C e 4,7°C, respectivamente.

O tratamento B15C0 mostra-se mais linear, apresentando uma lenta transferência de calor pela amostra durante todo o tempo de ensaio evidenciando

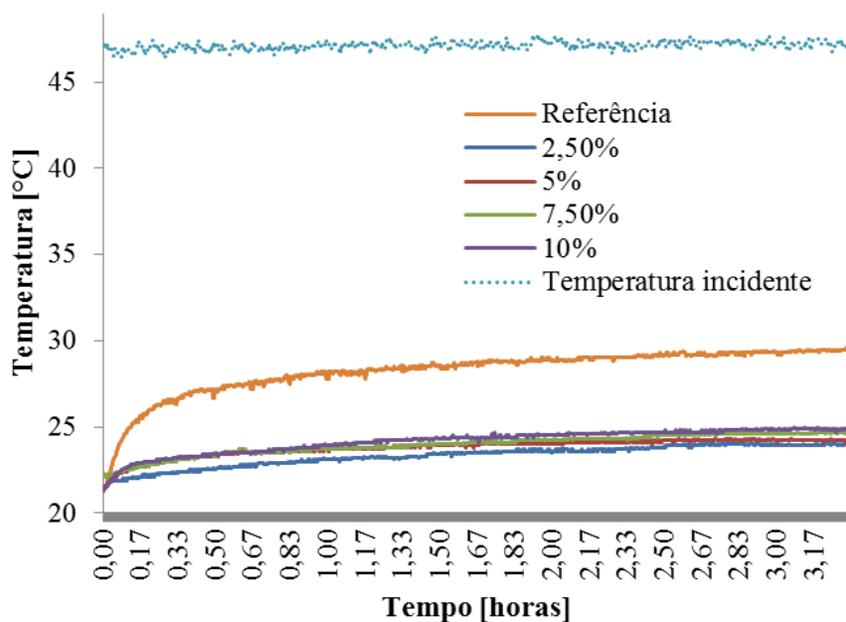
um melhor isolamento que os tratamentos B0C0, B5C0 e B10C0. A amplitude máxima de temperatura para esse tratamento foi de 21,2°C a 25,6°C, mostrando um gradiente de temperatura no ambiente da câmara superior de 3,4°C e uma variação de temperatura entre as câmaras de 21,49°C.

Por fim, como já era esperado, o tratamento B20C0 (com 20% de borracha) foi o que gerou o melhor isolamento térmico entre as câmaras. Para esse tratamento, houve uma pequena variação de temperatura no ambiente interno da câmara superior, mantendo a temperatura nesse ambiente quase constante durante todo o período de ensaio, tendo uma máxima temperatura registrada de 22,9°C. A variação de temperatura na câmara superior no intervalo de 3,33 horas foi de 0,7°C e a variação de temperatura entre os ambientes das câmaras foi de 24,19°C.

Os maiores valores observados na câmara térmica superior foram de 29,6°C, 28,3°C, 26,9°C, 25,6°C e 22,9°C para os tratamentos B0C0, B5C0, B10C0, B15C0 e B20C0, respectivamente evidenciando uma amenização de temperatura em relação a referência dos tratamentos B5C0, B10C0, B15C0 e B20C0 de 4%, 9%, 14% e 23%, respectivamente. Esses valores mostram que uma maior porcentagem de partículas de borracha de pneu na argamassa, dificultam a transferência de calor e a alteração de temperatura entre os ambientes.

Na Figura 43, é mostrada a variação de temperatura monitorada pelos termopares nas câmaras térmica relativa às argamassas B0C0, B0C2,5, B0C5, B0C7,5 e B0C10, que são os tratamentos com 0%, 2,5%, 7,5% e 10% de cinzas de borracha de pneu em substituição ao aglomerante em função do tempo.

Figura 43 – Curvas de variação da temperatura em função do tempo de exposição ao calor obtidas nas câmaras térmicas para a argamassa de referência e as argamassas contendo cinzas de borracha de pneu.



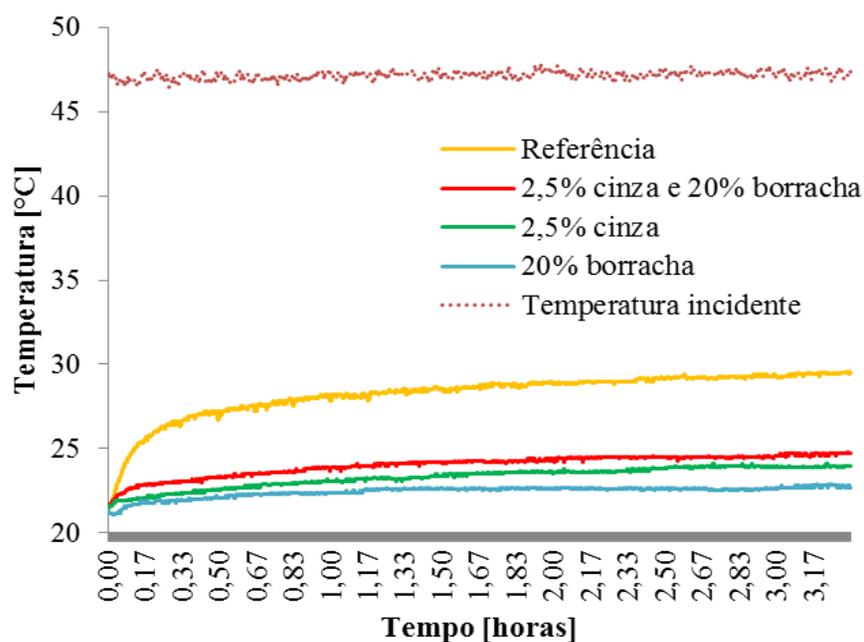
Fonte: Do autor (2016).

Nas argamassas analisadas contendo cinzas de borracha de pneu em sua composição, a temperatura também se mostrou mais constante (curva tendendo a linearidade) que na argamassa de referência, mostrando que as cinzas também exerceram influência sobre o isolamento térmico do material, apresentando muito pouca variação entre os tratamentos B0C2,5, B0C5, B0C7,5 e B0C10. Porém, a diferença em relação à argamassa de referência mostrou-se muito grande, com uma porcentagem de amenização em relação a ela de 19%, 18%, 16% e 16%, para os tratamentos B0C2,5, B0C5, B0C7,5 e B0C10. O melhor isolamento entre as argamassas contendo cinzas foi observado no tratamento

B0C2,5. Isso pode ser explicado pela relação entre a quantidade de cinzas presentes na argamassa e o teor de ar causado pelas mesmas. Como já visto anteriormente, as cinzas de borracha de pneu tem a capacidade de armazenar ar na argamassa devido a sua natureza apolar, melhorando o isolamento devido ao aumento de ar no interior das argamassas. Porém, as partículas de cinza parecem apresentar uma elevada condutividade térmica, fazendo com que o efeito causado pelo aumento da quantidade de ar na argamassa fosse anulado pela condutividade térmica das partículas de cinzas. Também é importante notar que, em comparação as argamassas com partículas de borracha de pneu, os tratamentos com cinzas tiveram um bom isolamento, ficando inferior apenas ao tratamento B20C0 (com 20% de borracha de pneu). As variações de temperatura entre ambientes foram de 17,49°C, 23,04°C, 22,84°C, 22,34°C e 22,14°C para os tratamentos B0C0, B0C2,5, B0C5, B0C7,5 e B0C10, respectivamente e a variação de temperatura no mesmo ambiente para essas argamassas foi de 7,40°C, 2,0°C, 2,2°C, 2,7°C e 2,9°C.

Na Figura 44, é mostrada a variação de temperatura monitorada pelos termopares nas câmaras térmica relativa às argamassas B0C0, B20C0, B0C2,5 e B20C2,5, que são os tratamentos com 0%, 20% de borracha de pneu, 2,5% de cinzas de borracha de pneu e o tratamento combinado entre os melhores resultados, de 2,5% de cinzas juntamente com 20% de borracha de pneu em função do tempo.

Figura 44 – Curvas de variação da temperatura em função do tempo de exposição ao calor obtidas nas câmaras térmicas para a argamassa de referência, a argamassa com 20% de partículas de pneu, a argamassas com 2,5% de cinzas de pneu e a argamassa combinada, composta das substituições de 20% de borracha de pneu e 2,5% de cinzas.

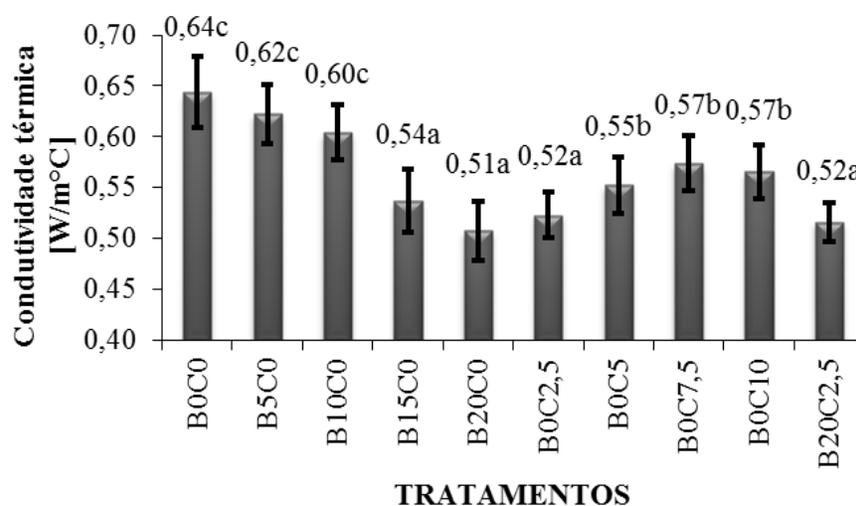


Fonte: Do autor (2016).

O tratamento B20C2,5 mostrou um isolamento abaixo do esperado, uma vez que contém 20% de borracha de pneu. Isso pode estar associado ao efeito *filler* causado pelas cinzas, reduzindo o teor de vazios no interior da argamassa (TORALLES-CARBONARI et al., 2010). O tratamento B20C2,5 teve uma temperatura máxima registrada de 22,34°C. A variação de temperatura na câmara superior no intervalo de 3,33 horas foi de 3,30°C e a variação de temperatura entre os ambientes das câmaras foi de 22,34°C, ou seja, uma diferença percentual em relação à argamassa de referência de 16%.

As estimativas das condutividades térmicas dos materiais estão apresentadas na Figura 45. Para o cálculo da condutividade, foi utilizado um valor de radiação de  $570 \text{ W/m}^2$ , obtido a partir das medições da radiação que chega na amostra feitas na câmara térmica.

Figura 45 – Condutividade térmica das argamassas contendo partículas de borracha de pneu e cinzas de borracha de pneu.



Fonte: Do autor (2016).

Os valores obtidos para condutividade térmica mostram um comportamento similar ao visto anteriormente na análise da variação da temperatura dentro das câmaras térmicas, evidenciando os melhores isolamentos observados nas argamassas contendo 15% e 20% de partículas de pneu, 2,5% de cinzas de borracha de pneu e a argamassa combinada, com 2,5% de borracha de pneu e 20% de partículas de borracha em sua composição, que não variaram estatisticamente pelo teste de Scott-Knott, a 5% de significância. A variação observada na condutividade térmica entre os tratamentos B20C0 e B0C2,5 em relação ao tratamento de referência (BOC0) foi de 20% e 19%, respectivamente,

mostrando a eficácia das partículas de borracha de pneu e das cinzas de borracha de pneu no isolamento térmico quando utilizado no revestimento de edificações. A redução da condutividade térmica do compósito aconteceu devido ao efeito de isolamento das partículas de borracha, que tem uma condutividade térmica mais baixa comparada com a de matriz de cimento (BENAZZOUK et al., 2008). Vários autores avaliaram a condutividade térmica de compósitos cimentícios com a adição de borracha e obtiveram diminuição dessa propriedade em função da adição de partículas de borracha de pneu.

Sukontasukkul (2009) realizou um estudo com objetivo de avaliar as propriedades térmicas de painéis de concreto contendo partículas de borracha de pneu em substituição do agregado miúdo nas proporções de 10%, 20% e 30% em peso e mostrou que os painéis de concreto com partículas de borracha de pneu tiveram uma menor transferência de calor que o painel de concreto convencional sendo essa menor transferência relativa a porcentagem de borracha acrescentada no concreto. Quanto maior foi a porcentagem de borracha adicionada, menor foi a condutividade térmica observada.

Meshgin, Xi e Li (2012) realizaram o estudo das propriedades térmicas de argamassa variando a granulometria das partículas de borracha de pneu passadas na peneira de 6 mesh e na peneira de malha 8-10 mesh, e mostrou que a condutividade térmica da argamassa com partículas de borracha depende não apenas na fração de volume das partículas de borracha, mas também do tamanho médio das partículas. Granulometrias menores de partículas de borracha resultaram em melhores propriedades térmicas da argamassa.

Herrero, Mayor e Hernández-Olivares (2013), analisando a influência das substituições do agregado miúdo em placas de concreto por partículas de borracha de pneu nas proporções de 30%, 40%, 50% e 60% em peso, observaram uma diminuição da condutividade térmica das placas com borracha de pneu em relação as placas de referência sem a adição de borracha. Os valores

mais baixos de condutividade térmica ocorreram nas amostras com granulometria mais fina das partículas de borracha, seguido pelas partículas de granulometria média e os piores valores obtidos de condutividade térmica se deram pelos corpos de prova com partículas de borracha mais grosseiras.

Benazzouk et al. (2008), utilizando as partículas de pneu nas proporções de 10%, 20%, 30%, 40% e 50% em volume como substituição ao cimento, observaram que a adição de partículas na matriz de cimento reduziu a condutividade térmica do compósito. O autor observou a diminuição nos valores de 1,16 W/mK na referência, para a 0,47 W/mK nas amostras com 50% de partículas de borracha. Os valores de condutividade diminuíram em 60%, que o autor atribuiu a característica isolante da borracha, evidenciando que elementos com menor condutividade térmica produzem compósitos com menor condutividade térmica.

Yesilata, Bulut e Turgut (2011) construíram uma sala cujas paredes exteriores são totalmente feitas com sucata de pneus na adição de concreto para a obtenção de melhor proteção térmica. Verificou-se que a introdução de pedaços de pneus em paredes de construção reduz a transferência de calor através deles, aumentando a resistência térmica. Tal aplicação pode ser uma solução de elevado custo benefício.

Ferreira (2009), avaliando a condutividade térmica de argamassas com substituição do agregado miúdo por partículas de borracha de pneu, em massa nas proporções de até 67,5% observou uma minimização da condutividade térmica dos corpos de prova com adição de 10%, 20%, 30%, 40% e 67,5% em resíduo de borracha foram de 0,66%, 4,26%, 9,77%, 24,52% e 45%, respectivamente em relação ao corpo de prova sem resíduo de borracha.

Comparando os valores de condutividade térmica obtidos com os valores de condutividade de materiais de uso comum na construção civil, percebe-se que os resultados obtidos são significativos. A Tabela 14 mostra

alguns valores para condutividade térmica de alguns materiais frequentemente utilizados na construção civil.

Tabela 14 – Valores de condutividade térmica de alguns materiais comuns na construção civil.

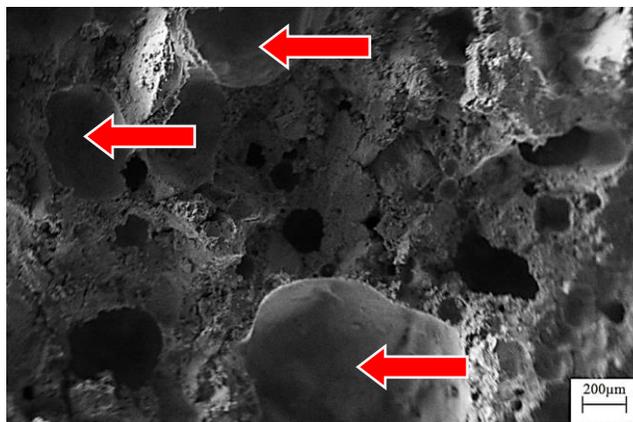
| <b>Material</b> | <b>Condutividade Térmica [W/m<sup>2</sup>°C]</b> |
|-----------------|--|
| Cerâmica        | 1,06   |
| Concreto leve   | 1,1  |
| Concreto armado | 1,51   |
| EPS             | 0,03   |
| Gesso           | 0,46   |
| Madeira         | 0,16   |
| Reboco          | 0,79   |
| Tijolo cerâmico | 0,61   |

Fonte: Silva (2010).

#### **4.3.6 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)**

As imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) feitas nos tratamentos B0C0 (referência), B20C0 (20% de borracha), B0C2,5 (2,5% de cinzas) e B20C2,5 (2,5% de cinzas e 20% de borracha) relativos aos corpos de prova utilizados nas câmaras térmicas são apresentadas na Figura 46, Figura 47, Figura 48 e Figura 49, respectivamente. Na Figura 46 é mostrada a foto capturada por microscopia eletrônica de varredura (MEV), relativa à argamassa de referência, sem substituição de agregados ou aglomerantes pelos resíduos de pneu, em que pode ser observada uma grande quantidade de sulcos ou depressões (indicados por setas), que anteriormente eram ocupadas por areia. Pode ser observada também a presença de alguns poros e cavidades (pontos escuros) dispersos na argamassa.

Figura 46 – Imagem capturadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) relativa à argamassa de referência (sem a presença de partículas de borracha de pneu ou de cinzas de borracha de pneu) Escala de 200  $\mu\text{m}$ .



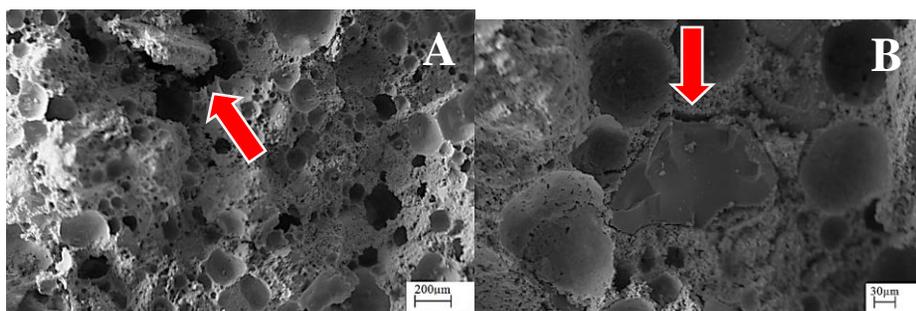
Fonte: Do autor (2016).

A Figura 47A e Figura 47B mostram a argamassa com substituição de 20% do agregado miúdo por partículas de borracha de pneu, em que as sobressalências encontradas e indicadas pelas setas demonstram a interface entre as partículas de borracha e a matriz cimentícia, evidenciando que a ligação entre as partículas e a pasta de cimento não é tão boa como com os agregados tradicionais, existindo fendas e aberturas em torno das partículas de borracha que geraram um grande número de espaços vazios entre essas partículas e a argamassa. Esse comportamento também foi evidenciado por Sukontasukkul (2009).

Essas lacunas favoreceram o pior desempenho quanto à resistência à compressão, uma vez que, quando um material possui uma maior quantidade de poros, terá também uma grande quantidade de espaços vazios promovidos pelos poros, fazendo com que o material fique mais frágil e quebradiço (DOURADO, 2015).

Foi observado também, na Figura 47A, um maior número de poros que na argamassa de referência (FIGURA 46), com tamanhos variáveis, que foram responsáveis pela menor densidade aparente dessa argamassa no estado endurecido e também pela melhora no isolamento térmico. Assim como na argamassa de referência, foram observados sulcos e lacunas deixadas pelo arranchamento das partículas de areia no momento da quebra do material para o ensaio de MEV.

Figura 47 – Imagens capturadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) da argamassa com substituição de 20% de agregado miúdo por partículas de borracha de pneu. A) Escala de 200  $\mu\text{m}$ ; B) Escala de 30  $\mu\text{m}$ .



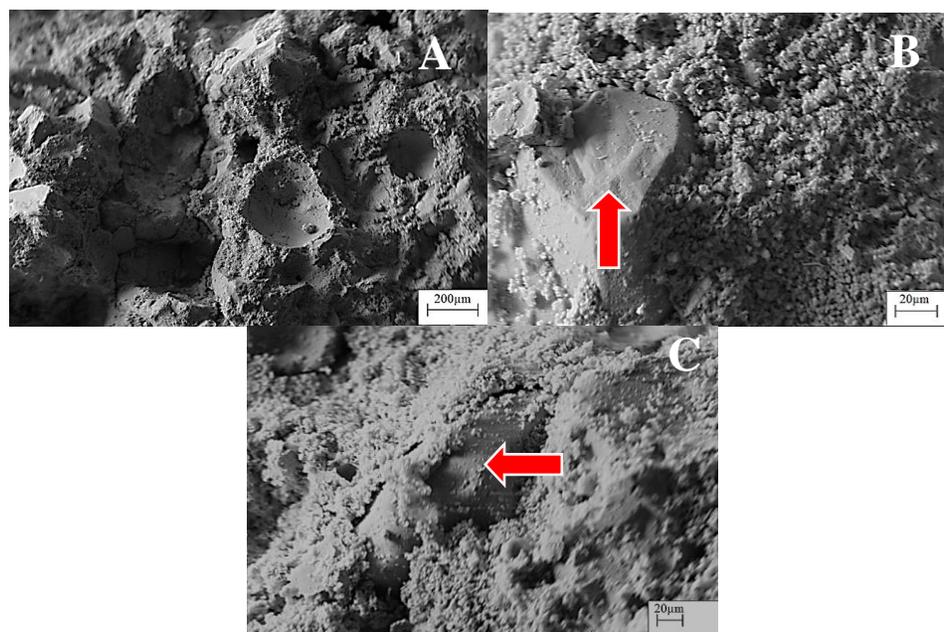
Fonte: Do autor (2016).

As imagens de MEV das argamassas com 2,5% de substituição do aglomerante por cinzas de borracha de pneu são mostradas na Figura 48.

As Figura 48B e Figura 48C mostram uma pequena separação entre partículas de cinza, indicadas por setas, e a matriz de cimento. Isso indica que a ligação interfacial entre a cinza de borracha e pasta de cimento é fraca, comportamento também observado por Gupta, Chaudhary e Sharma (2014), o que pode ter levado a uma menor resistência mecânica em comparação à argamassa de referência. Na Figura 48A, fica evidente a diminuição da

porosidade da argamassa contendo cinzas de borracha de pneu em relação às argamassas de referência e as argamassas contendo borracha. Isso pode ser explicado pelo efeito de enchimento (*filler*) que as partículas de cinzas podem exercer na argamassa diminuindo os vazios (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Figura 48 – Imagens capturadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) da argamassa com substituição de 2,5% do aglomerante por cinzas de borracha de pneu. A) Escala de 200  $\mu\text{m}$ ; B) Escala de 20  $\mu\text{m}$ ; C) Escala de 20  $\mu\text{m}$ .



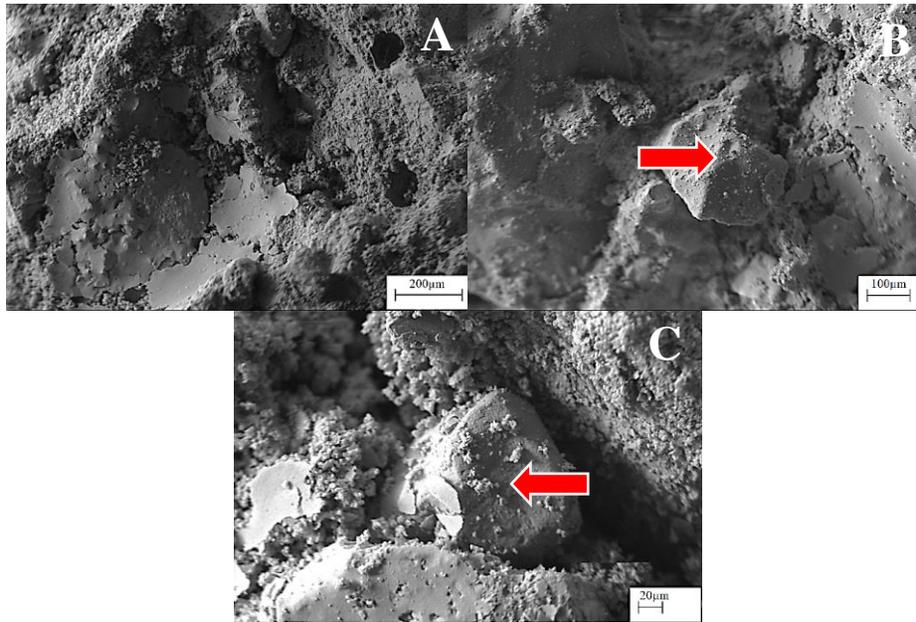
Fonte: Do autor (2016).

As imagens de MEV da argamassa correspondente ao tratamento combinado, com 2,5% de substituição do aglomerante por cinzas de borracha de pneu e 20% de substituição do agregado miúdo por partículas de borracha de pneu, são mostradas na Figura 49.

Pode ser claramente observado na Figura 49A que a porosidade da argamassa do tratamento combinado foi imensamente menor que a do

tratamento B20C0 (com 20% de partículas de borracha de pneu), apresentando uma pequena quantidade de sulcos (pontos escuros). Isso pode estar associado ao efeito *filler* das cinzas que ocuparam essas espaços vazios. As setas mostradas na Figura 49B e Figura 49C indicam as cinzas de borracha de pneu, nas quais foram percebidas lacunas bem menores que as vistas anteriormente no tratamento que continha somente partículas de borracha de pneu em sua composição, o que indica que as cinzas cumpriram bem seu papel de enchimento, o que pode ser comprovado pela melhora na resistência à compressão em relação ao tratamento com 20% de partículas de borracha de pneu. As heterogeneidades da microestrutura das argamassas, principalmente na zona de transição interfacial entre agregados e matriz de cimento, são responsáveis pela redução na resistência à compressão da argamassa em relação ao tratamento B0C2,5 (2,5% de cinza em substituição ao aglomerante). Ou seja, a adesão entre agregado e matriz cimentícia é um fator que governa a resistência da argamassa (PROKOPSKI; HALBINIAK, 2000; SEGRE et al., 2006).

Figura 49 – Imagens capturadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) do tratamento combinado, relativo à argamassa com substituição de 2,5% do aglomerante por cinzas de borracha de pneu e 20% do agregado miúdo por partículas de borracha de pneu. A) Escala de 200  $\mu\text{m}$ ; B) Escala de 100  $\mu\text{m}$ ; C) Escala de 20  $\mu\text{m}$ .



Fonte: Do autor (2016).

## 5. CONCLUSÃO

As argamassas com partículas de pneu e cinzas das partículas de pneu são uma alternativa para a redução de impactos ambientais provocados pelo descarte de pneus inservíveis ou restos de produção e reforma. Os resultados obtidos por meio deste trabalho mostraram o potencial do uso das partículas de borracha de pneu, assim como o uso das cinzas de borracha de pneu para o isolamento térmico, quando utilizada na argamassa de revestimento. Quanto maior foi a porcentagem de borracha adicionada, menor foi a condutividade térmica observada, sendo o melhor isolamento obtido nos tratamentos com 15% e 20% de partículas de borracha de pneu, no tratamento com 2,5% de cinzas de borracha de pneu e no tratamento combinado (com 2,5% de cinzas e 20% de partículas de borracha).

Também foi verificado que a adição de borracha de pneu nas argamassas, apesar do aumento da porcentagem de borracha substituída na areia reduzir a resistência da argamassa, mantém a resistência à compressão dentro dos valores estabelecidos pela norma NBR 13281 (ABNT, 2001), sendo identificadas como classe I nessa norma. Já nas argamassas com substituição parcial do cimento pelas cinzas de borracha de pneu, houve uma diminuição na resistência à compressão em função do aumento do teor de cinzas de borracha de pneu até os 5% de substituição, valor a partir do qual a resistência voltou a ter maiores valores.

Os resultados confirmam também o potencial do uso das cinzas de borracha de pneu como um substituto para o cimento Portland, sendo utilizada como material pozolânico.

A densidade aparente tanto das argamassas produzidas com partículas de borracha de pneu quanto das argamassas produzidas com cinzas de borracha de pneu foi caracterizada por uma diminuição como uma função do teor dos

materiais adicionados. O aumento de partículas de borracha de pneu tiveram resultado negativo na trabalhabilidade, enquanto as cinzas melhoraram a trabalhabilidade da argamassa.

O tratamento combinado (2,5% de cinzas em substituição ao cimento e 20% de borracha em substituição a areia) melhorou a resistência à compressão e a trabalhabilidade, que se mostraram piores na argamassa B20C0 (com a substituição da areia por 20% de borracha de pneu) enquanto manteve a condutividade térmica e densidade aparente no estado endurecido com valores próximos aos obtidos para a argamassa com 20% de partículas de pneu, salientando a boa correlação entre as substituições visando um melhor isolamento térmico enquanto promove propriedades mecânicas consideráveis.

## REFERÊNCIAS

AFSHINNIA, K.; POURSAEE, A. The influence of waste crumb rubber in reducing the alkali: silica reaction in mortar bars. **Journal of Building Engineering**, New York, v. 4, p. 231-236, Dec. 2015.

AIELLO, M. A.; LEUZZI, F. Waste tyre rubberized concrete: properties at fresh and hardened state. **Waste Management**, Oxford, v. 30, n. 8/9, p. 1696-1704, 2010.

AKÇAÖZOĞLU, K. et al. Microstructural examination of the effect of elevated temperature on the concrete containing clinoptilolite. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 72, p. 316-325, Dec. 2014.

AL-AKHRAS, N. M.; SMADI, M. M. Properties of tire rubber ash mortar. **Cement & Concrete Composites**, Barking, v. 26, p. 821-826, 2004.

ALBUQUERQUE, A. C. et al. Adição de borracha de pneu ao concreto convencional e compactado com rolo. In: ANAIS DO CONGRESSO DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA EM ENERGIA ELÉTRICA, 3., 2005, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: CINETEL, 2006. 1 CD-ROM.

AMBIENTE BRASIL. **Reciclagem de pneus**. Disponível em: <<http://ambientes.ambientebrasil.com.br/residuos/reciclagem>>. Acesso em: 10 jun. 2015.

ANGELIN, A. F. et al. Effects of spheroid and fiber-like waste-tire rubbers on interrelation of strength-to-porosity in rubberized cement and mortars. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 95, p. 525-536, Oct. 2015.

ANGULO, S. C.; ZORDAN, S. E.; JOHN, V. M. Desenvolvimento sustentável e a reciclagem de resíduos na construção civil. In: SEMINÁRIO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E A RECICLAGEM NA CONSTRUÇÃO CIVIL - MATERIAIS RECICLADOS E SUAS APLICAÇÕES, 4., 2001, São Paulo. **Anais...** São Paulo: IBRACON, 2001. 1 CD-ROM.

ARNOLD, D. C. M. **Análise da influência da forma dos grãos nas propriedades das argamassas**. 2011. 115 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Universidade do Valle dos Sinos, São Leopoldo, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45:** agregados: determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 52:** agregado miúdo: determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009a. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248:** agregados: determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5752:** materiais pozolânicos: determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias. Rio de Janeiro, 2014a. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211:** agregados para concreto: especificação. Rio de Janeiro, 2009b. 9 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215:** cimento Portland: determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996a. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11578:** cimento Portland composto: especificação. Rio de Janeiro, 1991. 5 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11579:** cimento Portland: determinação do índice de finura por meio da peneira 75  $\mu\text{m}$  (nº 200). Rio de Janeiro, 2012. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653:** materiais pozolânicos: requisitos. Rio de Janeiro, 2014b. 6 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276:** argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2005. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13279:** argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos: determinação da resistência à compressão: método de ensaio. Rio de Janeiro, 1995. 2 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13281**: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: requisitos. Rio de Janeiro, 2001. 3 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13749**: revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas: especificação. Rio de Janeiro, 2013. 8 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13753**: revestimento de piso interno ou externo com placas cerâmicas e com utilização de argamassa colante: procedimento. Rio de Janeiro, 1996b. 19 p.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE PNEUMÁTICOS. **ANIP em números, 2014**. Disponível em: <<http://www.anip.com.br/?cont=conteudo>>. Acesso em: 8 mar. 2015.

AUSTIN, S. A.; ROBINS, P. J.; GOODIER, C. I. Construction and repair with wet-process sprayed concrete and mortar. **Technical Report, Concrete Society, Crowthorne**, London, n. 56, p. 1-44, 2002.

BARONI, M. **Estudo da viabilidade do aproveitamento de pneus inservíveis como material de construção de estruturas de contenção arrimadas**. 2007. 114 p. Monografia (Graduação em Engenharia Civil)-Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, 2007.

BATAYNEH, M. K.; MARIE, I.; ASI, I. Promoting the use of crumb rubber concrete in developing countries. **Waste Management**, Oxford, v. 28, p. 2171-2176, 2008.

BENAZZOUK, A. et al. Physico-mechanical properties and water absorption of cement composite containing shredded rubber wastes. **Cement & Concrete Composites**, Barking, v. 29, p. 732-740, 2007.

BENAZZOUK, A. et al. Thermal conductivity of cement composites containing rubber waste particles: experimental study and modelling. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 22, p. 573-579, 2008.

BEZERRA, I. M. T. et al. Aplicação da cinza da casca do arroz em argamassas de assentamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 6, p. 639-645, 2011.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 2010. Edição extra, p. 1.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 416, de 30 de setembro de 2009. Dispõe sobre a prevenção à degradação ambiental causada por pneus inservíveis e sua destinação ambientalmente adequada, e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, n. 188, p. 64-65, 1 out. 2009.

CABRAL, A. E. B. **Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, considerando-se a variabilidade da composição do RCD**. 2007. 280 p. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental)-Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

CANOVA, J. A.; BERGAMASCO, R.; ANGELIS NETO, G. de. A utilização de resíduos de pneus inservíveis em argamassa de revestimento. **Acta Scientiarum Technology**, Maringá, v. 29, n. 2, p. 141-149, 2007.

CARASEK, H. Argamassas. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São Paulo: IBRACON, 2007. v. 2, cap. 26, p. 863-904.

CARDOSO, G. T. **Caracterização da espuma rígida de poliuretano (PU) derivada de óleo de mamona para isolamento térmico na construção civil**. 2010. 84 p. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais)-Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

CARMO, J. B. M.; PORTELLA, K. F. Estudo comparativo do desempenho mecânico da sílica ativa e do metacaulim como adições químicas minerais em estruturas de concreto. **Cerâmica**, São Paulo, v. 54, p. 309-318, 2008.

CATAI, R. E.; PENTEADO, A. P.; DALBELLO, P. F. Materiais, técnicas e processos para isolamento acústico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, 17., 2006, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu, 2006. p. 4205-4216.

ÇENGEL, Y. A. **Transferência de calor e massa: uma abordagem prática**. 3. ed. São Paulo: McGraw Hill, 2009. 902 p.

CHABANNES, M. et al. Use of raw rice husk as natural aggregate in a lightweight insulating concrete: an innovative application. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 70, p. 428-438, Nov. 2014.

CHEN, S.; WANG, H.; JHOU, J. Investigating the properties of lightweight concrete containing high contents of recycled green building materials. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 48, p. 98-103, Nov. 2013.

CHUN-SHENG, L. et al. Research in the fundamental characteristics of crumb rubber mortar. **Concrete**, London, v. 7, p. 38-42, 2005.

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**, São Paulo, v. 60, n. 353, p. 69-76, mar. 2014.

COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM. **CEMPRE ficha técnica**, 2016. Disponível em: <<http://cempre.org.br/artigo-publicacao/ficha-tecnica>>. Acesso em: 15 mar. 2016.

CORREIA, S. L. et al. Factorial design used to model the compressive strength of mortars containing recycled rubber. **Composite Structures**, Oxford, v. 92, n. 9, p. 2047-2051, 2010.

COSTA, A. B. **Potencial pozolânico da cinza volante como material de substituição parcial de cimento**. 2015. 75 p. Monografia (Graduação em Engenharia Civil)-Centro Universitário Univates, Lajeado, 2015.

DOURADO, D. C. **Estudo de fibrocimento com resíduos de pneu**. 2015. 115 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2015.

ETXEBERRIA, M. et al. Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v. 37, p. 735-742, 2007.

FARIA, J. S. **Incorporação de resíduo pó de borracha de pneus inservíveis em cerâmica vermelha**. 2015. 125 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia)-Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2015.

FAZZAN, J. V. **Comportamento estrutural de lajes pré-moldadas treliçadas com adição de resíduos de borracha de pneu**. 2011. 169 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia)-Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2011.

FELIX, V. B. et al. Avaliação de conforto térmico em ambientes cirúrgicos utilizando método de Fanger e temperaturas equivalentes. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 10, n. 11, p. 69-78, 2010.

FERREIRA, A. A.; SILVEIRA, A. A.; DAL MOLIN, D. C. C. A cinza da casca de arroz: possibilidades de utilização como insumo na produção de materiais de construção. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE EDIFICAÇÕES E COMUNIDADES SUSTENTÁVEIS, 6., 1997, Canela. **Anais...** Canela: Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 1997. p. 293-298.

FERREIRA, C. R. G. **Análise de propriedades térmicas e mecânicas de compósitos de argamassa e resíduo de borracha**. 2009. 74 p. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia dos Materiais)-Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2009.

FIORITI, C. F.; INO, A.; AKASAKI, J. L. Avaliação de blocos de concreto para pavimentação intertravada com adição de resíduos de borracha provenientes da recauchutagem de pneus. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 7, n. 4, p. 43-54, 2007.

FRANÇA, V. H. **Aderência aço-concreto: uma análise do comportamento do concreto fabricado com resíduos de borracha**. 2004. 128 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira, 2004.

GANJIAN, E.; KHORAMI, M.; MAGHSOUDI, A. A. Scrap-tyre-rubber replacement for aggregate and filler in concrete. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 23, n. 5, p. 1828-1836, 2009.

GISAH, A. P.; THOMPSON, R. V. **Comparativo de custos de sistemas construtivos, alvenaria estrutura e estrutura em concreto armado no caso do empreendimento Piazza Maggiore**. 2011. 42 p. Monografia (Graduação em Engenharia Civil)-Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

GOBBI, A. **Atividade pozolânica de adições minerais pelas nbr 5751/2012 e nbr 5752/2012: uma análise crítica a partir de métodos complementares**. 2014. 146 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil)-Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

GOULART, E. A. **Reciclagem energética de pneus automotivos em reator de leito fluidizado**: uma proposta para a questão ambiental. 1999. 100 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1999.

GRANZOTTO, L. **Concreto com adições de borracha**: uma alternativa ecologicamente viável. 2010. 132 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana)-Faculdade de Engenharia Urbana, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2010.

GRANZOTTO, L.; SOUZA, R. A. de. Mechanical properties of structural concrete with partial replacement of fine aggregate by tire rubber. **Acta Scientiarum Technology**, Maringá, v. 35, n. 1, p. 39-44, 2013.

GUPTA, T.; CHAUDHARY, S.; SHARMA, R. K. Assessment of mechanical and durability properties of concrete containing waste rubber tire as fine aggregate. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 73, p. 562-574, Dec. 2014.

HERRERO, S.; MAYOR, P.; HERNÁNDEZ-OLIVARES, F. Influence of proportion and particle size gradation of rubber from end-of-life tires on mechanical , thermal and acoustic properties of plaster: rubber mortars. **Materials and Design**, Surrey, v. 47, p. 633-642, May 2013.

INSTITUTO AGRONÔMICO DE CAMPINAS. **Centro de pesquisas**. 2015. Disponível em: <<http://www.iac.sp.gov.br/areasdepesquisa/seringueira/importancia.php>>. Acesso em: 09 jun. 2015.

JIANG, J. et al. Study on the preparation and properties of high-porosity foamed concretes based on ordinary Portland cement. **Materials & Design**, Surrey, v. 92, p. 949-959, 2016.

JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil**: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento. 2000. 102 p. Tese (Livre Docência em Engenharia Civil)-Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

KAMIMURA, E. **Potencial de utilização dos resíduos de borracha de pneus pela indústria da construção civil**. 2002. 143 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

KHATIB, Z. K.; BAYOMY, F. M. Rubberized Portland cement concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, New York, v. 11, n. 3, p. 206-213, 1999.

KUNZLER, L. S. Q. **Estudo das variáveis de rugosidade, dureza e condutividade térmica aplicado à percepção tátil em design de produto**. 2003. 120 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais)-Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2003.

LACERDA, L. P. **Pneus descartados no Brasil: subsídios para uma reflexão sobre o problema na bahia**. 2001. 59 p. Monografia (Especialização em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais na Indústria)-Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2001.

LAGARINHOS, C. A. F.; TENÓRIO, J. A. S. Tecnologias utilizadas para a reutilização, reciclagem e valorização energética de pneus no Brasil. **Polímeros**, São Carlos, v. 18, n. 2, p. 106-118, 2008.

LING, T. Effects of compaction method and rubber content on the properties of concrete paving blocks. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 28, n. 1, p. 164-175, 2012.

LINTZ, R. C. C. et al. Avaliação do comportamento de concreto contendo borracha de pneus inservíveis para utilização em pisos intertravados. **Engenharia Civil**, São Paulo, v. 37, n. 12, p. 17-26, 2010.

MACIEL, L. L.; BARROS, M. M. S. B.; SABBATINI, F. H. **Recomendações para a execução de revestimentos de argamassa para paredes de vedação internas e exteriores e tetos**. São Paulo: EPUSP, 1998. Notas de aula da disciplina de “Tecnologia das Construções de Edifícios II”.

MALHOTRA, V. M.; MEHTA, P. K. **Pozzolanic and cementitious materials**. Amsterdam: Taylor & Francis, 1996. v. 1, 191 p.

MANO, E. B.; MENDES, L. C. **Introdução à polímeros**. 2. ed. São Paulo: E. Blücher, 1999. 208 p.

MARTINS, I. R. de F. **Concreto de alto desempenho com adição de resíduos de borracha de pneu**. 2005. 149 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2005.

MATTOS, C.; DRUMOND, A. V. N. Sensação térmica: uma abordagem interdisciplinar. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 21, n. 1, p. 7-34, 2004.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto**: microestrutura, propriedades e materiais. 3. ed. São Paulo: Pini, 2008. 673 p.

MENEZES, V. J. **Avaliação das emissões oriundas da degradação térmica de pneus**. 2005. 110 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Polímeros)-Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

MESHGIN, P.; XI, Y.; LI, Y. Utilization of phase change materials and rubber particles to improve thermal and mechanical properties of mortar. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 28, n. 1, p. 713-721, 2012.

MOHAMAD, G.; RIZZATTI, E.; ROMAN, H. R. Modo de ruptura, deformabilidade e resistência de pequenas paredes estruturais. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 11, n. 3, p. 7-22, 2011.

MOHAMMED, B. S. et al. Properties of crumb rubber hollow concrete block. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 23, n. 1, p. 57-67, 2012.

MOUSTAFA, A.; ELGAWADY, M. A. Mechanical properties of high strength concrete with scrap tire rubber. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 93, p. 249-256, Sept. 2015.

ODA, S.; FERNANDES, J. L. Borracha de pneus como modificador de cimentos asfálticos para uso em obras de pavimentação. **Acta Scientiarum**, Maringá, v. 23, n. 6, p. 1589-1599, 2001.

OLIVEIRA, M. P. de et al. Estudo do caulim calcinado como material de substituição parcial do cimento Portland. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA DE MATERIAIS E TECNOLOGIAS NÃO CONVENCIONAIS: HABITAÇÕES E INFRA-ESTRUTURA DE INTERESSE SOCIAL, 2004, Pirassununga. **Anais...** Pirassununga, 2004. p. 377-386.

ONUAGULUCHI, O. Effects of surface pre-coating and silica fume on crumb rubber-cement matrix interface and cement mortar properties. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 104, p. 339-345, Oct. 2015.

ORTEGA, E. S. et al. Evaluation of crumb rubber as aggregate for automated manufacturing of rubberized long hollow blocks and bricks. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 106, p. 305-316, Mar. 2016.

PEDRO, D.; BRITO, J. de; VEIGA, R. Argamassas fabricadas com materiais finos provenientes da trituração de pneus Mortars made with fine materials from shredded tires. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, Rio Grande, n. 19, p. 63-76, maio 2012.

PEREIRA, L. J. **Revestimento interno de argamassa em alvenaria com blocos cerâmicos**: verificação da aderência com e sem o uso de chapisco. 2014. 57 p. Monografia (Graduação em Engenharia Civil)-Universidade Federal do Rio Grande do sul, Porto Alegre, 2014.

PINAFFI, C. D. et al. Estudo e análise da fabricação de concreto a partir do uso de resíduos de borracha de pneus. **Colloquium Exactarum**, Presidente Prudente, v. 4, p. 99-106, out. 2013. Número especial.

PIRES, N. M. T. **Sistemas catalíticos à base de neodímio para obtenção polibutadieno com alto teor de unidades cis**. Rio de Janeiro: UFRJ, 2000. Seminário para Doutorado, Instituto de Macromoléculas Prof. "Eloisa Mano".

PROKOPSKI, G.; HALBINIAK, J. Interfacial transition zone in cementitious materials. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v. 30, p. 1-5, 2000.

QUEIRÓS, J. E. de. **Avaliação do desempenho de argamassas à base de cimento Portland para rejuntamento de placas cerâmicas tipo II com adição de pó de borracha de pneus**. 2015. 78 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015.

RAGHAVAN, D.; HUYNH, H.; FERRARIS, C. F. Workability, mechanical properties, and chemical stability of a recycled tyre rubber-filled cementitious composite. **Journal of Materials Science**, Norwell, v. 33, n. 7, p. 1745-1752, 1998.

RIPPEL, M. M.; BRAGANÇA, F. D. C. Borracha natural e nanocompósitos com argila. **Química Nova**, São Paulo, v. 32, n. 3, p. 818-826, 2009.

ROJAS, M. F.; CABRERA, J. The effect of temperature on the hydration rate and stability of the hydration phases of metakaolin - lime - water systems. **Cement and Concrete Research**, Elmsford, v. 32, p. 133-138, Jan. 2002.

ROMUALDO, A. C. A. et al. Pneus inservíveis como agregados na composição de concreto para calçadas de borracha. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ADVANCES IN CLEANER PRODUCTION, 3., 2011, São Paulo. **Anais...** São Paulo, 2011. 1 CD-ROM.

SACHER, R. E.; MACOINE, D. P.; SINGLER, R. E. Thermal analysis and characterization of elastomers and carbon black filler rubber composites for army applications. **Army Materials and Mechanics Research Center Wateron**, Massachussts, p. 4-85, 1985. Final report.

SALES, A. T. C.; ALFERES FILHO, R. dos S. Efeito do pó de resíduo cerâmico como adição ativa para o concreto. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 14, n. 1, p. 113-125, 2014.

SALINI, R. B. **Utilização de borracha reciclada de pneus em misturas asfálticas**. 2000. 138 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil)-Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

SANCHES, A. O. **Obtenção e caracterização elétrica e morfológica de compósitos de borracha natural com PZT**. 2012. 133 p. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais)-Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2012.

SANTIN, C. K.; PINTO, G. D. C.; JACOBI, M. M. Epoxidação “in situ” aplicada ao látex de borracha natural. **Polímeros**, São Carlos, v. 22, n. 2, p. 193-199, 2012.

SANTOS, C. C.; DALLA VALENTINA, L. V. O.; SOUZA, R. O. de. Caracterização do resíduo pó de exaustão de fundição na indústria da construção civil. **Espacios**, Caracas, v. 36, n. 5, p. 9, jan. 2015.

SANTOS, H. B. dos. **Ensaio de aderência das argamassas de revestimento**. 2008. 50 p. Monografia (Especialização em Construção Civil)-Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

SANTOS, W. N. dos. O método de fio quente: técnica em paralelo e técnica de superfície. **Cerâmica**, São Paulo, v. 48, n. 306, p. 86-91, 2002.

SANTOS, W. N. dos et al. Método de fio quente na determinação das propriedades térmicas de polímeros. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, São Carlos, v. 14, n. 5, p. 354-359, 2004.

SAYADI, A. A. et al. Effects of expanded polystyrene (EPS) particles on fire resistance , thermal conductivity and compressive strength of foamed concrete. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 112, p. 716-724, June 2016.

SCHERRER, A.; SILVA, J. L. G. da; BRITO, L. A. P. F. de. Estudo da influência do crescimento da construção civil na deposição de resíduos sólidos: Estudo de caso no município de Caraguatatuba. **Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional**, Taubaté, v. 10, n. 2, p. 243-263, 2014.

SCURACCHIO, C. H.; WAKI, D. A.; SILVA, M. L. C. P. Thermal analysis of ground tire rubber devulcanized by microwaves. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, Oxford, v. 87, n. 3, p. 893-897, 2007.

SEGRE, N. et al. Effect of tire rubber particles on crack propagation in cement paste. **Materials Research**, Pittsburgh, v. 9, n. 3, p. 311-320, 2006.

SILVA, A. da R. **Estudo térmico e de materiais na construção de casas populares com blocos confeccionados a partir de um composto a base de cimento, gesso, eps e raspa de pneu**. 2010. 92 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)-Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.

SILVA, A. S. et al. Incorporação de resíduos de borracha em compósitos de matriz polimérica termorrígida. **Matéria**, Rio de Janeiro, v. 17, n. 4, p. 1158-1165, 2012.

SILVA, N. G. da. **Argamassa de revestimento de cimento, cal e areia britada de rocha calcária**. 2006. 180 p. Dissertação (Mestrado em Construção Civil)-Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

SINGH, M.; SIDDIQUE, R. Strength properties and micro-structural properties of concrete containing coal bottom ash as partial replacement of fine aggregate. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 50, p. 246-256, Jan. 2014.

SINGH, S. et al. Sustainable utilization of granite cutting waste in high strength concrete. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 116, p. 223-235, Mar. 2016.

SKOOG, D. A.; HOLLER, F. J.; NIEMAN, T. A. **Princípios de análise instrumental**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009. 342 p.

SOUSA, M. S. de; OLIVEIRA, I. S. R. de; CABRAL, A. da S. Utilização do resíduo de desembarrachamento de pistas de aeronaves na produção de blocos de concreto para pavimentação. In: SIMPOSIO IBEROAMERICANO DE INGENIERÍA DE RESIDUOS, 3.; SEMINÁRIO DA REGIÃO NORDESTE SOBRE RESÍDUOS SÓLIDOS, 2., 2010, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza, 2010. 1 CD-ROM.

SOUZA, C. M. **Estudo do efeito das variações ambientais sobre o cimento portland com adições**. 2007. 88 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil)-Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2007.

SUKONTASUKKUL, P. Use of crumb rubber to improve thermal and sound properties of pre-cast concrete panel. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 23, n. 2, p. 1084-1092, 2009.

TAM, V. W. Y.; WANG, K.; TAM, C. M. Assessing relationships among properties of demolished concrete, recycled aggregate and recycled aggregate concrete using regression analysis. **Journal of Hazardous Materials**, Amsterdam, v. 152, p. 703-714, 2007.

THOMASA, B. S. et al. Strength, abrasion and permeation characteristics of cement concrete containing discarded rubber fine aggregates. **Construction and Building Materials**, Guildford, v. 59, p. 204-212, May 2014.

TORALLES-CARBONARI, B. M. et al. Utilização do método ultrasônico para avaliação da performance do concreto de alto desempenho. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, Porto Alegre, v. 3, n. 4, p. 494-511, dez. 2010.

TURGUT, P.; YESILATA, B. Physico-mechanical and thermal performances of newly developed rubber-added bricks. **Energy and Buildings**, Lausanne, v. 40, p. 679-688, 2008.

VASCONCELOS, A. R. B. de; AKASAKI, J. L. Análise da durabilidade do concreto de alto desempenho com adição de cinza de casca de arroz e borracha de pneu. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 10, n. 1, p. 77-90, 2010.

VASQUES, C. C. P. C. F.; PIZZO, L. M. B. F. Comparativo de sistemas construtivos, convencional e wood frame em residências unifamiliares. **Cognitio/Pós-graduação Unilins**, Lins, v. 1, n. 1, 2014. Disponível em: <<http://revista.unilins.edu.br/index.php/cognitio/article/view/193/188>>. Acesso em: 10 mar. 2016.

WANG, K. et al. Development of mix proportion for functional and durable pervious concrete. In: NRMCA CONCRETE TECHNOLOGY FORUM-FOCUS ON PERVIOUS CONCRETE, 2006, Nashville. **Proceedings...** Nashville, 2006. p. 1-12.

WILLIAMS, P. T.; BESLER, S. Pyrolysis-thermogravimetric analysis of tyres and tyre components. **Fuel**, London, v. 74, n. 9, p. 1277-1283, 1995.

YESILATA, B.; BULUT, H.; TURGUT, P. Experimental study on thermal behavior of a building structure using rubberized exterior-walls. **Energy and Buildings**, Lausanne, v. 43, n. 1, p. 393-399, 2011.