



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA  
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO CONSTRUÇÕES RURAIS E AMBIÊNCIA



**DESENVOLVIMENTO DE ARGAMASSAS PARA  
REVESTIMENTO DE ALVENARIA COM  
ADIÇÃO DE BORRACHA RECICLADA DE PNEU**

VICENTE DE PAULA TEIXEIRA ROCHA

Campina Grande - PB

**Junho - 2019**

Vicente de Paula Teixeira Rocha

**DESENVOLVIMENTO DE ARGAMASSAS PARA  
REVESTIMENTO DE ALVENARIA COM  
ADIÇÃO DE BORRACHA RECICLADA DE PNEU**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola do Centro de Tecnologia e Recursos Naturais da Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento às exigências para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Agrícola na área de Construções Rurais e Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. José Wallace Barbosa do Nascimento

Campina Grande - PB

**Junho- 2019**

R672d

Rocha, Vicente de Paula Teixeira.

Desenvolvimento de argamassa para revestimento de alvenaria com  
adição de borracha reciclada de pneu / Vicente de Paula Teixeira Rocha.  
– Campina Grande, 2019.

136 f.: il. color.

Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal  
de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2019.

"Orientação: Prof. Dr. José Wallace Barbosa do Nascimento".

Referências.

1. Argamassa Alternativa. 2. Conforto Térmico. 3. Condutividade  
Térmica. 4. Caracterização Físico-mecânica. I. Nascimento, José Wallace  
Barbosa do. II. Título.

CDU 691.53(043)



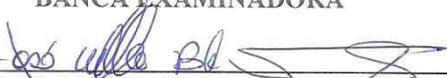
PARECER FINAL DO JULGAMENTO DA TESE

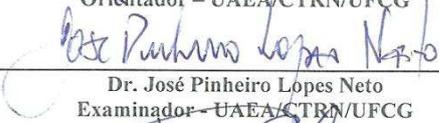
VICENTE DE PAULA TEIXEIRA ROCHA

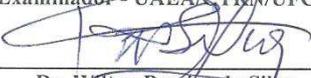
“DESENVOLVIMENTO DE ARGAMASSA PARA REVESTIMENTO DE  
ALVENARIA COM ADIÇÃO DE BORRACHA RECICLADA DE PNEU”

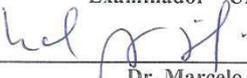
APROVADO(A): 27 de junho de 2019

BANCA EXAMINADORA

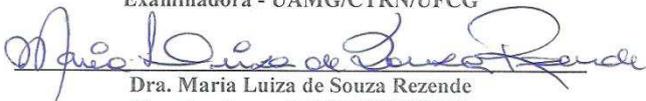
  
Dr. José Wallace Barbosa do Nascimento  
Orientador – UAEA/CTRN/UFCCG

  
Dr. José Pinheiro Lopes Neto  
Examinador – UAEA/CTRN/UFCCG

  
Dr. Wilton Pereira da Silva  
Examinador – UAEM/CCT/UFCCG

  
Dr. Marcelo Bezerra Grilo  
Examinador – UAEM/CCT/UFCCG

  
Dra. Claudia Maria de Oliveira Raposo  
Examinadora - UAMG/CTRN/UFCCG

  
Dra. Maria Luiza de Souza Rezende  
Examinadora – UAEP/CCT/UFCCG

**A prática deve estar sempre apoiada na  
boa teoria. (Leonardo da Vinci)**

## **DEDICO**

Aos meus pais (Arlindo e Ivone) pelos conselhos desde os primórdios desta minha existência, proporcionando-me felicidade eterna. À minha esposa (Vera Solange) que prestou-me efetivo e muito importante apoio nesta busca pelo saber, sempre disponível com mente e ouvidos atentos. Aos meus filhos (Aline, Caio e Paula) pelo grande orgulho em poder compartilhar as dádivas desta encarnação. Aos meus irmãos (Eusébio, Kael e Eugênio) com quem tenho vivido tantos sonhos e realizações.

## **AGRADECIMENTOS**

Muito tenho a agradecer...

Ao Grande Arquiteto do Universo que me inspira, intuindo-me para que eu possa, cotidianamente, desbastar a pedra bruta que há em mim;

Ao meu orientador José Wallace Barbosa do Nascimento, pelos indispensáveis ensinamentos, transferência de conhecimento e ajuda técnica imprescindível para realização desta tese;

À Professora Vera Solange de Oliveira Farias, pelas orientações técnicas e por compartilhar o seu conhecimento e sua experiência tão relevante para a execução deste trabalho;

Ao amigo José Geraldo Baracuchy, por ter acreditado em meu potencial e pelo apoio imprescindível para a realização da caminhada deste o mestrado até o doutorado;

Aos professores que compõem o Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola-PPGEAg/UFCG;

Aos membros da banca examinadora, que nutrido de boa vontade e esforço prestaram importante colaboração;

Aos membros do Laboratório de Construções Rurais e Ambientais (LACRA), pela disponibilidade e boa vontade ajudando-me na execução dos ensaios, destacando os servidores Joselito Araújo (técnico laboratorial) e Thiago Lira (técnico laboratorial em eletrônica). Da mesma forma, minha gratidão ao servidor Renato Correia dos Santos, da Unidade Acadêmica de Matemática da UFCG;

Aos meus pais, esposa, filhos, irmãos e amigos, pelo permanente incentivo e apoio que sempre me sopraram como energia nas horas difíceis e criaram um ambiente de conforto para o aprendizado;

Aos amigos do mestrado e do doutorado da PPGEAg/UFCG, grandes colaboradores na construção de um trabalho edificante.

## RESUMO

O revestimento externo da alvenaria é um elemento de importância elevada para edificações, exercendo função relativa à estanqueidade, ao acabamento, ao isolamento térmico e acústico e a resistência mecânica, dentre outros. No entanto, é necessário um olhar mais atento em relação à função de isolamento térmico que o revestimento de alvenaria pode exercer. Esta pesquisa teve como objetivo avaliar a influência do revestimento de argamassas alternativas, contendo borracha reciclada de pneu, no desempenho térmico de alvenaria, procedendo, também, estudos relativos à caracterização físico-mecânica destes compósitos alternativos. Inicialmente, foi confeccionada a argamassa de referência no traço 1:5 (cimento: areia), e posteriormente, o agregado natural foi, parcialmente, substituído por borracha reciclada de pneu nos percentuais de 5, 10, 15, 20, 25%. Foram realizados os ensaios para caracterização física no estado fresco e endurecido (índice de consistência, densidade de massa e absorção de água por capilaridade) e caracterização mecânica (resistência à compressão axial, à tração por compressão diametral e à tração por flexão). Em ato contínuo, foram feitos experimentos para caracterização térmica da argamassa (inércia e condutividade térmica). Os resultados evidenciaram que a inclusão de borracha reciclada de pneu provoca redução da densidade de massa, no estado fresco e endurecido, bem como da absorção de água por capilaridade. Foi verificado também, redução das resistências mecânicas das argamassas alternativas contendo borracha de pneu. Quanto à análise de caracterização térmica, foi observado que os valores de coeficiente de condutividade térmica foram de 1,67; 1,47; 1,41; 1,35; 1,21; 1,12  $W.m^{-1}.K^{-1}$  para as argamassas contendo 0, 5, 10, 15, 20, 25%, respectivamente. Nesse sentido, pode-se observar que a condutividade térmica reduziu à proporção que ocorreu a inserção de borracha de pneu na argamassa, sendo que esta redução ficou na faixa entre 11,97 a 32,87%. Foi possível concluir que a borracha de pneu colabora para que as argamassas funcionem como bom isolante térmico, o que contribui para um aumento do conforto térmico dos ocupantes das edificações. Além disso, foi percebido que quanto maior a quantidade de borracha de pneu, melhor foi o desempenho térmico dos compósitos. Os resultados possibilitaram concluir que, argamassas contendo borracha de pneus inserem contribuição no revestimento de alvenaria, viabilizando seu uso na construção rural.

**Palavras-chave:** argamassa alternativa; conforto térmico; condutividade térmica; caracterização físico-mecânica.

## ABSTRACT

The external coating of the masonry is an element of high importance for buildings, exerting outstanding function related to sealing, finishing, thermal and acoustic insulation and mechanical resistance, among others. However, a closer look is required regarding the thermal insulation role that the wall covering can exert. The objective of this research was to evaluate the influence of the coating of alternative mortars containing recycled rubber tires on the thermal performance of masonry, and also carried out studies on the physical-mechanical characterization of these alternative composites. Initially, the reference mortar was made in the 1:5 trace (cement: sand), and later the natural aggregate was partially replaced by recycled rubber in the percentages of 5, 10, 15, 20, 25%, making possible the study of six traces of mortars. The tests were carried out for physical characterization in the fresh and hardened state (consistency index, mass density and water absorption by capillarity) and for mechanical characterization (resistance to axial compression, diametral compression traction and flexural tensile strength). Experiments were carried out for thermal characterization of the mortar (inertia and thermal conductivity). The results showed that the inclusion of recycled tire rubber causes a reduction in mass density in the fresh and hardened state, as well as the absorption of water by capillarity. It was also observed a strong reduction of the mechanical strength of the alternative mortars containing tire rubber. As for the thermal characterization analysis, it was found an inversely proportional relation between the coefficient of thermal conductivity and the amount of tire rubber in the mortar. Through this research, it was possible to conclude that the tire rubber helps the mortars to function as a good thermal insulation, which contributes to an increase in the thermal comfort of the occupants of the buildings. Observed that the greater the amount of tire rubber, the better the thermal performance of the composites. The results make it possible to conclude that mortars, containing tire rubber, make a valuable contribution to the masonry coating, making it possible to use it in rural construction.

Keywords: alternative mortar; thermal comfort; thermal conductivity; physical-mechanical characterization.

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1	Taxa de transferência de calor.....	51
Equação 2	Lei de resfriamento de Newton.....	52
Equação 3	Balanço de energia.....	52
Equação 4	Igualdade do fluxo de energia térmica .....	53
Equação 5	Amortecimento térmico.....	56
Equação 6	Intervalo na curva da distribuição normal.....	58
Equação 7	Densidade de massa no estado fresco.....	70
Equação 8	Densidade de massa no estado endurecido .....	70
Equação 9	Absorção de água por capilaridade .....	72
Equação 10	Resistência à tração na flexão.....	73
Equação 11	Resistência à compressão.....	74
Equação 12	Resistência à tração por compressão diametral.....	76
Equação 13	Aplicação da Lei de Fourier.....	88
Equação 14	Cálculo coeficiente de condutividade térmica.....	88
Equação 15	Aplicação da Lei de resfriamento de Newton.....	89
Equação 16	Aplicação do princípio do balanço de energia .....	89
Equação 17	Desvio padrão das amostras.....	90
Equação 18	Função com dois parâmetros de ajustes.....	91

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1	Critério de classificação das argamassas.....	27
Quadro 2	Classificação por critério de densidade.....	40
Quadro 3	Caracterização físico-mecânica.....	67
Quadro 4	Mini paredes.....	79
Quadro 5	Classificação da densidade de massa do estado fresco.....	101
Quadro 6	Classificação de densidade de massa no estado endurecido.....	103
Quadro 7	Classificação da resistência à compressão das argamassas.....	106
Quadro 8	Classificação da resistência à tração na flexão das argamassas.....	112

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Coeficiente de correção aplicado no desvio padrão da amostra....	<b>58</b>
Tabela 2	Classificação do Coeficiente de Variação (CV).....	<b>59</b>
Tabela 3	Tratamentos/Composições das argamassas utilizadas (massa).....	<b>66</b>
Tabela 4	Composição granulométrica da areia.....	<b>93</b>
Tabela 5	Massa unitária e massa específica real da areia.....	<b>93</b>
Tabela 6	Composição granulométrica da borracha de pneu.....	<b>94</b>
Tabela 7	Massa unitária e massa específica real da borracha .....	<b>94</b>
Tabela 8	Índice de consistência. Composições das argamassas utilizadas .	<b>95</b>
Tabela 9	Absorção por capilaridade .....	<b>97</b>
Tabela 10	Densidade de massa dos compósitos no estado fresco.....	<b>99</b>
Tabela 11	Densidade de massa no estado endurecido .....	<b>102</b>
Tabela 12	Resistência à compressão axial .....	<b>104</b>
Tabela 13	Resistência à tração na compressão diametral .....	<b>108</b>
Tabela 14	Resistência à tração na flexão .....	<b>111</b>
Tabela 15	Valores de condutividade térmica do compósito .....	<b>115</b>
Tabela 16	Amortecimento e atraso térmico das mini paredes .....	<b>117</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Mesa de espalhamento.....	38
Figura 2	Distribuição de temperatura numa parede infinita.....	53
Figura 3	Curva da distribuição normal.....	57
Figura 4	Fluxograma dos trabalhos desenvolvidos nesta pesquisa.....	62
Figura 5	Areia natural e serie de peneiramento instalada em mesa vibratória.....	64
Figura 6	Desenvolvimento dos ensaios de consistência.....	69
Figura 7	Ensaio de absorção de água por capilaridade.....	72
Figura 8	Ensaio de resistência à tração na flexão.....	73
Figura 9	Ensaio de resistência à compressão.....	74
Figura 10	Esquema do ensaio de resistência à tração por compressão diametral.....	75
Figura 11	Ensaio de resistência à compressão diametral.....	76
Figura 12	Câmara de fluxo térmico (para inercia térmica) .....	78
Figura 13	Construção da parede com tijolo cerâmico de 8 furos.....	80
Figura 14	Distribuição dos sensores nas faces das mini paredes.....	81
Figura 15	Instalação dos sensores nas mini paredes.....	82
Figura 16	Amostra para ensaio de condutividade térmica.....	84
Figura 17	Câmara de fluxo térmica, sem placa de argamassa.....	85
Figura 18	Câmara de fluxo térmica, com placas e sensores.....	85
Figura 19	Câmara de fluxo térmica, com placa, sensores e silicone/isopor.....	85
Figura 20	Vista superior da câmara de fluxo térmico.....	86
Figura 21	Esquema de funcionamento do ensaio de fluxo térmico.....	87
Figura 22	Absorção de água por capilaridade.....	96
Figura 23	Diagrama de regressão para absorção de água por capilaridade.....	98
Figura 24	Densidade de massa dos compósitos no estado fresco.....	98
Figura 25	Diagrama de regressão para densidade estado fresco.....	100
Figura 26	Densidade de massa dos compósitos no estado endurecido.....	101
Figura 27	Diagrama de regressão para densidade estado endurecido.....	103
Figura 28	Resistência à compressão axial .....	104
Figura 29	Diagrama de regressão para resistência à compressão axial.....	106
Figura 30	Resistência à tração por compressão diametral .....	107

Figura 31	Rompimento de corpo de prova.....	<b>109</b>
Figura 32	Diagrama regressão. Resistência à tração na compressão diametral.....	<b>109</b>
Figura 33	Resistência à tração na flexão.....	<b>110</b>
Figura 34	Diagrama de regressão da Resistência à tração na flexão.....	<b>112</b>
Figura 35	Ensaio de Fluxo térmico para Tratamento TA_R (Referência).....	<b>113</b>
Figura 36	Ensaio de Fluxo térmico para Tratamento TAB_10 .....	<b>113</b>
Figura 37	Ensaio de Fluxo térmico para Tratamento TAB_15.....	<b>114</b>
Figura 38	Ensaio de Fluxo térmico para Tratamento TAB_20.....	<b>114</b>
Figura 39	Valor da Condutividade térmica dos tratamentos.....	<b>116</b>
Figura 40	Diagrama de regressão do coeficiente de condutividade térmica.....	<b>116</b>
Figura 41	Temperatura superficial da MP 0.....	<b>118</b>
Figura 42	Temperatura superficial da MP 10.....	<b>119</b>
Figura 43	Temperatura superficial da MP 15.....	<b>120</b>
Figura 44	Temperatura superficial da MP 20.....	<b>121</b>

## LISTA DE ABREVIATURAS/SÍMBOLOS/UNIDADES/SIGLAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANIP	Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
NBR	Norma Brasileira
SVVE	Sistema de vedação vertical externo
PROTOLAB	Laboratório de Propriedades Termo-físicas e Prototipação
LACRA	Laboratório de Construções Rurais e Ambiente
SIGD	Sistema Informatizado de Gestão de Dados
$\mu$	Amortecimento térmico
$k$	Coefficiente de condutividade térmica por condução
$H$	Coefficiente médio de transferência de energia térmica da convecção
$q_{\text{cond}}$	Taxa de transferência de calor por condução
$q_{\text{cvcc}}$	Taxa de transferência de calor por convecção
$\Sigma$	Desvio padrão da amostra
$V_{\text{média}}$	Valor da média calculada
$r^2$	Coefficiente de determinação
$D$	Densidade de massa no estado fresco
$\rho$	Densidade de massa aparente no estado endurecido
$A_{\text{cap}}$	Absorção de água por capilaridade
$R_c$	Resistência à compressão axial
$R_{t,c}$	Resistência à tração por compressão diametral
$R_{t,f}$	Resistência à tração na flexão
$r_{a/c}$	Relação água e cimento
C.V.	Coefficiente de variação
$DAM_{ax}$	Desvio absoluto máximo
A	Área normal ao fluxo de calor
MP_0	Mini parede com 0% de borracha reciclada de pneu
MP_10	Mini parede com 10% de borracha reciclada de pneu
MP_20	Mini parede com 20% de borracha reciclada de pneu
MP_25	Mini parede com 25% de borracha reciclada de pneu

TA_R	Tratamento de argamassa de referência
TAB_5	Tratamento de argamassa com 5% de borracha de pneu
TAB_10	Tratamento de argamassa com 10% de borracha de pneu
TAB_15	Tratamento de argamassa com 15% de borracha de pneu
TAB_20	Tratamento de argamassa com 20% de borracha de pneu
TAB_25	Tratamento de argamassa com 25% de borracha de pneu
°C	Grau Celsius
mm	Milímetro
m	Metro
m <sup>2</sup>	Metro quadrado
g.cm <sup>-2</sup>	Gramas por centímetro quadrado
g.cm <sup>-3</sup>	Gramas por centímetro cúbico
MPa	Mega Pascal
W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup>	Watts por metro Kelvin
W. m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup>	Watts por metro quadrado por Kelvin

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	19
1.1. Relevância e justificativa.....	21
1.2. Objetivos.....	22
1.2.1. Objetivo geral.....	22
1.2.2. Objetivos específicos.....	22
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	24
2.1. Conforto térmico.....	24
2.2. Argamassa de revestimento de alvenaria.....	25
2.2.1. Aspectos gerais.....	25
2.2.2. Composição das argamassas.....	26
2.2.3. Classificação das argamassas.....	27
2.2.4. Propriedades das argamassas.....	27
2.3. Borracha de pneus.....	28
2.3.1. Aspectos gerais.....	28
2.3.2. Produção e descarte de pneus.....	29
2.3.3. Reciclagem de borracha de pneus.....	30
2.4. Utilização de borracha reciclada de pneu na construção civil.....	31
2.4.1. Pesquisa relativa à aplicação da borracha de pneu em argamassas.....	32
2.4.2. Diferentes aplicações da borracha de pneu na construção civil.....	34
2.5. Caracterização física e mecânica.....	36
2.5.1. Caracterização física dos agregados.....	36
2.5.2. Caracterização física e mecânica da argamassa.....	37
2.6. Caracterização térmica.....	46
2.6.1. Transferência de calor .....	46
2.6.2. Propriedades térmicas do material.....	47
2.7. Ensaio de fluxo térmico.....	50
2.7.1. Ensaio de fluxo térmico para cálculo do coeficiente de condutividade.....	50
2.7.2. Pesquisa utilizando ensaio de fluxo térmico .....	54
2.7.3. Ensaio de fluxo térmico para cálculo de inércia térmica.....	55
2.8. Análise estatística dos dados.....	56
2.8.1. Medidas de dispersão.....	57
2.8.2. Ajustes de curvas (ou regressão).....	59

3. MATERIAL E MÉTODOS.....	<b>61</b>
3.1. Planejamento para caracterização dos materiais e das argamassas.....	<b>63</b>
3.1.1. Caracterização dos componentes da argamassa.....	<b>63</b>
3.1.2. Definição da preparação das argamassas e dos corpos de prova.....	<b>65</b>
3.1.3. Definição da Caracterização física e mecânica das argamassas.....	<b>66</b>
3.1.4. Definição da Caracterização térmica da argamassa.....	<b>67</b>
3.2. Desenvolvimento de experimentos para caracterização físico-mecânica.....	<b>67</b>
3.2.1. Realização dos experimentos para caracterização física.....	<b>68</b>
3.2.2. Realização dos experimentos para caracterização mecânica.....	<b>72</b>
3.3. Desenvolvimentos de experimentos para caracterização térmica.....	<b>76</b>
3.3.1. Realização dos experimentos para cálculo de inércia térmica.....	<b>77</b>
3.3.2. Realização de ensaio para cálculo do coeficiente de condutividade.....	<b>83</b>
3.4. Análise estatística dos dados.....	<b>89</b>
3.4.1. Medidas de dispersão.....	<b>90</b>
3.4.2. Ajustes de curvas (ou regressão) .....	<b>91</b>
3.4.3. Comparação das médias.....	<b>91</b>
4. RESULTADOS E ANÁLISE.....	<b>92</b>
4.1. Ensaio para caracterização de agregados.....	<b>92</b>
4.1.1. Caracterização da areia .....	<b>92</b>
4.1.2. Caracterização da borracha reciclada de pneus .....	<b>94</b>
4.2. Caracterização física da argamassa.....	<b>95</b>
4.2.1. Índice de consistência.....	<b>95</b>
4.2.2. Absorção de água por capilaridade .....	<b>96</b>
4.2.3. Densidade de massa no estado fresco.....	<b>98</b>
4.2.4. Densidade de massa no estado endurecido .....	<b>101</b>
4.3. Caracterização mecânica da argamassa.....	<b>103</b>
4.3.1. Resistência à compressão axial .....	<b>103</b>
4.3.2. Resistência à tração por compressão diametral.....	<b>107</b>
4.3.3. Resistência à tração na flexão.....	<b>110</b>
4.4. Caracterização térmica da argamassa.....	<b>112</b>
4.4.1. Condutividade térmica da argamassa.....	<b>112</b>
4.4.2. Inercia térmica da mini-parede.....	<b>117</b>
5. CONCLUSÃO.....	<b>123</b>

6. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	<b>125</b>
7. REFERÊNCIAS.....	<b>126</b>

## 1. INTRODUÇÃO

O sistema de vedação vertical externo (SVVE) é um elemento de grande importância para a construção de habitações rurais, sendo alvo de muita atenção das moradias do país. Esse sistema de vedação, comumente denominado de alvenaria, sendo usualmente composto por tijolos, confeccionados por diversos tipos de material, a exemplo de argila, de cimento, dentre outros. Os tijolos são assentados utilizando argamassa à base de cimento e podem ser devidamente recobertos de outra argamassa, a de revestimento, visando proporcionar um melhor atendimento das funções da habitação. Nos dias atuais, um revestimento de alvenaria convencional é feito com argamassa, também conhecida como reboco ou massa única, confeccionado à base de aglomerantes (como cimento e cal hidratada) e agregados (como areia e saibro).

As argamassas de revestimento (externas e internas) desempenham função relevante em favor do comportamento da alvenaria, considerando a necessidade de atender as ações mecânicas e as que são voltadas para o conforto dos moradores da habitação. Dentre as principais funções da argamassa de revestimento de alvenaria pode-se apontar: proteção da alvenaria e da estrutura referente a resistência; estética; isolamento térmico; isolamento acústico e estanqueidade à água.

A função de isolamento térmico da argamassa de revestimento está diretamente relacionada ao atendimento das exigências de conforto térmico dos moradores e usuários da habitação. Um sistema de vedação vertical externo (alvenaria externa) com baixa condutividade térmica favorece para que a temperatura do ar no ambiente interno se estabeleça na faixa dos limites aceitáveis.

No entanto, em geral, a argamassa de revestimento de alvenaria externa não tem oferecido auxílio destacado no que diz respeito ao atendimento das condições de conforto térmico, aspecto importante para as habitações. Tal fato requer maior atenção dos pesquisadores e profissionais da área quanto a função de desempenho térmico da alvenaria e do seu revestimento. Com isso, pode-se inferir que a existência de habitações em incontestável condição de desconforto térmico decorre, dentre outros fatores, da elaboração de edificação com tipologia arquitetônica inadequada e da ausência de material com característica de isolamento térmico.

Observa-se grande quantidade de edificações sendo construídas com sistema de vedação vertical (alvenaria) sem a apropriada capacidade de isolamento térmico, gerando problemas de conforto ambiental (pela perda ou ganho excessivo de energia térmica). No Nordeste brasileiro, por exemplo, caracterizado por clima predominantemente quente seco e quente úmido, o resfriamento dos ambientes internos das construções é um tema que carece de estudos que visem definir materiais e projetos alinhados com conforto térmico. Dessa forma, deve-se buscar a aplicação de materiais e técnicas de resfriamento passivo uma vez que evitam ganho de energia térmica advinda das cargas de radiação solar, incidentes sobre a alvenaria da habitação rural.

Sabe-se que os ambientes classificados como de desconforto térmico podem causar grandes danos à saúde e, em casos extremos, levar a morte, bem como trazer prejuízos à produtividade do ser vivo. O desconforto térmico de edificações provoca influência negativa no desempenho de atividades, além de interferir no grau de satisfação dos moradores e usuários.

Por outro lado, tem-se observado a incorporação paulatina de novos agregados, denominados de alternativos, que tem como um de seus objetivos a melhoria da capacidade de isolamento térmico da argamassa de revestimento e, conseqüentemente, menor condução térmica através da alvenaria. Dessa forma, introduz-se melhorias no comportamento térmico, sem comprometer aspectos relevantes relacionados a caracterização físico-mecânica e a operacionalidade. Um desses agregados alternativos pode ser borracha reciclada de pneus, a ser utilizada no formato de partículas arredondadas e/ou alongadas.

A utilização da borracha reciclada de pneus, como elemento componente da argamassa de revestimento, pode apresentar um duplo benefício a população. Primeiro porque pode promover a melhoria das condições de conforto térmico das habitações, uma vez que pode contribuir para o aumento da função de isolamento térmico do compósito, ao reduzir a capacidade de condução de calor através da alvenaria. Segundo por interferir positivamente

em questões ambientais, visto que os descartes indevidos dos pneus de borracha causam grandes problemas ao meio ambiente e a saúde humana, já que as peças inservíveis são lançadas de forma inadequada em terrenos, rios e córregos, e acabam servindo de abrigo e proliferação de insetos e animais nocivos à saúde.

Diante do exposto, este trabalho propõe-se a realizar pesquisa para avaliar o desempenho térmico de argamassas de revestimento contendo borracha reciclada de pneus, analisando também, as características físico-mecânicas dos compósitos.

### **1.1. Relevância e justificativa**

A utilização de resíduos de borracha de pneus na forma de materiais e elementos para a construção civil pode representar uma alternativa positiva em inúmeros casos. Dentre os aspectos positivos da aplicação da borracha reciclada de pneus nas moradias, pode ser citada a melhoria do isolamento térmico das argamassas, favorecendo o aumento da boa condição de conforto térmico interno da habitação rural. Deve-se destacar que as melhorias como isolante térmico não devem comprometer o desempenho físico-mecânico dos compósitos.

A importância deste estudo é justificada pelo fato que a análise, com afinco, de alguns materiais alternativos (dotado de melhor capacidade de isolamento térmico) é um sólido caminho para contribuição positiva voltada ao bom desempenho térmico das habitações, especialmente nas regiões de temperaturas elevadas. Na busca em oferecer habitações com maior conforto para os moradores exige a indispensável e cuidadosa observação de aspecto de conforto térmico de edificações, analisando sua influência no bem-estar dos moradores e usuários da habitação rural.

O assunto estudado na presente pesquisa está relacionado com a aplicação de materiais que possam contribuir para melhoria da propriedade de isolamento térmico, observando-se a menor capacidade de condução de energia térmica através da argamassa. A análise da condutividade térmica, do amortecimento e do atraso térmico realizado pelo sistema de vedações verticais permite avaliar a contribuição de materiais alternativos, a exemplo da borracha de pneus inservíveis e triturados.

Assim sendo, a incorporação da borracha reciclada de pneu na argamassa pode melhorar a capacidade de isolamento térmico do compósito de revestimento externo da alvenaria, contribuindo para a melhoria do desempenho térmico do sistema de vedação vertical externo. Tal hipótese atesta a relevância do assunto e fundamenta a realização desta pesquisa.

De forma complementar a estratégia de utilizar materiais de baixa condutividade térmica na alvenaria (para reduzir a troca de calor) deve-se aproveitar a ventilação cruzada nos ambientes, resultado da manipulação de abertura e fechamento das janelas, cobogós e bandeiras de portas. Tal combinação de estratégia exerce influencia muito positiva nas variáveis climáticas, durante os diversos horários do dia, favorecendo o conforto térmico dos ocupantes e usuários das habitações rurais.

A utilização da borracha de pneu promove também, a redução do impacto ambiental provocado pelos pneus inservíveis e abre espaço para um novo nicho de mercado, gerando nova fonte de renda. A reciclagem de pneus, envolvendo a preocupação ambiental gera para a sociedade uma série de benefícios, a exemplo a redução do volume de matérias-primas extraídas da natureza, do consumo de energia na produção de materiais e da emissão de poluentes no meio ambiente. Um dos desafios atuais para mitigar os danos ambientais causados por estes resíduos, consiste em aplicar as alternativas tecnológicas para o aumento da utilização dos pneus, fomentando a reutilização, com novo formato, dos pneus que teoricamente não prestam.

Um estudo que possa envolver o aproveitamento de borracha de pneu é apoiado também mediante ao fato de que o emprego de alguns resíduos sólidos evoluiu bastante nas últimas décadas. No entanto, materiais tais como os pneus inservíveis e demais derivados da borracha ainda continuam sendo dispostos inadequadamente no meio ambiente em grande quantidade. O incremento na construção civil de materiais considerados ecologicamente corretos e um melhor ajustamento dos processos produtivos representam um imperativo ambiental visando a redução de problemas no mundo contemporâneo.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo Geral**

Desenvolver uma argamassa de revestimento com adição de resíduos de pneu reciclado, apresentando qualidade que se prestam ao isolamento térmico se mantendo eficiente quanto as características físicas e mecânicas.

### **1.2.2. Objetivos Específicos**

- ✓ Realizar caracterização física, no estado fresco, de argamassas de revestimento tipo referência e alternativas, contendo borracha de pneu, a partir de estudo das propriedades de densidade de massa e índice de consistência;
- ✓ Realizar a caracterização física e mecânica, no estado endurecido, de argamassas de referência e alternativas, contendo borracha de pneu, a partir de estudos das propriedades de densidade de massa, absorção por capilaridade, resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral e resistência à tração na flexão;
- ✓ Avaliar, comparativamente, o coeficiente de condutividade térmica das argamassas de revestimento de alvenaria contendo borracha de pneu com argamassa de referência;
- ✓ Avaliar, comparativamente, a inércia térmica de paredes revestidas de argamassa de referência com argamassas contendo borracha de pneu, a partir dos estudos de amortecimento e atraso térmico.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Conforto térmico

O organismo humano experimenta a sensação de conforto térmico quando, sem recorrer a nenhum mecanismo de termorregulação, perde para o ambiente o calor produzido pelo metabolismo. No caso de frio intenso, por exemplo, a termorregulação pode ocorrer através da vasoconstrição e do eriçar dos pêlos. Por outro lado, no caso de calor intenso, o corpo procura manter sua temperatura através do suor, vasodilatação e ingestão de líquidos gelados, entre outras maneiras (MAIA & GONÇALVES, 2002). Segundo a NBR 15.220 (ABNT, 2005), conforto térmico é a satisfação psicofisiológica de um indivíduo com as condições térmicas do ambiente.

A sensação de desconforto, pelo calor ou pelo frio, pode ser causada quando o balanço térmico não é estável, ou seja, quando há diferenças entre o calor produzido pelo corpo e o calor trocado com o ambiente (LAMBERTS *et al.*, 2005). Frota & Schiffer (2005) atestam que as condições de conforto térmico estão relacionadas a uma série de variáveis. A partir das variáveis climáticas e de outras variáveis (como atividade desenvolvida pelo indivíduo e sua vestimenta) vem sendo desenvolvida uma série de estudos que procuram determinar as condições de conforto térmico e os vários graus de conforto ou desconforto por frio ou por calor.

Para Hollmuller *et al.* (2005), a redução no uso ou eliminação do ar-condicionado pode ser atingida usando estratégias passivas ou de baixo consumo para resfriamento. Como alternativa para o ar-condicionado, um projeto adequado para a envoltória da edificação (uso de proteções solares e isolamento térmico da alvenaria, dentre outros) pode ajudar a manter a edificação na zona de conforto (ambientes não condicionados) ou a reduzir a carga de

resfriamento (usando ar-condicionado). Beraldo (2006) argumenta que a temperatura de máximo conforto está relacionada com as condições de neutralidade térmica e que não se pode falar de uma temperatura de conforto, mas de uma zona de conforto térmico.

Lyra (2007) afirma que, conforto ambiental é um processo resultante de fenômenos de transporte de calor, o qual se encontra relacionado com as propriedades físicas dos materiais, dentre eles, a condutividade térmica. Para o autor, o desconforto térmico, quer seja por frio ou por calor, tem a capacidade de influenciar no desempenho de atividades e grau de satisfação dos usuários de determinado ambiente, podendo levar até às condições extremas (afetar a saúde e levar à morte). Do ponto de vista fisiológico, a sensação de conforto térmico se daria, portanto, quando o corpo perdesse ou ganhasse calor sem ativar os mecanismos termorreguladores, ou seja, em um ambiente de neutralidade térmica.

Graças (2010) aponta que uma pessoa está termicamente confortável quando não sente calor nem frio. O conforto térmico está conectado com as trocas de calor existentes entre o corpo humano e o ambiente, tais como convecção e condução. Nóbrega & Lemos (2011) elucidam que o conceito de conforto térmico não é simples. Além de compreender os fatores físicos naturais, faz-se necessário entender também, o sistema termorregulador de cada indivíduo. Conforme descreve Pétalas (2015), diversos índices de conforto térmico desenvolvidos nas últimas décadas, auxiliam na descrição e na quantificação do meio térmico humano, além do efeito das condições de troca de calor entre o corpo humano e o ambiente.

Diversos índices foram desenvolvidos buscando determinar o conforto térmico em um só parâmetro, que possa englobar a percepção de bem estar do ser humano em relação às variáveis climáticas e/ou atividades individuais do homem. Rocha (2016) aponta diversos índices térmicos elaborados para o homem, tais como: índice de desconforto; índice de Temperatura de Bulbo Úmido e do Globo; índice de Temperatura e Umidade; Voto Médio Predito; Percentual de Pessoas Insatisfeitas.

## **2.2. Argamassas de revestimento de alvenaria**

### *2.2.1. Aspectos gerais*

Segundo a NBR 13.281 (ABNT, 2005), argamassa é a mistura homogênea de agregado(s) miúdo(s), aglomerante(s) inorgânico(s) e água, com propriedades de aderência e endurecimento, podendo ser dosada na obra ou em instalação própria.

A NBR 13.529 (ABNT, 2013) atesta que a argamassa de revestimento promove o recobrimento de uma superfície, sendo apto a receber acabamento decorativo ou constituir-se em acabamento final. Esta norma classifica o revestimento quanto ao ambiente de exposição em: contato com o solo; externo; interno. Atesta também, que a argamassa termo-isolante é preparada com agregado leve ou aditivo aerador, cuja estrutura confere condutividade térmica menor do que a das argamassas comuns.

### 2.2.2. *Composição das argamassas*

Na composição da argamassa, o aglomerante mais usado no nosso país é o cimento Portland. Para Castro *et al.* (2017), o Brasil dispõe de oito tipos básicos de cimento Portland normatizados, podendo chegar a mais de vinte tipos quando considerados os subtipos e classes de resistência.

Lopes Neto (2017) apresenta classificação dos cimentos brasileiros quanto à composição: (1) CP Comum (*CP I*); (2) CP comum com adição (*CP I – S*); (3) CP Composto (*CP II*) subdividido em composto: com escória; com filer; com pozolana; (4) CP de alto forno (*CP III*); (5) CP pozolânico (*CP IV*); (6) CP de alta resistência inicial/resistente a sulfatos (*CP V – ARI/RS*); (7) CP branco estrutural (*CP B estr.*); (8) CP branco não estrutural (*CP B não estr.*). Ainda segundo o autor, o cimento Portland composto com pozolana (*CP II-Z*) contém entre 76 a 94% de clínquer e gesso, 6 a 14% de material pozolânico e 0 a 10% de material carbonático.

A NBR 7.211 (ABNT, 2005) descreve que agregado miúdo é classificado por conjunto de grãos que passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 150 µm. De acordo com Lopes Neto (2017), agregados são todos os materiais particulados (partículas/grãos), normalmente de origem mineral, quimicamente inertes, que podem ser utilizados na composição de argamassas e concretos. A função principal dos agregados é ajudar a reduzir custos, por serem materiais de baixo preço e abundantes no meio, além de serem de fácil extração e produção.

### 2.2.3. *Classificação das argamassas*

Nakakura & Cincotto (2004) atestam que o objetivo da classificação das argamassas é especificar requisitos e critérios que possam estar associados as condições de uso e não somente para controle de uniformidade. Os dados constituem-se em parâmetros a serem

levados em conta em estudos de desempenho da argamassa nos diversos sistemas em que ela é um dos constituintes.

A NBR 13.281 (ABNT, 2005) estabelece classificação das argamassas de revestimento considerando as misturas de argamassas para assentamento e para revestimento de paredes e tetos. Como requisitos de classificação estão nela especificados: resistência a compressão; densidade de massa aparente (no estado endurecido); densidade de massa (no estado fresco); resistência à tração na flexão, dentre outros.

Carasek (2007) apresenta classificação das argamassas com relação a vários critérios, conforme Quadro 1 apresentado abaixo:

**Quadro 1-** Critério de classificação das argamassas.

<b>Critério de classificação</b>	<b>Tipo</b>
Quanto à natureza do aglomerante	Argamassa aérea Argamassa hidráulica
Quanto ao tipo de aglomerante	Argamassa de cal Argamassa de cimento Argamassa de cimento e cal Argamassa de gesso Argamassa de cal e gesso
Quanto ao número de aglomerantes	Argamassa simples Argamassa mista
Quanto à consistência da argamassa	Argamassa seca Argamassa plástica Argamassa fluida

Fonte: Carasek (2007).

#### 2.2.4. Propriedades da argamassa

As argamassas contendo cimento Portland adquirem resistências elevadas com rapidez e desenvolvem, sem problemas, resistências adequadas para sua utilização em argamassa de assentamento e revestimento. No entanto, não se pode ajustar a resistência requerida para argamassa simplesmente variando a proporção de cimento e areia, isto porque misturas pobres não possuem trabalhabilidade adequada, enquanto as misturas ricas são antieconômicas (DUBAJ, 2000).

Carasek *et al.* (2011) apontam que o emprego de revestimentos de argamassa no Brasil é uma das práticas mais comuns em obras de edifícios de multipavimentos, sendo utilizados para receber o acabamento em pintura ou como emboço na aplicação do acabamento de peças cerâmicas. Os pesquisadores elucidam ainda, que o revestimento de argamassa de alvenaria

para satisfazer as suas principais funções, algumas propriedades tornam-se essenciais, a saber: trabalhabilidade (especialmente consistência, plasticidade e adesão inicial); retração; aderência; permeabilidade à água; resistência mecânica; dentre outros.

Para Cintra (2013), a argamassa de revestimento juntamente com os componentes de vedação vertical exterior, desempenha um importante papel como parte integrante do edifício. No entanto, a argamassa de revestimento tem colaborado pouco com as necessidades de conforto térmico, tão importante nas edificações.

Melhorar o desempenho térmico de paredes externas com suporte de carga em edifícios residenciais pode ser a maneira mais eficaz de reduzir o consumo de energia para fins de ar condicionado no setor de habitação (NAJIM, 2014).

Martins *et al.* (2016) observam que pesquisas em dosagens de argamassas têm se baseado na utilização de materiais não convencionais, visando, principalmente, a sustentabilidade ambiental e a obtenção de desempenhos especiais. Argamassas dosadas com diferentes composições e traços alteram as propriedades de massa aparente e condutividade térmica, afetando o desempenho termo energético dos edifícios.

Rocha (2018) descreve que os consumidores de imóveis habitacionais estão cada vez mais exigentes e criteriosos na escolha de produtos que sejam ecologicamente corretos. Neste sentido, os revestimentos naturais ganham espaço no mercado da construção por conta de seus diferenciais de sustentabilidade. Conforme Prado *et al.* (2018), os Sistemas de Vedação Vertical Externo (SVVE) devem manter suas características de desempenho, mesmo quando solicitadas a intensos fatores agressivos. Na maioria dos casos, a durabilidade dos SVVE terá como principal fator agressivo as condições climáticas do local.

## **2.3. Borracha de pneus**

### *2.3.1. Aspectos gerais*

Werlang & Silveira (2013) afirmam que os pneumáticos fazem parte do nosso cotidiano há mais de um século e que são considerados itens imprescindíveis para a sociedade contemporânea. Os pneumáticos tiveram sua origem no século XIX e passaram por muitas fases de desenvolvimento, antes de se apresentarem como os tipos que são conhecidos hoje.

Conforme a Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos (ANIP), por volta do ano 1830, Charles Goodyear realizou diversos experimentos que confirmaram que a borracha cozida à alta temperatura mantinha suas condições de elasticidade no frio ou no calor.

Descobria-se então, o processo de vulcanização da borracha que, além de dar forma ao pneu, aumentou a segurança nas freadas e diminuiu as trepidações nos carros. Quinze anos depois, os irmãos Michelin patentearam o pneu para fins automobilísticos (ANIP, 2018).

A Resolução do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), Nº 416 de 30 de setembro de 2009 (CONAMA, 2009), estabelece uma classificação de pneus ou pneumático, a saber: novo (nunca foi utilizado para rodagem); reformado (foi submetido a algum tipo de processo industrial com o fim específico de aumentar sua vida útil de rodagem em meios de transporte, tais como recapagem, recauchutagem ou remoldagem); inservível (não mais se presta para o processo de reforma que permita condição de rodagem adicional).

Cintra (2013) esclarece que a borracha de pneu tem baixa condutividade térmica, na ordem de  $0,25 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ , e acrescenta que na argamassa contendo borracha de pneus usados, bolhas de ar se acumulam na superfície das partículas de borracha, levando às baixas condições de transferência de calor e o aumento na capacidade de isolamento térmico. Por sua vez, a PROTOLAB (2019) atesta que a condutividade térmica da borracha varia entre  $0,17$  a  $0,30 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ .

De acordo com Faria (2015), o pneu veicular é composto de camadas de borracha ajustadas a um aro e têm o objetivo de amortecer o contato entre o veículo e a via sobre a qual trafega. Fios de aço são embutidos no talão, que se ajusta ao aro da roda, enquanto uma manta de tecido de nylon reforça a carcaça. A pesquisadora acrescenta que a borracha natural representa entre 30 e 40% do peso de um pneu de caminhão e entre 15 e 20% de um pneu de carro de passeio. Afirma ainda, que os fabricantes de pneus consomem aproximadamente 70% da produção mundial de borracha natural.

### 2.3.2. *Produção e descarte de pneus*

No Brasil, foi produzido em 2016, 67,8 milhões de pneus, o que corresponde a um aumento em torno de 20% em relação a produção de 2006 (ANIP, 2018). Esses números representam um aporte significativo a economia do nosso país, bem como a viabilidade do modal mais representativo, o transporte rodoviário.

Em linha oposta aos benefícios, frente a grande produção dos pneumáticos, observam-se os problemas relativos ao seu resíduo. Para Silva *et al.* (2012), os resíduos de borracha oriundos das indústrias de pneus são fontes de poluição ambiental e desperdício de matéria-prima com boas propriedades e alto valor agregado.

Consta na Resolução CONAMA N° 416/2009 (CONAMA, 2009) a vedação da disposição final de pneus no meio ambiente, tais como o abandono ou lançamento em corpos de água, terrenos baldios ou alagadiços, em aterros sanitários e queima a céu aberto. A Resolução determina também, a prevenção à degradação ambiental causada por pneus inservíveis e sua destinação adequada ambientalmente.

Para Alves *et al.* (2016), os resíduos de pneus necessitam de tratamento especial, pois, quando enterrados inteiros, sua forma facilita o acúmulo de gases provenientes da decomposição dos demais resíduos e em caso de afloração à superfície proporciona abrigo para proliferação de doenças. Para um destino adequado, deve-se buscar o reaproveitamento dos pneus servíveis pelos processos de reforma para reutilização dos pneus (por recapagem, recauchutagem ou remoldagem). Por sua vez, a reciclagem se aplica quando o pneu é considerado inservível.

### 2.3.3. *Reciclagem da borracha de pneus*

Cimino & Zanta (2005) afirmam que a minimização de resíduos sólidos consiste num conjunto de práticas que possibilitam: reduzir a extração de recursos naturais e a geração de resíduos; maximizar a vida útil de áreas destinadas à disposição final de resíduos; ampliar a vida útil dos produtos. No que concerne aos pneumáticos inservíveis, observa-se que as estratégias de minimização associadas a gestão do produto envolvem: redução na fonte (ampliando a vida útil do produto, por meio de melhoria de técnicas de manufatura, dentre outros); reutilização (na recuperação do pneu usado, por meio de recapagem, recauchutagem ou remoldagem, bem como um novo uso para os pneus inservíveis inteiros, como recifes artificiais, quebra-mares, flutuantes, playgrounds, elementos estruturais, cercas rurais, entre outros usos); reciclagem (reinserindo o pneu inservível como matéria-prima para novos produtos).

No que se refere à questão envolvendo reciclagem dos pneus e de acordo com Lagarinhos & Tenório (2008), o processo de reciclagem de borracha é tão antigo quanto o próprio uso da borracha na indústria. Ainda segundo os autores, no ano de 1909, em Heipizig na Alemanha, havia a trituração e a separação da borracha de vários artefatos. Em 1960, a borracha reciclada era fornecida para as indústrias de artefatos de borracha. Uma das grandes dificuldades encontradas pelas empresas que trituram os pneus é o corte da malha de aço de pneus radiais, além dos talões. Os pneus convencionais são mais fáceis de serem triturados.

Motta (2008) afirma que os pneus inservíveis podem seguir 3 (três) caminhos: os pneus convencionais são destinados para as empresas que realizam a laminação e transformação da borracha em artefatos diversos (solados, cintas de sofá, tapetes para carros etc.); os pneus radiais são triturados e encaminhados para empresas produtoras de cimento (para queima nos fornos de clínquer); os pneus, em geral, podem ser encaminhados para empresas regeneradoras de borracha, que os transformam em pó de borracha.

Libera *et al.* (2012) realizaram pesquisa para implantação de empresa de reciclagem para resíduo sólido tipo pneus inservíveis, caracterizando sua natureza exploratória. O objetivo era proporcionar maior familiaridade com os processos de reciclagem desse tipo de pneu, bem como a construção e proposição dos parâmetros operacionais. Concluíram que uma recicladora apresenta-se como alternativa viável por apresentar lucro e trazer benefícios ambientais.

Cintra (2013) aponta que existem hoje, empresas que reciclam todos os 3 (três) componentes dos pneus, ou seja, a borracha, as ligas de aço e as fibras sintéticas. Na operação de reciclagem, os fios e as fibras de aço são removidos, a borracha passa por diversas etapas de moagem e trituração gerando uma gama de produtos desde um pó mais grosso até pó-fino, sendo então limpos, embalados e vendidos para vários consumidores.

Lima (2016) informa que no Brasil e no mundo busca-se a utilização de resíduos para evitar/minimizar os problemas ambientais. Diversos estudos foram desenvolvidos sobre a utilização de resíduos na construção civil, contribuindo para a transformação de problemas ambientais em materiais de construção civil.

## **2.4. Utilização de borracha reciclada de pneu na construção civil**

Dentre as várias técnicas aplicadas para a mitigação da disposição final da borracha de pneus, alguns estudos apontam o setor da construção civil como alternativa viável, podendo os fragmentos de pneus ser utilizados como agregados do concreto (Amaral, 2012).

### *2.4.1. Pesquisas relacionadas à aplicação da borracha de pneu em argamassas*

Diversos trabalhos experimentais foram realizados, para determinação das propriedades de argamassas contendo borracha reciclada de pneu. Tais trabalhos apresentam semelhanças com a pesquisa realizada para esta tese. A seguir são citados alguns destes experimentos.

Meneguini (2003) desenvolveu trabalho visando a determinação das principais propriedades mecânicas de argamassa de cimento e areia (no traço 1:5), e de argamassas alternativas confeccionadas a partir da substituição parcial de areia por pó de borracha de pneus usados, na quantidade correspondente a 2%, calculado em massa. Foram realizados ensaios para caracterizar a argamassa no estado fresco (índice de consistência) e no estado endurecido (absorção de água por capilaridade, compressão axial e diametral, módulo de elasticidade e desgaste por abrasão). Para o autor, a adição de borracha em granulometria semelhante à areia, promove a melhoria da trabalhabilidade, diminuição no peso das argamassas e redução da resistência mecânica.

Marques (2005) pesquisou algumas propriedades de concretos e argamassas, procedendo a substituição parcial do agregado miúdo, por resíduos de borracha de pneus provenientes do processo de recauchutagem. As propriedades estudadas foram: resistência à compressão, resistência à tração, absorção de água e índice de consistência. A borracha de pneu, depois de peneirada, foi tratada com solução saturada de hidróxido de sódio comercial na proporção de 1:1. Os ensaios foram realizados nas idades de 7, 28, 56 e 90 dias.

Ferreira (2009) realizou experimentos para caracterização mecânica e térmica, de argamassas com fibras de borracha de pneus. Os estudos de amostras ocorreram no estado fresco (índice de consistência) e endurecido (absorção de água por capilaridade, resistência à compressão e à tração). Foi feita também, uma pesquisa para análise térmica da argamassa alternativa (condutividade e calor específico). O pesquisador trabalhou com mistura contendo pequenas proporções de borracha de pneu, teores de 2, 4 e 6%, em relação à massa de agregado. Analisando os resultados pode-se observar que a substituição da areia por um agregado, a exemplo da borracha, proporciona redução do peso da argamassa, além de promover mais eficiência no isolamento térmico, dificultando a condução térmica. Por outro lado, ocorreu a minimização da resistência à compressão, sendo este fato provocado pela ausência de aderência entre a matriz da pasta de cimento com as fibras de borracha.

Pedro *et al.* (2012), investigaram a viabilidade de argamassa contendo borracha de pneus a ser aplicada em revestimentos de paredes. Os resultados mostraram que a incorporação de partículas de borracha gera redução da resistência à compressão e a tração por flexão. Os pesquisadores apontaram também, que as partículas de borracha apresentam tendência para repelir a água.

Cintra (2013), produziu um estudo com o objetivo de avaliar a incorporação de borracha de pneu em argamassa leve, substituindo parcialmente a vermiculita e a areia, e analisando sua influência nas propriedades mecânicas e termo acústica da argamassa. A

autora não realizou pesquisa utilizando argamassa tendo, como agregado, apenas a areia e a borracha reciclada de pneus. Foi usada a borracha reciclada de pneu na forma de partículas com diâmetros de 1 e 4 mm. Os seus resultados permitiram concluir que a substituição citada, caracteriza nova contribuição na área de elementos construtivos sustentáveis e que, dentre as vantagens, consta a melhoria da resistência à compressão uniaxial e a resistência a aderência das argamassas leves. Foi observado, também, que a incorporação de borracha não afetou negativamente a trabalhabilidade, a aplicabilidade e o poder de cobertura das argamassas.

Canova *et al.* (2015), avaliaram argamassa de revestimento com resíduos de pneus inservíveis, produzida com cimento, cal virgem e areia (na proporção 1:1,5:9- em volume), com adição de pó de borracha moído (nas proporções de 6, 8, 10 e 12%- em volume de agregado). Na pesquisa foram avaliadas as seguintes propriedades: massa específica e a retenção de água (no estado plástico), a resistências à compressão axial, a resistência à tração por compressão diametral, o módulo de deformação estática e a absorção de água por imersão (no estado endurecido). Não foram feitos estudos relativos à caracterização térmica.

Pinto & Fioriti (2016), averiguaram sobre a produção de argamassas com incorporação de borracha de pneus em substituição parcial do agregado de origem natural. Foram estudadas três características de desempenho de argamassas de revestimento (densidade de massa aparente no estado fresco e no estado endurecido, absorção de água por capilaridade e perda de água por evaporação), em função da substituição de 1,5 e 4% (em massa) do agregado miúdo por três diferentes granulometrias de borracha de pneus (fina #0,075 mm, média #1,19 mm e grossa #2,38 mm).

Pcziecsek (2017) analisou as propriedades físicas e mecânicas da argamassa para revestimento de edificações, com a incorporação de diferentes concentrações de borracha (1,25 e 2,5% em relação à massa da areia natural). Foram observadas a consistência, a massa específica e a retenção de água nas argamassas no estado fresco. No estado endurecido, foi avaliada a resistência à tração na flexão e na compressão, a absorção de água e o índice de vazios. Também foram examinadas a resistência de aderência a tração e a durabilidade das argamassas ao ataque por sulfato de sódio.

Kurz *et al.* (2018) observaram o comportamento de argamassas com diferentes substituições de agregado miúdo por resíduo de borracha, conferindo seu comportamento físico e mecânico. Para caracterização das argamassas foram realizados ensaios de índice de consistência, de compressão axial, de resistência à tração por compressão diametral, de absorção por capilaridade e de absorção por imersão. Os pesquisadores substituíram a areia

por borracha nas proporções de 2,5; 5; 10 e 15% de substituição de areia por borracha, sendo como traço de referência a mistura em 1:3 (cimento: agregado).

#### *2.4.2. Pesquisa relacionada à diferentes aplicações da borracha de pneu na construção civil*

Khatib & Bayomy (1999), procederam a pesquisa relacionada ao desenvolvimento de concreto emborrachado e avaliação de suas propriedades mecânicas básicas. Em função da redução da resistência do concreto emborrachado, foi concluído que o mesmo pode ser útil como elementos com fins não-estruturais, a exemplo de paredes de concreto leves e fachadas. Os pesquisadores perceberam, também, que o concreto emborrachado pode ser usado como bases para pavimentos flexíveis.

Oda & Fernandes Junior (2001), realizaram a estudos referentes à incorporação de borracha de pneus em ligantes asfálticos utilizados em obras de pavimentação. O estudo objetivou oferecer alternativa para solucionar um grave problema ambiental, pois no Brasil são descartados mais de dezenas de milhões de pneus por ano. Os resultados evidenciaram que o ligante asfalto-borracha pode aumentar a resistência e reduzir o aparecimento de trincas por fadiga do revestimento asfáltico.

Marques *et al.* (2006), investigaram o comportamento do concreto adicionado de resíduos de borracha de pneus, criando um concreto alternativo. Foram feitos vários traços com duas granulometrias diferentes e avaliadas propriedades como: resistência à compressão, resistência à tração, módulo de elasticidade, absorção de água e trabalhabilidade. Os resultados indicaram redução nos valores referentes às propriedades mecânicas e perda na trabalhabilidade após a adição do resíduo. De acordo com esses pesquisadores, é necessários aperfeiçoar os estudos deste tipo de concreto alternativo. Eles compreenderam que o concreto com borracha de pneus pode substituir o uso do concreto convencional nos casos de média exigência de resistência, devendo-se destacar, por outro lado, o nobre objetivo ecológico de aproveitamento deste resíduo tão prejudicial a natureza.

Fioriti *et al.* (2007) executaram avaliação de blocos de concreto para pavimentação intertravada contendo resíduos de borracha provenientes da recauchutagem de pneus. As propriedades avaliadas foram resistência à compressão, absorção de água e resistência ao impacto. Os resultados indicaram viabilidade na utilização dos blocos com resíduos de borracha em pavimentação intertravada com solicitações leves.

Para Oliveira & Castro (2007), a solução mais promissora para os pneus inservíveis é fazer o pneu velho voltar para as estradas, mas, na forma de asfalto. É possível adicionar, na

composição asfáltica, um percentual de borracha de pneu triturada, o que aumenta em mais do dobro a durabilidade do asfalto.

Ford (2011) apresentou em sua pesquisa o desenvolvimento de um material compósito à base de raspas de pneu e látex para isolamento térmico. Através de processos manuais, foram fabricadas mantas do compósito nas proporções em peso de 1:1 (50% : 50%); 1:2 (33% : 67%) e 2:1 (67% : 33%) (raspa de pneu: látex - respectivamente). Os resultados obtidos experimentalmente comprovaram que o compósito pode ser utilizado para fins de isolamento térmico, tanto em superfícies aquecidas como resfriadas.

Flores *et al.* (2013) estudaram a viabilidade do uso de borracha de pneu reciclado em concreto, avaliaram as propriedades mecânicas do concreto endurecido, a exemplo da resistência à compressão e da determinação do módulo de elasticidade, além disso, determinaram a viabilidade do concreto em seu estado fresco. As amostras foram fabricadas com a substituição de 5; 7,5 e 10% do volume da areia por partículas de pneu reciclado. Os resultados mostraram que mistura com 5 e 7,5% de borracha de pneu reciclado, pode ser usada em estruturas de resistência moderada.

Faria (2015), avaliou o efeito da incorporação de resíduo de borracha de pneus inservíveis nas propriedades físicas e mecânicas da cerâmica vermelha. Para isso, foram preparados corpos de prova para ensaio de compressão uniaxial, com incorporações do resíduo de pneus. Foram avaliadas ainda, outras propriedades físicas e mecânicas dos corpos cerâmicos, a exemplo da retração linear, absorção de água e tensão de ruptura à flexão. Os resultados apontam que incorporações de até 1% de pó de borracha na massa cerâmica, melhoraram a plasticidade e não alteraram a resistência mecânica quando comparada à massa cerâmica.

Alam *et al.* (2015) realizaram pesquisas com utilização de resíduos de borracha, como agregado no concreto. Eles analisaram diferentes propriedades, como resistência à compressão, resistência à tração, ductilidade. Como resultado, foi verificado que o “concreto emborrachado” é durável, menos dúctil, tem maior resistência às fissuras, porém tem baixa resistência à compressão quando comparado ao concreto comum. A resistência à compressão do “concreto emborrachado” pode ser aumentada adicionando-lhe uma quantidade de sílica.

Silveira *et al.* (2016) fizeram um estudo para analisar as propriedades mecânicas do concreto, elaborado a partir da substituição de parte do agregado miúdo por borracha de pneu triturado (teor de borracha de 10%). Foram realizados testes experimentais em corpos de prova submetidos à compressão axial, flexão simples sob carga centrada e fadiga. Os resultados obtidos mostram que a adição de borracha provoca redução na resistência mecânica

do concreto. Por outro lado, a aplicação da borracha de pneu no concreto contribui na reciclagem de um material poluente e que normalmente é descartado de forma indevida no meio ambiente.

## **2.5. Caracterização física e mecânica**

### **2.5.1. Caracterização física dos agregados**

A NBR NM 248 (ABNT, 2003) preceitua o método para a determinação da composição granulométrica de agregados miúdos. A norma determina que para se estabelecer a dimensão máxima característica deve-se observar a distribuição granulométrica do agregado e a peneira, da série normal ou intermediária, na qual o agregado apresenta porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5%. Por sua vez, o módulo de finura é descrito como a soma das porcentagens retidas acumuladas em massa de um agregado, nas peneiras da série normal, dividida por 100.

A NBR 52 (ABNT, 2003) delinea o método de determinação da massa específica de agregados miúdos, além de definir que a massa específica é a relação entre a massa do agregado seco e seu volume, excluindo os poros permeáveis.

A NBR NM 45 (ABNT, 2006) estabelece o método para a determinação da massa unitária de agregados miúdos, grãos ou de mistura dos dois, em estado compactado ou solto, desde que eles tenham dimensão máxima característica igual ou menor que 75 mm. Esta norma define como massa unitária a relação entre a massa do agregado e o volume de um recipiente.

Para Lopes Neto (2017), a areia é um agregado miúdo de origem natural, cuja dimensão máxima é igual ou inferior a 4,8 mm. O autor apresenta a seguinte classificação granulométrica: Muito fina (0,15 a 0,3 mm); Fina (0,3 a 0,6 mm); Média (0,6 a 1,2 mm) e Grossa (1,2 a 4,8 mm).

Não existe procedimento normatizado para o processo da caracterização de resíduos de borracha que são empregados como agregados na produção de concretos de cimentos Portland. O resíduo de borracha deve ser caracterizado através das seguintes determinações básicas: granulometria, massa unitária, massa específica (GIACOBBE, 2008, KURZ *et al.*, 2018).

## 2.5.2. Caracterização física e mecânica de argamassa

### 2.5.2.1. Aspectos gerais

Para avaliar o desempenho do revestimento de argamassa é necessário que sejam feitos estudos, através de ensaios, relativos a qualidade, constatando seu potencial, sobretudo em relação à durabilidade (CARASEK *et al.*, 2011).

A trabalhabilidade é a propriedade das argamassas no estado fresco que determina a facilidade com que elas podem ser misturadas, transportadas e aplicadas, aos diversos substratos, em condição homogênea. A trabalhabilidade é resultante da conjunção de diversas outras propriedades, as quais podem ser citadas: consistência, adesão inicial, plasticidade, retenção de água, exsudação (CARASEK, 2007, ARAÚJO, 2014). Conforme aponta Ferreira (2014), argamassa é trabalhável quando não segrega ao ser transportada, não gruda na ferramenta e pode ser distribuída com facilidade ao ser aplicada.

Para Nakakura & Cincotto (2004), a resistência mecânica das argamassas está relacionada a sua capacidade de resistir a esforços de tração, compressão ou cisalhamento, decorrentes de cargas estáticas ou dinâmicas atuantes nas edificações, ou decorrentes de efeitos das condições ambientais. Os pesquisadores acrescentam que a resistência à compressão é a característica mais comumente determinada, tanto para argamassa de assentamento como para argamassa de revestimento. Com isso, entende-se que esta propriedade, importante para o controle de produção do cimento, tem a capacidade de verificar a uniformidade de produção.

Canova *et al.* (2015) afirmam que as argamassas, quando aplicadas como revestimento de fachadas exposto ao intemperismo, estão sujeitas a variações dimensionais, que por sua vez, resultam em desempenho inadequado, como é o caso da fissuração. Para que isso não ocorra, o material terá que possuir extensibilidade adequada. Uma alternativa possível para a melhoria das propriedades de deformabilidade da argamassa de revestimento é a introdução do pó de borracha proveniente de pneus inservíveis.

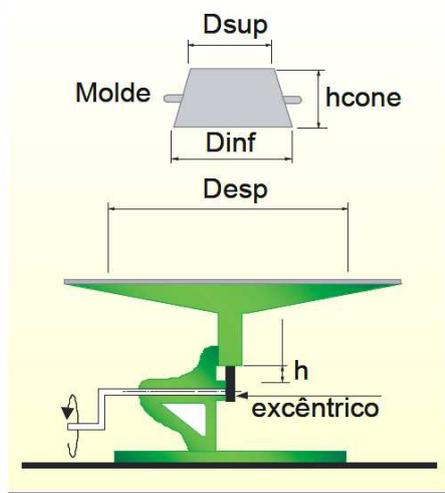
### 2.5.2.2. Conceitos e pesquisas relacionados ao índice de consistência

Meneguini (2003) assevera que a incorporação de resíduo de borracha de pneu determina melhor trabalhabilidade à argamassa de base cimentícia. Em trabalho realizado

com argamassa, o pesquisador observou que houve pequena melhora do índice de consistência nos traços 1:5 e 1:7, contendo borracha, quando comparados ao controle.

Silva *et al.* (2005) produziram uma pesquisa para índice de consistência por espalhamento, no qual, sobre a mesa de ensaio, deve conter argamassa moldada em um tronco de cone metálico, de volume  $463,29 \text{ cm}^3$ . A mesa de espalhamento, conforme a Figura 1 é uma ferramenta utilizada no método de ensaio recomendado pela NBR 13.276 (ABNT, 2016). Os pesquisadores afirmam que, se o valor obtido no ensaio for superior a 265 mm recomenda-se a repetição do experimento, e se for inferior a 245 mm deve-se acrescentar pequena quantidade de água e repetir a pesquisa.

Figura 1- Mesa de espalhamento.



Fonte: Silva *et al.* (2005).

O teste de mesa de consistência (Flow-table), consiste em medir o índice de consistência por espalhamento horizontal de argamassa moldada na forma de um cone padrão, onde o material é submetido a sucessivos impactos após a retirada do cone (CARDOSO *et al.*, 2005).

Assunção *et al.* (2007) afirmam que a consistência da argamassa é um indicador da trabalhabilidade, servindo de parâmetro para determinar a quantidade de água necessária à mistura, para que a argamassa possa alcançar boa trabalhabilidade. Os autores realizaram um trabalho com o intuito de avaliar as propriedades das argamassas produzidas com agregados, provenientes do reaproveitamento de resíduos da construção e demolição. O espalhamento da argamassa de referência foi de 260 mm, enquanto a relação água/cimento foi de 1,08.

Carasek (2007) aponta que consistência é uma propriedade que indica a maior ou menor facilidade de a argamassa deformar-se sob ação de cargas, enquanto que a plasticidade é a propriedade pela qual o compósito tende a conservar-se deformada após a retirada das tensões de deformação.

Segundo apresenta Cintra (2013), o índice de consistência é determinado pela medida do espalhamento de porção de argamassa, inicialmente moldada em forma tronco-cônica sobre a mesa de ensaio. Pode-se acrescentar que esta propriedade é diretamente influenciada pela quantidade de água. A pesquisadora afirma, também, que a facilidade de espalhamento da argamassa depende da facilidade da movimentação entre as partículas e da lubrificação interna.

Cintra *et al.* (2014), apresentaram trabalho relacionado a pesquisa experimental de algumas propriedades relevantes de argamassas leves para revestimento confeccionadas com cimento, areia, cal, vermiculita e agregados de borracha de pneus reciclados, e constataram que o percentual de água obedece à relação direta com o índice de consistência, cujo espalhamento variou entre 231 a 273 mm.

Canova *et al.* (2015) avaliaram argamassa de revestimento de alvenaria produzida com cimento, cal virgem e areia, com inserção de borracha de pneu moído. A composição teve o traço em 1:1,5:9 (em volume) e adições de pó de borracha nas proporções (6, 8, 10 e 12%, em volume de agregado). O espalhamento variou entre 250 a 254 mm, sendo que a argamassa de referência teve espalhamento de 254 mm e as argamassas com 8 e 10% de borracha tiveram de 252 e 253 mm, respectivamente. Já a relação entre água e volumes secos ficou na faixa compreendida entre 0,223 e 0,231.

Kazmierczak *et al.* (2016), realizaram pesquisa para a determinação das propriedades das argamassas no estado endurecido, sob a influência da adição de filer de areia de britagem. Na pesquisa, os autores fizeram ensaios voltados à determinação do índice de consistência, dentre outras propriedades. Considerando adição de 10% de finos de britagem, tem-se como resultado uma argamassa trabalhável, com melhoria em suas propriedades mecânicas e retração dentro de limites aceitáveis.

#### 2.5.2.3. *Conceitos e pesquisas relacionados à densidade de massa*

Carasek (2007) classifica as argamassas, segundo a densidade de massa, como leve, normal e pesada, conforme Quadro 2 apresentado a seguir.

**Quadro 2- Classificação por critério de densidade.**

<b>Argamassa</b>	<b>Densidade de massa (g.cm<sup>-3</sup>)</b>	<b>Principais agregados empregados</b>
Leve	Menor que 1,40	Vermiculita; Argila expandida
Normal	Varia entre 1,40 e 2,30	Areia do rio; Calcário britado
Pesada	Maior que 2,30	Barito (sulfato de bário)

Fonte: Carasek (2007).

Canova *et al.* (2007) avaliaram argamassa de revestimento produzida com cimento, cal virgem e areia, contendo resíduos de pneus de borracha inservíveis. Nos ensaios de densidade de massa no estado fresco, foi verificado que argamassa de referência apresentou o valor de 1,954 g.cm<sup>-3</sup>. As argamassas alternativas tiveram valores de 1,87; 1,84 e 1,799 g.cm<sup>-3</sup>, respectivamente, para os traços contendo 6, 8 e 10% de borracha de pneu (em relação ao volume de areia natural). A diminuição da densidade de massa, geralmente, é uma propriedade que torna as argamassas mais trabalháveis em longo prazo, pois diminui os esforços realizados pelos operários na aplicação do compósito e promove, conseqüentemente, maior produtividade ao final da jornada de trabalho (CARASEK, 2007).

Cintra (2013), afirma que a densidade de massa varia em relação direta com a massa específica dos materiais que compõem a argamassa. Junto a isso, atesta que a densidade de massa, também denominada massa específica, é a relação entre a massa do compósito e o seu volume. Nos seus ensaios, a pesquisadora concluiu que a argamassa contendo vermiculita expandida e borracha reciclada de pneus tem densidade de 1,05 g.cm<sup>-3</sup>, enquanto a densidade das argamassas tradicionais (composta por cimento, cal e areia) é de 1,91 g.cm<sup>-3</sup>.

Nas suas pesquisas de viabilidade da produção de argamassas contendo borracha de pneus, Pinto & Fioriti (2016) obtiveram resultados que demonstraram que a incorporação de borracha de pneus causa redução na densidade de massa dos compósitos, o que se explica pelo fato da borracha ser um material leve (menor densidade da borracha em relação à densidade da areia). Foi observado que as argamassas com incorporações de 4 e 10% de borracha, no estado endurecido e com granulometria de borracha média, apresentaram densidade 1,53 e 1,44 g.cm<sup>-3</sup>, respectivamente, sendo estes valores inferiores ao da argamassa de controle (1,61 g.cm<sup>-3</sup>).

Silva *et. al* (2016), procederam sua pesquisa objetivando avaliar a influência de aditivos plastificantes no comportamento mecânico de argamassa cimentícia de revestimento de paredes, no traço 1:3,75 (cimento: areia) e tendo a relação água/materiais secos em 0,128.

Foram analisados o índice de consistência, densidade de massa, absorção de água por capilaridade, dentre outros. Os resultados apontam que a densidade de massa foi  $2,24 \text{ g.cm}^{-3}$  e o índice de consistência foi de 267 mm. A absorção de água por capilaridade da argamassa foi de  $1,13 \text{ g.cm}^{-2}$ , na duração de 72 horas.

Martins *et al.* (2016), realizaram pesquisa com o objetivo de relacionar as propriedades de densidade de massa aparente e a condutividade térmica de argamassas convencionais e não convencionais, por meio de revisão sistemática na literatura. O levantamento de dados aponta que há tendência de elevação da condutividade térmica a medida que aumenta a densidade de massa dos compósitos.

Em pesquisa realizada, Pczieczek (2017) verificou que, com o aumento na quantidade de borracha na argamassa, ocorreu uma redução da massa específica. Este fato deve-se a baixa massa unitária dos resíduos utilizados, o traço de referência teve a composição de 1:1:6 (cimento:cal:areia) e apresentou uma densidade de  $1,99 \text{ g.cm}^{-3}$ , no estado fresco.

#### 2.5.2.4. Conceitos e pesquisas relacionados à absorção de água por capilaridade

A absorção de água por capilaridade é caracterizada pela passagem de água através da argamassa endurecida, por meio de percolação sob pressão. A permeabilidade é influenciada, essencialmente, pela granulometria da areia, características e proporcionalidades dos materiais constituintes da argamassa, quantidade de água utilizada na mistura e, também, pela utilização de aditivos químicos (PINTO & FIORITI, 2016).

Meneguini (2003) realizou ensaio de absorção de água por capilaridade em argamassas de cimento, areia e pó de borracha de pneus (na proporção 0 e 2%). Para os ensaios de absorção de água por capilaridade, notou-se que, aos 3 dias de ensaios, o comportamento das argamassas sem adição de borracha de pneu apresentou valor de 52,63% acima daquelas com adição de borracha de pneu. A absorção de água por capilaridade para argamassa de controle foi de  $0,475 \text{ g.cm}^{-2}$ .

Marques (2005) pesquisou algumas propriedades de concretos e argamassas com borracha de pneu. Dos resultados obtidos no ensaio de absorção de água em corpos-de-prova de argamassa, para as idades de 7, 28, 56 e 90 dias, foi observado que a mistura de referência apresentou absorção de água ligeiramente maior (na ordem de 6%) quando comparada às misturas que contêm borracha. Sendo assim, a pesquisadora concluiu que o uso de borracha de pneu em argamassas de revestimento, não altera de forma significativa a absorção de água.

Fioriti *et al.* (2007) fizeram avaliação de blocos de concreto para pavimentação intertravada, com substituição parcial dos agregados convencionais por resíduos de borracha provenientes da recauchutagem de pneus. Os níveis de incorporação (em substituição) dos resíduos de borracha foram de 8, 10 e 12%, em volume. Os autores afirmaram que, não se pode dizer que a propriedade de absorção de água por imersão é afetada de maneira negativa com o uso de resíduos de pneus. Além disso, observaram que praticamente todos os traços de blocos intertravados com resíduos de pneus, apresentaram valores de absorção de água muito próximo quando comparados com o traço de referência.

Ferreira (2009) realizou trabalho comparativo entre argamassas contendo borracha de pneu, nas proporções de 0, 10, 20 e 30 %, de massa em relação à massa do cimento. Considerando a quantidade de água absorvida em relação ao peso, o pesquisador afirma que, percentualmente, os compósitos contendo borracha apresentam redução de absorção, e percebe-se que quanto maior a quantidade de borracha, a capacidade do material de absorver água sofre diminuição. A absorção de água por capilaridade para tratamento de referência (0%) foi de  $0,3 \text{ g.cm}^{-2}$ .

Andrade & Guimarães (2017) realizaram trabalho voltado para avaliação das propriedades das argamassas, quer seja no estado fresco ou no endurecido, produzidas a partir da substituição parcial da areia por resíduo de EVA (*Ethylene Vinyl Acetate*). Para isso, foram preparadas argamassas com teores de substituição do agregado em 5, 10 e 15%, em massa. Os resultados apontaram que as argamassas produzidas com agregado de EVA, apresentam menor absorção de água, bem como um decréscimo da resistência mecânica. Com isso, concluiu-se que a produção de argamassas utilizando EVA, em substituição ao agregado considerado natural é viável.

Kurz *et al.* (2018) produziram pesquisas em argamassas de referência e em argamassas com resíduos nas proporções de 2,5; 5; 10 e 15% (substituição de areia natural por borracha de pneu), onde o traço de referência foi 1:3 (cimento:agregado). Os autores verificaram que as argamassas alternativas tiveram absorção por capilaridade inferior à argamassa de referência.

#### 2.5.2.5. Conceitos e pesquisas relacionados à resistência à tração por compressão diametral

Meneguini (2003) desenvolveu pesquisa com o objetivo de determinar as principais propriedades mecânicas de argamassa convencional e de argamassa alternativa, contendo pó de borracha de pneus inservíveis (a partir da substituição parcial de areia por pó de borracha de pneus usados, na quantidade correspondente a 2%, calculado em massa). Para o traço 1:3

(cimento:areia), a redução da resistência à tração por compressão diametral foi de 12,20% quando inserido borracha de pneu. Para os traços 1:5 e 1:7, as reduções foram de 8,91 e 3,07%, respectivamente.

Ferreira (2009) realizou ensaio para determinação de resistência à tração por compressão diametral em argamassa com e sem borracha de pneu. O pesquisador atestou que, a argamassa contendo 2% de borracha tem redução de 20,44% em relação à argamassa sem borracha, enquanto a argamassa contendo 6% de borracha tem diminuição de 33,87%.

Para Cintra (2013), o ensaio de resistência à tração por compressão da argamassa baseia-se no princípio de que um cilindro, carregado diametralmente, recebe tensões de tração, além das de compressão; como a resistência à tração da argamassa é bem inferior à de compressão, a amostra rompe por tração. Conforme os resultados obtidos, foi verificado que a resistência à tração por compressão diametral diminui à proporção que se colocou borracha de pneu e vermiculita na argamassa. As argamassas A1 (contendo 20% de vermiculita e 10% de borracha) e A2 (contendo 12% de vermiculita e 33% de borracha) tiveram redução de 67,14 e 69,15% em relação à argamassa de referência (contendo cimento:cal:areia).

Araújo (2015) realizou trabalho para discutir o padrão de comportamento em concreto e argamassa, de vários corpos de prova submetidos à resistência a compressão axial e tração por compressão diametral. Foram confeccionados 5 traços de concreto e 2 de argamassa. Dentre os resultados obtidos, foi verificado que os valores da resistência à tração por compressão diametral são de 7 a 12 vezes menor que os seus valores correspondentes para resistência à compressão axial. Tal fato verificou-se tanto para o concreto quanto para a argamassa.

Canova *et al.* (2015) pesquisaram o comportamento mecânico de argamassa de revestimento de alvenaria produzida com traço de 1:1,5:9 (cimento, cal virgem e areia) e adições de pó de borracha em diferentes proporções. A evolução da resistência à tração por compressão diametral ocorreu de forma semelhante a da resistência à compressão axial e os valores, em média, correspondem a 7,5 vezes menores que os valores da resistência à compressão.

#### *2.5.2.6. Conceitos e pesquisas envolvendo resistência à tração na flexão*

Marques (2005) avaliou as propriedades de argamassas, a partir da substituição parcial do agregado miúdo (em quantidade correspondente a 12% em volume) por resíduos de borracha de pneus provenientes do processo de recauchutagem. Percebeu-se que a

incorporação de borracha proporcionou redução de 32,59% na resistência à tração na flexão, enquanto que na resistência à compressão axial ocorreu redução de 39,58%.

Giacobbe (2008) realizou ensaios de tração na flexão em concreto (com e sem adição de borracha de pneu). Para isso, foram moldados três corpos-de-prova de dimensões 100 x 100 x 400 mm para cada tratamento. A resistência à tração na flexão diminuiu com o aumento do teor de borracha no concreto. Em relação ao tratamento de referência, uma peça com teor de 15% de borracha teve a redução de 29,86%. No entanto, esta redução foi menor que a similar redução da resistência à compressão, que foi de 60,12%.

De acordo com Ferreira (2009), ao flexionar uma peça elástica, sua parte superior é comprimida enquanto a inferior é tracionada. Portanto, um corpo-de-prova prismático de concreto, submetido à flexão, rompe por tração, visto que apresenta resistência a tração inferior à de compressão. O pesquisador realizou pesquisa experimental com argamassa contendo fibras de borracha de pneus, em proporção variando 10, 20 e 30% (massa - em relação à massa do cimento). Os corpos de prova contendo fibras de borracha apresentaram resistência à tração na flexão inferior à argamassa de referência.

Pinto & Akasaki (2016) estudaram algumas características físicas de pasta de gesso produzida com incorporação de resíduos de borracha de pneus. Dentre os estudos realizados no programa experimental, constou a realização do ensaio para resistência à tração na flexão. O teor de incorporação da borracha de pneus foi de 5 e 10% em relação à massa de gesso. Os resultados dos ensaios de resistência a ruptura na flexão apontaram redução de 21 e 38,34% quando incorporado 5 e 10% de borracha de pneu, respectivamente.

#### *2.5.2.7. Conceitos e pesquisas envolvendo resistência à compressão axial*

A resistência mecânica a compressão da argamassa é a propriedade que melhor representa o seu desempenho mecânico. Dentre os fatores que influenciam na resistência à compressão do revestimento pode-se citar: consumo de cimento, incorporação de ar, relação água/cimento (DUBAJ, 2000).

Meneguini (2003) desenvolveu pesquisa visando à determinação das principais propriedades mecânicas de argamassa de cimento e areia e de argamassa alternativa, contendo pó de borracha de pneus usados. O pesquisador verificou também, que a resistência a compressão da argamassa de referência teve um acréscimo de 29,16%, no intervalo entre o 7° e o 28° dias de moldado os corpos de prova.

Marques (2005) realizou trabalho com objetivo de estudar algumas propriedades de argamassas, que tiveram substituição parcial do agregado miúdo por resíduos de borracha, e percebeu que a adição da borracha de pneu nos compositivos provocou diminuição da resistência à compressão, em torno de 40% quando comparado com a argamassa de referência.

Giacobbe (2008) fez pesquisas experimentais com intuito de correlacionar o desempenho físico-mecânico do concreto. Foram incorporados diferentes teores de borracha (em substituição à massa da areia) e comparadas suas propriedades com as de um concreto de referência. Em todas as idades, o concreto contendo borracha de pneu apresentou redução de resistência à compressão quando comparado com o concreto de referência. O concreto contendo 15% de borracha de pneu, em massa, mostrou redução de 60,1%.

Mohamad *et al.* (2009) atestam que a resistência à compressão das argamassas é um dos principais parâmetros comparativos de qualificação das composições. Estes pesquisadores asseveram que os ensaios de caracterização físico-mecânica servem de base para o cálculo das percentagens de material em massa, que farão parte das composições das argamassas.

Ferreira (2009) realizou experimentos com argamassa contendo fibras de borracha de pneus, com diferentes proporções. As fraturas resultantes dos ensaios de resistência à compressão foram no modelo tronco de cone e cisalhantes para todos os elementos ensaiados. As argamassas alternativas apresentaram significativas reduções do valor da compressão axial em relação à argamassa de referência. O tratamento com 2% de borracha teve redução média de 14,98%, enquanto a argamassa com 4% de borracha teve redução de 30,16% e argamassa com 6% de borracha teve redução de 36,68%. Durante o intervalo de tempo entre o 7º e o 28º dia, a argamassa de referência teve um aumento de 39,77% considerando a sua capacidade de resistência à compressão.

Kurz *et al.* (2018) analisaram o comportamento de argamassas com diferentes substituições de agregado miúdo por resíduo de borracha. Para as argamassas alternativas, o decréscimo da resistência a compressão axial ocorreu conforme o aumento na porcentagem de substituição do resíduo. Os resultados mostram que a argamassa que possui maior decréscimo em relação à argamassa de referência, é o da substituição em 15%, em que ocorreu um decréscimo de 80,68%. O menor decréscimo é o da substituição 2,5% de areia por borracha de pneu, cujo valor de redução foi de 48,79%. Os autores afirmam que, este fato pode ter sido ocasionado devido a característica da borracha em ser um material com menor resistência do que a areia.

## 2.6. Caracterização Térmica

### 2.6.1. Transferência de calor

O calor é a energia térmica em trânsito devido a um gradiente de temperatura. Ou seja, sempre que houver diferença de temperatura em um meio ou entre meios ocorrerá, espontaneamente, transferência de calor que flui das temperaturas mais altas (com maior energia cinética das partículas) para as temperaturas mais baixas (menor energia cinética). Essa transferência cessa quando não houver mais esta diferença de temperatura. Existem três mecanismos de transferência de calor, que podem ser reconhecidos como: condução, convecção e radiação. Para descrever a transferência de calor, as propriedades termofísicas referentes à condução, à convecção e à radiação devem ser conhecidas (INCROPERA *et al.*, 2008; ATAÍDE, 2014).

A condução é a troca de calor entre dois pontos de um mesmo corpo ou entre dois corpos em contato. Durante esse processo, o meio permanece estacionário e a energia térmica de cada molécula (a vibração de seus átomos) vai sendo transmitida para as moléculas vizinhas. Portanto, a transferência de calor por condução ocorre das partículas mais energéticas de uma substância, para as partículas adjacentes que são menos energéticas. O fluxo de calor é diretamente proporcional a diferença de temperatura entre os pontos considerados, e inversamente proporcionais à resistência térmica do corpo (RORIZ, 2008; MORAN & SHAPIRO, 2009).

A transferência de calor por condução é governada pela Lei de Fourier, a qual relaciona o fluxo de calor que atravessa um corpo, com a diferença de temperatura entre as suas faces, além da espessura deste corpo. Assim sendo, a supracitada Lei pode ser utilizada com o objetivo de determinar o coeficiente de condutividade do material ( $k$ ) da parede plana (CINTRA, 2013; GOMES, 2015; SOUZA, 2017).

A convecção é a transmissão de calor entre dois corpos fluidos (líquido ou gasoso) ou entre um fluido em movimento e a superfície de um sólido. Nesse modo de propagação de calor, a energia térmica muda de local acompanhando o deslocamento do próprio material aquecido, formando as correntes de convecção (FARIAS, V. 2011; ATAÍDE, 2014).

A radiação térmica é uma forma de transmissão de calor, que não necessita de um meio material para propagação, pois a energia é transmitida na forma de ondas eletromagnéticas, ou ainda, na forma de fótons (BEZERRA, 2003; INCROPERA *et al.*, 2008).

## 2.6.2. Propriedade térmica do material

### 2.6.2.1. Aspectos gerais

Por "propriedade térmica" entende-se a resposta de um material à aplicação de calor, devendo observar que o transporte deste tipo de energia ocorre, espontaneamente, de regiões de mais alta para mais baixa temperatura (CALLISTER, 2005). Santos *et al.* (2004) apontam duas propriedades físicas muito importantes (do ponto de vista de cálculos térmicos), que são a condutividade térmica e o calor específico.

A necessidade de conhecer as propriedades térmicas dos materiais para sua correta aplicação é apontada por Sacht *et al.* (2010). Os pesquisadores descrevem que dentre essas propriedades, destaca-se a condutividade térmica, uma das propriedades físicas mais importantes do ponto de vista de cálculo térmico de um material.

Conforme Marques *et al.* (2009), o conhecimento das propriedades termo-físicas de um material de construção é essencial na elaboração de projetos de edificações, que obedecem aos princípios de condicionamento térmico natural e nas avaliações de desempenho térmico de edificações. A condutividade térmica está relacionada à capacidade de um corpo de conduzir calor. Observa-se que toda vez em que houver gradiente de temperatura num ambiente, ou entre vários ambientes, a transferência de calor ocorrerá obrigatoriamente (BORÉM *et al.*, 2002; MOTTA, 2012).

### 2.6.2.2. Conceitos e pesquisas relacionados com a condutividade térmica

Stancato (2000) realizou trabalho visando determinar a condutividade térmica e evidenciando, assim, as características termo-isolantes do compósito. Para a argamassa convencional foi utilizado o traço - em massa- de 1:3 (cimento: areia fina quartzosa) com a relação água/cimento de 0,63 e teve um coeficiente de condutividade no valor de  $1,175 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ .

Para Santos *et al.* (2004), a condutividade térmica determina os níveis de temperatura de trabalho de um material, e é um importante parâmetro para problemas envolvendo transferência de calor no estado estacionário. A transferência de calor de uma face para outra de um compósito ocorre mais facilmente ao utilizar materiais de condutividade térmica mais alta.

Segundo a NBR 15.220 (ABNT, 2005), a condutividade térmica é a propriedade física de um material homogêneo e isotrópico, no qual se verifica um fluxo de energia térmica constante, quando submetido a um gradiente de temperatura uniforme. Incropera *et al.* (2008) apontam que se trata de uma propriedade de transporte e que proporciona indicação quanto à taxa de transferência de calor por meio do processo de condução, variando de acordo com a estrutura física da matéria.

Benazzouk *et al.* (2008) pesquisaram a influência das partículas de pneu em compósitos de cimento, e identificaram que a adição das partículas de resíduos de borracha reduziu a condutividade térmica do compósito. Este fato ocorreu devido à característica isolante da borracha, evidenciando, dessa maneira, que o elemento com menor condutividade térmica produz compósitos com menor condutividade térmica.

Ferreira (2009) define condutividade como capacidade dos materiais para conduzir calor, destacando que os sólidos conduzem calor melhor que líquidos e gases sucessivamente, e que o ar é péssimo condutor de calor. A borracha não é um bom condutor de calor, sendo classificado como material de baixo índice de condutividade térmica, se torna um excelente isolante térmico e elétrico. Em ensaios realizados, o pesquisador observou variação da condutividade térmica nos valores do coeficiente das amostras com adição de resíduo de borracha em 0, 2, 4 e 6% (considerando massa do agregado) foram de 1,53; 1,52; 1,46 e 1,39  $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ , respectivamente.

Para Clarke & Yaneske (2009), embora os desvios nos valores dos coeficientes de condutividade não são explicitamente discutidos, todavia, pode-se inferir que os desvios de 50% ou mais não são incomuns. Eles também observam que a aplicação de controle da estrutura interna mostrou que, no caso concreto, a condutividade térmica pode diferir em até 30% para determinada densidade.

Segundo Cintra (2013), a grandeza física que caracteriza se um material é ou não um bom condutor de calor é a condutividade térmica ( $k$ ). A pesquisadora estudou a influência térmica da inserção de vermiculita e da borracha reciclada de pneu em argamassas de revestimento confeccionadas com cimento, cal e areia. As composições das argamassas leves apresentaram valores de condutividades térmicas muito mais baixas do que aquelas das argamassas convencionais. Os valores obtidos para condutividade térmica foram de 0,388  $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$  para a argamassa alternativa (contendo 33% de borracha de pneu e 12% de vermiculita), de 1,55  $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$  para argamassa industrial e de 2,175  $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$  para argamassa convencional.

Golub & Silva (2017) fizeram pesquisas para avaliar o potencial de isolamento térmico em argamassas de revestimento interno, pela adição de materiais alternativos como raspas de pneu moídas e resíduos das indústrias (a areia de fundição e as cinzas pesado-oriundas da queima de carvão em centrais termelétricas). Para a avaliação do isolamento térmico, tomou-se como parâmetro de referência a condutividade térmica do material. Como resultados, constatou-se que a substituição fracionada da areia por raspas de pneu moídas ou por cinzas pesadas de carvão na argamassa de revestimento interno, diminuiu a condutividade térmica da mistura.

A condutividade térmica fornece informações importantes sobre a taxa na qual a energia é transferida pelo processo de difusão. A condutividade térmica depende da estrutura física da matéria, atômica e molecular, e está relacionada com o estado da matéria. Na condução de calor em parede plana, a temperatura é função da coordenada “x” e a transferência de calor ocorre nesta direção (ROCHA, 2018).

Queiroz & Melo (2019) assinalam que a condutividade térmica representa a quantidade de calor que atravessa o corpo, e que no caso das edificações localizadas em regiões com baixa latitude (a exemplo do Norte/Nordeste do Brasil) recomenda-se que nas construções sejam utilizados materiais com baixa condutividade térmica.

### *2.6.2.3. Conceitos e pesquisas envolvendo inércia térmica*

Segundo Papst (1999), o uso de inércia térmica é importante estratégia bioclimática durante todo o ano. A pesquisadora realizou estudo para analisar a inércia térmica em edificações residenciais na cidade de Florianópolis – SC. Os dados estudados foram: distribuição de temperatura; amplitude térmica; amortecimento térmico e atraso térmico. Este atraso diário foi calculado obtendo-se a hora em que ocorreu a maior temperatura externa e interna. O atraso térmico dos diversos ambientes ficou entre 1 e 3 horas. A análise dos dados coletados indicou que a inércia térmica além de ser estratégia importante para o inverno, também tem efeito positivo no verão quando usado em fechamentos laterais da edificação.

Dornelles (2004) realizou pesquisa para analisar a influência da inércia térmica sobre as condições de conforto em edificações, com base nos dados obtidos no monitoramento de ambientes de sete 07 (sete) edificações localizadas em diferentes bairros da cidade de São Carlos (SP). As edificações tinham paredes que variavam no tipo de tijolo e espessura da alvenaria, sendo que todas estavam fechadas e sem ocupação durante o monitoramento. O atraso térmico variou de 3,3 a 15,1 horas. O uso de inércia térmica e isolamento térmico busca

reduzir ganhos de calor nos períodos quentes, e perdas nos períodos de frio (PEREIRA, 2009).

Frota & Shiffer (2005) argumentam que dois fenômenos de grande significado para o comportamento térmico do edifício estão associados à inércia térmica: o amortecimento e o atraso da onda de calor, devido ao aquecimento ou ao resfriamento dos materiais. O amortecimento e o atraso térmico serão tanto maiores quanto maior for à inércia do elemento da construção. Uma parede apresenta maior ou menor inércia segundo seu peso e sua espessura. Por sua vez, os revestimentos desempenham importante papel, pois revestimentos isolantes reduzem as trocas de calor com a parede e reduzem sua inércia.

## **2.7. Ensaio de fluxo térmico**

Para Souza (2017), ensaio de fluxo térmico, tendo como aparato uma câmara térmica, possibilita a análise do comportamento térmico das alvenarias alternativas mediante a troca de calor, tornando possível obter significativas variáveis, a exemplo de atraso e amortecimento térmico, além da condutividade térmica.

Existe uma diferença fundamental entre transferência de calor e termodinâmica. A termodinâmica estuda as interações envolvendo o calor e o papel que estas interações desempenham no entendimento da primeira e segunda lei. Ela não considera os mecanismos nem os métodos para o cálculo da taxa de calor, ou seja, a termodinâmica está focada no estado de equilíbrio da matéria. A transferência de calor é por natureza um processo de não equilíbrio termodinâmico, ocorre devido à existência de gradiente de temperatura (INCROPERA *et al*, 2008; ROCHA, 2018).

### **2.7.1. Ensaio de fluxo térmico para cálculo de coeficiente de condutividade**

Alguns processos técnicos, relacionados a ciência da transferência de calor são relevantes na realização deste tipo de ensaio por fluxo térmico. Deve-se ressaltar a transferência de calor por radiação, por convecção e por condução.

#### **2.7.1.1 Troca de calor por radiação**

Para Grilo & Cardoso (2000), a radiação térmica é a radiação eletromagnética emitida por um corpo em função de sua temperatura. Sabe-se que todo corpo com temperatura

diferente de 0 Kelvin, emite radiação. Os pesquisadores criaram um simulador de radiação solar capaz de produzir o máximo de radiação na faixa espectral da radiação solar em nível do solo. Tal fato foi possível utilizando-se lâmpadas incandescentes comuns. O critério para escolha da lâmpada utilizada como fonte emissora é aquele que contemple o binômio relacionado ao baixo custo e a máxima eficiência. Elegeu-se a lâmpada incandescente de bulbo transparente de 200 J.s<sup>-1</sup>, porque ela tem uma temperatura no filamento irradiador em torno de 3.673 K.

### 2.7.1.2 Troca de calor por condução

A taxa de transferência de calor (fluxo de calor) por condução é dada pela Equação 1 apresentada abaixo. Essa equação é a forma geral da Lei de Fourier e é válida quando o transporte de calor ocorre por condução (ÖZİŞİK, 1990; INCROPERA *et al.*, 2008; MORAN & SHAPIRO, 2009; FARIAS, V., 2011).

$$q_{cond} = -k \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \quad \text{Equação 1}$$

onde:

- $q_{cond}$  é a taxa de transferência de calor por condução (W);
- $k$  é o coeficiente de condutividade térmica do material (W. m<sup>-1</sup>. K<sup>-1</sup>);
- $A$  é a área (m<sup>2</sup>);
- $T$  é a temperatura (K);
- $x$  é a coordenada de posição (m).

### 2.7.1.3 Troca de calor por convecção

O modo de transferência por convecção é mantido pelo movimento molecular aleatório e pelo movimento global do fluido no interior de uma camada limite. A equação apropriada para taxa de transferência de calor por convecção, é conhecida como Lei de resfriamento de Newton, onde o fluxo de calor é proporcional ao gradiente de temperatura entre a superfície e o fluido. Pode ser expressa conforme a Equação 2 apresentada a seguir (INCROPERA *et al.*, 2008; MORAN & SHAPIRO, 2009).

$$q_{cvcc} = h.A.(T_s - T_\infty) \quad \text{Equação 2}$$

onde:

$q_{cvcc}$  é a taxa de transferência de calor por convecção (W);

$h$  é o coeficiente médio de transferência de calor por convecção ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ );

$A$  é a área ( $\text{m}^2$ );

$T_s$  é a temperatura da superfície (K);

$T_\infty$  é a temperatura do fluido circundante (K).

Souza (2017) elucida que o “ $h$ ” (coeficiente médio de transferência de calor por convecção) tem relação inversamente proporcional à resistência externa da superfície e seu valor pode ser obtido através das normas técnicas vigentes.

A NBR 15.220 (ABNT, 2005), por sua vez, aponta que a resistência térmica superficial varia de acordo com vários fatores, tais como: emissividade e velocidade do ar sobre a superfície, além das temperaturas da superfície da amostra, do ar e das superfícies próximas. Esta norma define que a resistência térmica superficial tem o valor de  $0,04 \text{ m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$ , para o ar, quando a direção do fluxo de calor for horizontal.

#### 2.7.1.4 Transferência de calor entre o meio e o ambiente construído.

Incropera *et al.* (2008) tratam do balanço de energia na superfície de um meio, destacando que, as condições para a conservação de energia valem tanto para o regime estacionário como transiente. O balanço de energia assume a forma da condição apresentada na Equação 3 e na Figura 2.

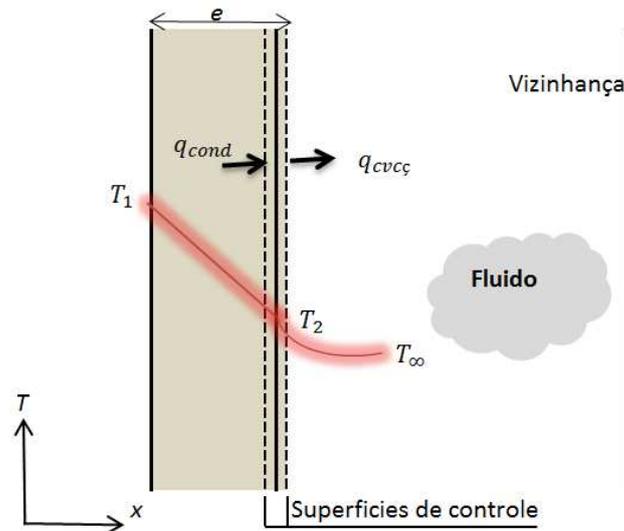
$$q_{cond} - q_{cvcc} = 0 \quad \text{Equação 3}$$

onde:

$q_{cond}$  é a taxa de transferência de calor por condução (W);

$q_{cvcc}$  é a taxa de transferência de calor por convecção (W);

**Figura 2-** Distribuição de temperatura numa parede infinita.



Fonte: Incropera *et al.* (2008).

O fluxo de calor que chega por condução na superfície da placa é igual ao fluxo de calor por convecção (fluxo convectivo) que chega no ar e pode ser expresso de acordo com Equação 4, expressa a seguir (INCROPERA *et al.*, 2008; FARIAS, V. , 2011).

$$h \cdot A \cdot (T_2 - T_\infty) = \frac{k \cdot A \cdot (T_1 - T_2)}{e} \quad \text{Equação 4}$$

onde:

$h$  é o coeficiente de transferência de calor por convecção do fluido ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ );

$A$  é área normal ao fluxo de calor ( $\text{m}^2$ );

$T_2$  é a temperatura da face da parede (K);

$T_\infty$  é a temperatura do fluido (K);

$k$  é o coeficiente de condutividade térmica da parede infinita ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ );

$T_1$  é a temperatura da face da parede (K);

$e$  é a espessura da amostra (m).

Para Bezerra (2003), o ensaio de fluxo de calor deve considerar que uma parede absorve energia térmica do meio externo através dos mecanismos de radiação e convecção, atentando para o fato que a intensidade desse fluxo dependerá, entre outros aspectos, da espessura da parede ( $e$ ), de sua densidade ( $\rho$ ) e de sua condutividade térmica ( $k$ ). O pesquisador considera que, submetida ao efeito de fonte de calor formada por lâmpadas incandescentes, a temperatura de face exposta desta parede eleva-se em relação à sua temperatura inicial e, como a temperatura da face oposta é menor, ocorrerá um fluxo de calor por condução na

direção desta última. Em consequência da elevação da temperatura, haverá um fluxo de calor da face interna da parede para o ambiente interno, através dos mecanismos de convecção.

Souza (2017) afirma que o processo de troca de calor pode ser iniciado quando o ar aquecido entra em contato com a superfície do material, alterando a sua temperatura. Em seguida, ocorre a troca de calor por condução entre as superfícies da alvenaria, pelo fato da temperatura da superfície oposta estar em temperatura inferior.

### 2.7.2 Pesquisas utilizando ensaios de fluxo de calor

Bezerra (2003) realizou experimentos tipo “ensaio de fluxo térmico” abrangendo paredes com material convencional e com material alternativo (blocos de concreto leve, com distintas proporções de EPS/areia). Para tanto, o pesquisador adaptou uma metodologia usada para ensaio de determinação de condutividade térmica conhecida como método “caixa quente protegida”. Sendo assim, procedeu-se a definição do sistema de acondicionamento térmico dos corpos de prova (fonte radiante para aquecer uma das faces dos painéis de alvenaria e condicionador de ar, para outra face), bem como a construção do aparato experimental (composto de sistema de medição de temperatura, corpos-de-prova e fonte de calor radiante utilizando lâmpadas com filamento de tungstênio). O experimento consistiu na análise de desempenho térmico da alvenaria, por meio de aquisição de dados relativos a média das temperaturas lidas no último intervalo de tempo de 15 minutos, em um período de realização correspondente a 24 h.

Gomes (2015) fez um experimento para avaliar a influência de *E.V.A.* em bloco de alvenaria. Para tanto, utilizou câmara térmica dividida por meio de divisória *dry-wall* (com manta de fibra de vidro no interior), o que faz com que a câmara possua dois ambientes (um a ser aquecido e outro a ser refrigerado). Em abertura existente na divisória foi inserida uma mini parede de tijolo cerâmico furado, para avaliação de desempenho térmico. Durante os ensaios foi utilizada como fonte de calor, uma caixa metálica contendo 12 lâmpadas incandescentes (150 W), posicionada a distância de um metro (1,0 m) da amostra (mini parede). Nessas amostras foram colocados 3 (três) pares sensores de temperaturas, diretamente na superfície de cada lado das minis paredes, em posições correspondentes. Os valores eram registrados por meio de um sistema de aquisição de dados sistematizados, de modo a obter a média aritmética por hora, mostrando a variação das temperaturas em função da duração do ensaio (24 horas). A análise do desempenho térmico foi realizada através de cálculos de vários parâmetros importantes, a exemplo de atraso térmico.

Oliveira *et al.* (2015) realizaram experimentos para determinação do coeficiente de condutividade térmica de compósitos constituídos a partir da fibra de coco. Para isso, utilizaram um sistema composto por: Calorímetro; Porta-amostra; Termômetros (para coletar os valores das temperaturas a cada minuto); Fonte geradora de calor (lâmpadas incandescentes); Software para registro de dados e computador. O calorímetro foi confeccionado com madeira MDF (*Medium Density Fiberboard*) revestida com poliestireno de 45 mm de espessura, enquanto o porta-amostra (que tem a função de dividir o calorímetro em dois ambientes) foi confeccionado com 2 placas de poliestireno de 45 mm de espessura e um furo no centro com 70 mm de diâmetro. O compósito para análise foi colocado no porta-amostra e, em ato contínuo, foram fixados sensores de temperatura em cada face da amostra. Para gerar o fluxo de calor, foram acionadas as lâmpadas incandescentes. Após coletar os dados de temperatura, foram efetuados os cálculos do coeficiente de condutividade térmica utilizando a Lei de Fourier e a Lei de Resfriamento de Newton.

Souza (2017) projetou e fabricou uma câmara térmica em MDF (*Medium Density Fiberboard*), para a realização do ensaio de fluxo térmico, com intuito de determinar a condutividade de amostras construídas por blocos de concreto. A câmara térmica tinha dimensão de 1,34 x 0,67 x 0,85 m, a qual foi revestida internamente por placas de poliestireno de espessura 3cm de modo a torná-la hermeticamente fechada. A amostra (painel) foi introduzida na câmara térmica, de modo que, devido a sua configuração espacial, o interior da câmara térmica ficou dividido em dois ambientes (setores): um em que está localizada a fonte de calor e outro que é o oposto. Para aferir as temperaturas nas superfícies do painel, foi utilizado termômetro infravermelho. O ensaio foi realizado durante três horas, com matriz de calor formado por lâmpadas de 100 W, acionado durante todo o período. A cada dez minutos eram aferidas as temperaturas superficiais da face exposta à fonte de calor e da face oposta à mesma. A pesquisadora afirma que através das aferições da temperatura, combinados com dados da área da seção transversal e da espessura da amostra torna-se viável o cálculo da condutividade térmica dos blocos. Os cálculos foram baseados na Lei de Fourier, bem como através do cálculo da taxa de transferência de calor por convecção.

### 2.7.3. Ensaio de fluxo térmico para cálculo de inércia térmica

Roriz (2008) afirma que a relação entre a amplitude térmica da face interna e da externa de uma alvenaria é chamada de amortecimento (cuja unidade é percentagem). A Equação 5,

apresentada a seguir, traduz mais apropriadamente o sentido da palavra "amortecer": maior amortecimento indica maior diferença entre as amplitudes.

$$\mu = 1 - \left( \frac{\textit{amplitude\_interna}}{\textit{amplitude\_externa}} \right) \quad \text{Equação 5}$$

Souza (2017) realizou estudos voltados à avaliação do desempenho térmico de vedações em blocos de concreto, produzidos com lã de rocha em substituição parcial da areia, em diversas proporções. Para tanto, a pesquisadora realizou ensaio de fluxo térmico, que constou da execução de quatro painéis de alvenaria de 0,50 m<sup>2</sup>, com diferentes traços. Estes painéis que dividiram uma câmara térmica (feita com madeira e isopor) em dois ambientes, foram submetidos a um fluxo térmico constante advindo de fonte de calor constituída por duas lâmpadas incandescentes com 100 W de potência cada uma. Durante 24 horas, foram aferidas as temperaturas por meio de sensores. Esse ensaio de fluxo térmico permitiu realizar a análise comparativa dos valores do amortecimento térmico e do atraso térmico dos diversos painéis de alvenaria. No caso paredes rebocadas (sem pintura) e com blocos de concreto contendo 0% lã de rocha, o amortecimento e o atraso térmico foram 83% e 2 horas, respectivamente. A medida que foram inseridas 10, 15 e 20% de lã de rocha nos blocos, o amortecimento aumentou para 85, 86 e 87%, respectivamente.

## 2.8. Análise estatística dos dados

A análise estatística dos dados pode ser realizada a partir dos estudos de medidas de posição; de medidas de dispersão (desvio padrão e coeficiente de variação) e de análise gráfica (medidas de ajustamento/correlação por regressão). Diversos autores procederam à pesquisa experimental utilizando estes processos nas suas análises estatísticas.

As aplicações do tratamento de dados têm dois objetivos básicos: obter informações sobre a qualidade das leituras efetuadas e informações sobre o valor verdadeiro da medida, ou seja, a análise de dados permite informação analítica da incerteza associado ao resultado final da grandeza desejada. (SILVA & SILVA, 1998; CABRAL, 2004).

### 2.8.1. Medidas de dispersão

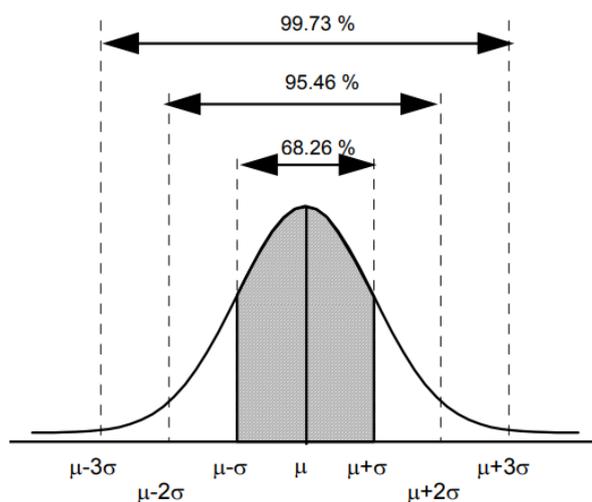
### 2.8.1.1. Desvio padrão da amostra ( $\sigma$ ) e desvio absoluto máximo

Para Polycarpo (2011), os dados experimentais obtidos em ensaios são estimativas do valor real da grandeza, enquanto a incerteza avalia a dispersão do conjunto de dados. Necessita-se, então, de definir um parâmetro que indique essa dispersão, bem como a largura do intervalo que contém as leituras.

Cabral (2004) expõe que o desvio padrão da amostra ( $\sigma$ ) trata do subconjunto finito da população (infinita). Já Silva & Silva (1998) afirmam que o desvio padrão da amostra ( $\sigma$ ) é um parâmetro que pode ser usado para definir a largura do intervalo que contém os dados. Para um grande número de dados da amostra é provável que a sua distribuição se encaixe numa distribuição normal ou gaussiana (SILVA & SILVA, 1998; POLYCARPO, 2011).

Correia (2003) atesta que a distribuição normal (conhecida como a “curva em forma de sino”) tem sua origem associada aos erros estatísticos. Quando se efetuam repetidas mensurações de determinada grandeza, não se chega ao mesmo resultado todas às vezes; obtém-se, ao contrário, um conjunto de valores que oscilam de modo aproximadamente simétrico, em torno do verdadeiro valor. Construindo o histograma desses valores, tem-se uma figura com forma aproximadamente simétrica, conforme a Figura 3, apresentada a seguir.

**Figura 3-** Curva da distribuição normal.



Fonte: Correia (2003).

De acordo com a Figura 3, pode-se afirmar que, para quantidade grande de leituras, existe uma probabilidade de que aproximadamente 68,3% dos dados medidos estejam dentro do intervalo definido pela Equação 6.

$$V_m - \sigma \leq V_i \leq V_m + \sigma$$

Equação 6

Onde:

$V_m$  é o valor médio das leituras;

$\sigma$  é desvio padrão da amostra;

$V_i$  é o valor individual da leitura.

Para um desvio igual a  $2\sigma$  e a  $3\sigma$ , tem-se, respectivamente, que as probabilidades são 95,4 e 99,7%. Assim, pode-se afirmar que se uma leitura qualquer tiver um desvio maior que  $3\sigma$ , deve ter acontecido um erro grosseiro nessa leitura, sendo que a medida deve ser abandonada e o tratamento dos dados deve ser refeito. (SILVA & SILVA, 1998; CABRAL, 2004; POLYCARPO, 2011).

Os resultados apresentados anteriormente são obtidos para um número grande de leituras. Entretanto, é possível mostrar que se o número de medidas for pequeno, os percentuais são menores que os apresentados na Figura 3. Assim, para se restabelecer esses percentuais, Silva & Silva (1998) recomendam que seja aplicado um coeficiente de correção correspondente ao número de dados experimentais, conforme Tabela 1, apresentada a seguir.

**Tabela 1-** coeficiente de correção aplicado no desvio padrão da amostra.

Nº Dados	2	3	4	5	10	20	>>20
68,3%	1,84	1,32	1,20	1,14	1,06	1,03	1
95,4%	14	4,53	3,31	2,37	2,32	2,14	2

Fonte: Silva & Silva (1998).

A NBR 13.279 (ABNT, 2005) que trata da resistência à tração na flexão e à compressão axial de argamassa à base de cimento, determina o uso de desvio absoluto máximo (doravante denominada de  $D.A.M_{ax}$ ). Esta norma define que  $D.A.M_{ax}$  é a diferença entre a resistência média e a resistência individual que mais se afasta desta média (para mais ou para menos). Por essa razão devem ser desconsiderados os valores superiores a 0,3 MPa (para ensaios de resistência à tração na flexão, sendo necessários- no mínimo- 02 corpos de provas) e de 0,5 MPa (para os ensaios de resistência à compressão axial, sendo necessários 04 corpos de provas, no mínimo).

### 2.8.1.2 Coeficiente de variação (CV)

O coeficiente de variação (*CV*) está relacionado com a medida relativa da dispersão, sendo muito útil para comparar os termos relativos do grau de concentração. O *CV* deve ser calculado pela relação matemática do desvio padrão da amostra ( $\sigma$ ) pelo valor médio amostral expresso em porcentagem (CORREIA, 2003; MOHALLEM, *et al.* 2008; FARIA, 2015). Correia (2003) recomenda que sejam usadas faixas interpretativas para a classificação do Coeficiente de Variação, conforme Tabela 2, apresentada a seguir.

**Tabela 2 – Classificação do Coeficiente de Variação (CV).**

Baixa dispersão	Média dispersão	Alta dispersão
$CV \leq 15\%$	$15\% \leq CV \leq 30\%$	$CV \geq 30\%$

Fonte: Correia (2003).

### 2.8.2. Ajustes de curvas (ou regressão)

Para Correia (2003), o diagrama de regressão é um gráfico cartesiano em que cada um dos eixos corresponde às variáveis correlacionadas. A variável dependente (*Y*) situa-se no eixo vertical e o eixo das abscissas é reservado para a variável independente (*X*). A configuração geométrica do diagrama de dispersão pode estar associada a uma linha reta (correlação linear) ou uma linha curva (correlação curvilínea). Essas linhas podem ser chamadas de “linha de tendência”, pois procuram acompanhar a tendência da distribuição de pontos (que pode corresponder a uma reta ou a uma curva).

No caso de uma série de pontos (*X* e *Y*) que estabelecem o comportamento de um sistema, a mesma pode ser descrita em forma de função. Se o gráfico resultar numa reta deve-se utilizar a expressão  $Y = a.X + b$  e caso seja parábola com vértice na origem pode-se pensar escolher a função  $Y = a.X^b$ , assim por diante. O problema consiste em determinar os parâmetros da função geral (SILVA & SILVA, 1998).

Segundo Farias, R. (2011), um parâmetro estatístico usado para a análise dos ajustes é o coeficiente de correlação (ou alternativamente, o coeficiente de determinação). Este coeficiente indica o quanto dois conjuntos de dados, com “*N*” valores cada, estão correlacionados entre si. Deve-se ressaltar que o coeficiente de determinação  $r^2$  é o quadrado do coeficiente de correlação (*r*).

Isaia *et al.* (2009) realizaram pesquisa de análise estatística de variáveis influentes na microestrutura e durabilidade de concretos com adições minerais. Os estudiosos utilizaram

uma classificação para as análises de regressão, dividido em quatro grupos, e de acordo com o valor do coeficiente de determinação ( $r^2$ ): muito forte se o  $r^2$  for maior ou igual a 0,90; forte se  $0,70 \leq r^2 < 0,90$ ; média se  $0,40 \leq r^2 < 0,70$ ; fraca se  $r < 0,40$ .

### 2.8.3 Comparação das médias dos tratamentos

Izquierdo (2011) realizou trabalho com objetivo de analisar a influência do tipo de argamassamento na resistência à compressão da alvenaria com blocos de concreto. Nas análises do trabalho, o pesquisador admitiu como hipótese nula, a igualdade entre as médias a um nível de 5 %, ou seja, o valor de  $\alpha = 0,05$ . As análises foram realizadas utilizando o *software* Excel.

Zanelatto *et al.* (2013) realizaram pesquisa com intuito de avaliar a influência da técnica de execução no comportamento de revestimento de argamassa. Os autores utilizaram o modelo da ANOVA, pelo Teste F, considerando que o método aplica a hipótese  $h_0$  para os casos que as médias dos resultados obtidos são iguais ( $h_0 = \bar{x}_1 = \bar{x}_2 = \bar{x}_3 = \bar{x}$ ) e, para testar a hipótese, calcula-se o valor P. Valores P menores do que o nível de significância adotado (5% ou 0,05) indicam a rejeição de  $h_0$ , isto é, as médias da variável estudada não são iguais. Por sua vez, para valores P maiores ou iguais ao nível de significância adotada indicam aceitação de  $h_0$ , significando que, as médias da variável estudada são iguais.

Para Acevedo *et al.* (2015), a análise de variância objetiva verificar a existência de diferença significativa entre as médias, e se os fatores exercem influência em alguma variável dependente. O princípio da análise de variância é comparar a média e a dispersão dos dados entre grupos de amostras com a dispersão observada dentro dos grupos. Essa análise admite como hipótese nula que os valores médios de todos os tratamentos são iguais ( $F_{calculado} < F_{crit}$ ). Se  $F_{calculado} > F_{crit}$  rejeita-se a hipótese nula, ou seja, pelo menos um dos valores é diferente (SILVA *et al.*, 2016).

### **3. MATERIAL E MÉTODOS**

Este trabalho de pesquisa foi composto de 04 (quatro) etapas, assim definidas: planejamento da pesquisa; caracterização física; caracterização mecânica e caracterização térmica das argamassas.

A etapa inicial do planejamento, que consistindo na definição dos componentes que servirão de base à pesquisa, foi formada pelas seguintes atividades: definição dos componentes; definição dos processos de preparação das argamassas e corpos de prova; definição da caracterização física e mecânica; definição da caracterização térmica das argamassas.

Na segunda etapa foi realizada a investigação experimental, em laboratório, voltada para a caracterização física, com a realização dos ensaios de índice de consistência, densidade (no estado fresco e endurecido) e absorção de água por capilaridade.

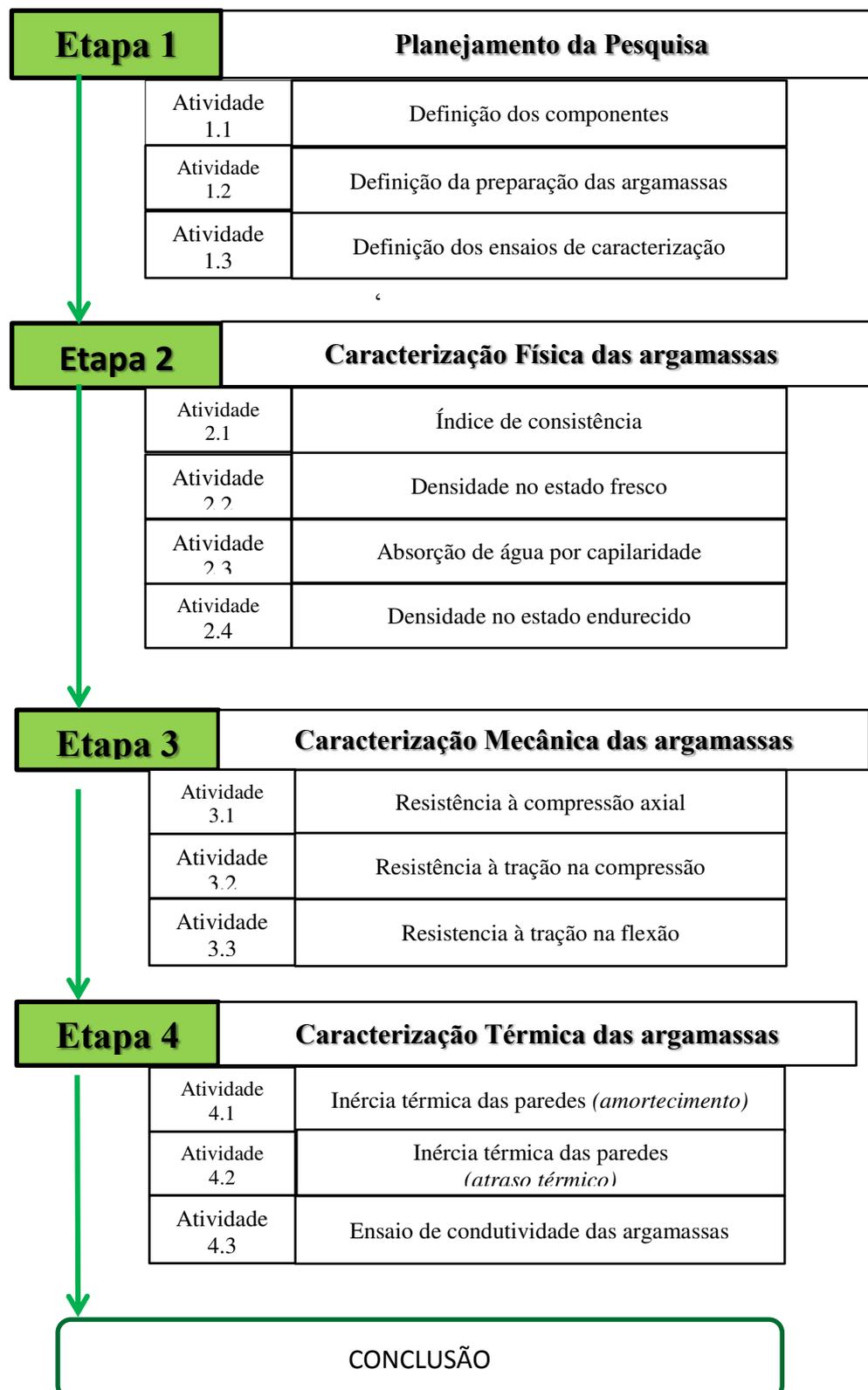
A terceira etapa se referiu a caracterização mecânica das argamassas através dos ensaios de resistência à compressão e à tração (por compressão diametral e na flexão).

Por fim, na quarta e última etapa foi realizada a caracterização térmica dos compósitos. Foram realizados ensaios para cálculo do coeficiente de condutividade, além da determinação do amortecimento e do atraso térmico.

Na formulação do fluxograma desta pesquisa, ressaltou-se a necessidade de proceder o detalhado planejamento, considerando que esta etapa é extremamente importante. Posteriormente, foram desenvolvidas as atividades inerentes as pesquisas, coletando cuidadosamente os dados dos ensaios, realizando os devidos cálculos conforme define a literatura pertinente e procedendo a análise estatística. Na Figura 4 é apresentado o fluxograma dos trabalhos desenvolvidos nesta pesquisa.

Os ensaios foram realizados no segundo semestre de 2018 e no primeiro semestre de 2019, no Laboratório de Construção Rurais e Ambiente (LACRA) e no Laboratório de Caracterização de Materiais, ambos instalados na Universidade Federal de Campina Grande.

**Figura 4-** Fluxograma dos trabalhos desenvolvidos nesta pesquisa.



### **3.1. Planejamento para caracterização dos materiais e das argamassas**

Os materiais empregados nas argamassas que serviram de estudo para esta Tese foram: O cimento Portland CP II-Z-32, areia natural, água potável e borracha reciclada de pneu veicular (em formato arredondado). A especificidade dos materiais obedeceu à necessidade intrínseca do projeto e a disponibilidade dos mesmos no comércio local.

Inicialmente, foram realizados os ensaios para caracterização dos agregados miúdos que compõem a argamassa, a saber: a areia natural e a borracha de pneu. Após esta etapa, foram definidas as proporções (do cimento e dos agregados) para a composição de 6 misturas de argamassas, bem como a moldagem, desmoldagem e cura dos compósitos. Por fim, foram feitos os ensaios de caracterização física, mecânica e térmica dessas argamassas.

#### 3.1.1. Definição dos componentes das argamassas

##### *3.1.1.1 Do cimento portland*

O cimento utilizado foi o Portland composto com pozolana, CP II-Z-32, da marca Elizabeth. A opção por este aglomerante levou em consideração a constatação de que o cimento composto com pozolana é um material de fácil aquisição e tem sido amplamente empregado em argamassas de revestimento na cidade de Campina Grande-PB. O cimento foi estocado em local seco, coberto e fechado, de forma a protegê-lo da ação da água oriundo de chuva, do piso e das paredes externas.

##### *3.1.1.2. Da areia*

A areia natural esteve presente em todas as composições estudadas, exercendo a função de principal agregado.

Foram realizados ensaios para determinação da massa unitária, obedecendo aos procedimentos definidos pela NBR NM 45 (ABNT, 2006). Previamente a este ensaio, foi feito o quarteamento da amostra.

Os ensaios para determinação da massa específica e da massa específica aparente deste agregado miúdo obedeceram ao método estabelecido pela NBR NM 52 (ABNT, 2003). A massa específica é a relação entre a massa do agregado seco e seu volume, excluindo os poros permeáveis, enquanto que a massa específica aparente é a relação entre a massa do agregado seco e seu volume, incluindo os poros permeáveis.

Foi efetuado um estudo para composição de granulometria deste agregado, sendo que o experimento seguiu as exigências prescritas na NBR NM 248 (ABNT, 2003). O ensaio de peneiramento utilizou um conjunto de peneiras como pode ser visualizado na Figura 5. O conjunto de peneiras usado corresponde às malhas 4,8mm, 2,4mm, 1,2mm, 0,6mm, 0,3mm e 0,15mm, com fundo coletor e tampa.

**Figura 5** – (a) areia natural; (b) série de peneiras instalada em mesa vibratória.



Para composição granulométrica, foram calculadas as porcentagens dos materiais retidos e acumulados em cada peneira. Foi determinado o módulo de finura, a partir do somatório das porcentagens retidas acumuladas da areia e posteriormente, dividida por 100. Por fim, foi definida a dimensão máxima, característica deste agregado considerando a malha da peneira, na qual, a areia apresentou porcentagem retida acumulada igual ou inferior a 5% em massa. Destaca-se que, antes de todos os ensaios, a areia foi submetida ao processo de secagem em estufa de modo a evitar interferência da umidade nos seus resultados.

### *3.1.1.3 Da água potável*

A água utilizada nas misturas das argamassas estudadas foi proveniente do sistema de abastecimento público da cidade de Campina Grande-PB (gerenciado pela Companhia de Água e Esgoto da Paraíba - CAGEPA). É importante informar, neste caso, que não foram realizados ensaios para caracterização deste líquido.

Para a obtenção adequada de propriedades, como a consistência (trabalhabilidade) e a resistência, foi definida a utilização de diferentes quantidades de volumes de água na preparação das argamassas. A variação do volume de água se deve, também, para manter os valores da relação água por volume seco dos componentes da argamassa, ou compósito, dentro da uma mesma faixa.

#### *3.1.1.4. Da borracha reciclada de pneu*

A borracha reciclada de pneu utilizada foi adquirida na Fábrica Antônio Raposo Sobrinho, localizada em Campina Grande, com loja comercial na Rua João da Silva Pimentel, Centro- Campina Grande (PB).

A borracha reciclada de pneu foi submetida à determinação da granulométrica conforme definido pela NBR 248 (ABNT, 2003). Também foi calculada a dimensão máxima característica da partícula de borracha, bem como foi realizado o cálculo do seu módulo de finura.

Foram procedidos, ainda, pesquisa para determinação da massa unitária e da massa específica aparente da borracha reciclada de pneu empregada nas composições, obedecendo, respectivamente, aos princípios das normas NBR NM 45 (ABNT, 2006) e NBR NM 52 (ABNT, 2003).

#### *3.1.2. Definição da preparação das argamassas e dos corpos de prova*

Foi definido que as diferentes composições dos tratamentos a serem estudados correspondem às misturas envolvendo um aglomerante (cimento) e dois agregados (areia e borracha reciclada de pneu). As proporções dos elementos componentes das argamassas foram definidas em massa.

Para a realização dos ensaios das propriedades físicas, mecânicas e térmicas foi estabelecida a argamassa de referência composta de cimento e areia fina, no traço 1:5 (em massa), com relação água/cimento que garanta boa consistência da argamassa. A partir da argamassa de referência, procedeu-se a definição de 05 (cinco) compósitos do tipo alternativos, sendo que, as dosagens destes tratamentos foram determinadas com base nas inserções de teores de 5, 10 15, 20 e 25% de massa de partículas de borracha de pneus em substituição da massa da areia fina. Na Tabela 3 são apresentados os teores de cada um dos componentes das argamassas desse trabalho experimental.

**Tabela 3-** Tratamentos/Composições das argamassas utilizadas (massa).

COMPOSIÇÃO	TA_R (0%BP)	TAB_5 (5%BP)	TAB_10 (10%BP)	TAB_15 (15%BP)	TAB_20 (20%BP)	TAB_25 (25%BP)
CIMENTO (g)	250	250	250	250	250	250
AREIA (g)	1250	1187,5	1125	1062,5	1000	937,5
BORRACHA (g)	0	62,5	125	187,5	250	312,5
Água (mL)	200	215	235	255	280	300

O acréscimo do volume de água ocorreu em razão do aumento do volume da borracha reciclada de pneus que substituiu a areia natural, de modo a manter constante a relação água e materiais secos da argamassa. A relação água e cimento ( $r_{a/c}$ ) obedeceu à pesquisa experimental feita através do espalhamento, por índice de consistência, observando que esta relação oscilou entre 0,80 a 1,20.

Para a preparação das argamassas, foi definido que o cimento, a areia e a borracha reciclada de pneus fossem medidos em grama. A quantidade de argamassa preparada corresponde à necessidade da sua utilização imediata, não ocorrendo, sob nenhuma hipótese, o caso de argamassa “guardada por mais de 10 minutos”.

Para efeito desta tese, foi decidido que os ensaios para a caracterização mecânica estariam subordinados a dois tipos de imposições (fatores), considerando uma combinação do teor de borracha e da idade (tempo de cura). Em relação aos ensaios de caracterização física e térmica foi considerado apenas um fator (tratamento), a quantidade de borracha.

### 3.1.3. Definição da caracterização física e mecânica das argamassas

No que diz respeito as amostras, foi determinado que os corpos de provas a serem submetidos aos diversos ensaios para caracterização física e mecânica fossem moldados, desmoldados e curados no Laboratório de Construção Rurais e Ambientância da UFCG, instalado no campus I desta Universidade.

Com base no planejamento, foi estabelecido que, inicialmente, fosse procedida a caracterização física e depois, fossem realizados os ensaios para análise de caracterização mecânica.

Para o trabalho de caracterização física foi decidido que seriam realizadas pesquisas experimentais em 2 (dois) estados diferentes das argamassas. A princípio os ensaios com argamassas no estado fresco e em seguida no estado endurecido.

As argamassas descritas anteriormente foram, portanto, caracterizadas sobre o aspecto físico e mecânico, obedecendo à normatização pertinente, conforme descrita no Quadro 3, apresentado abaixo.

**Quadro 3– Caracterização físico-mecânica.**

<b>Caracterização Física – Estado Fresco</b>	
Índice de consistência	NBR 13.276 (ABNT, 2016)
Densidade de massa	NBR 13.278 (ABNT, 2005)
<b>Caracterização Física –Estado Endurecido</b>	
Absorção água por capilaridade	NBR 9.779 (ABNT, 2012)
Densidade de massa aparente	NBR 13.280 (ABNT, 2005)
<b>Caracterização Mecânica – Estado Endurecido</b>	
Resistência à compressão uniaxial	NBR 13.279 (ABNT, 2005)
Resistência à tração por compressão diametral	NBR 7.222 (ABNT, 2011)
Resistência à tração na flexão.	NBR 13.279 (ABNT, 2005).

#### 3.1.4. Definição da Caracterização térmica da argamassa

Foi estabelecido que todos os traços de argamassas seriam submetidos aos experimentos de caracterização térmica, logo após a realização dos ensaios para caracterização físico-mecânica. Os ensaios para caracterização térmica foram agendados para o primeiro trimestre de 2019.

Assim definido, a partir dos ensaios de fluxo térmico (obedecendo aos princípios da transferência de calor e da termodinâmica) foram obtidos os valores do coeficiente de condutividade térmica e o da inércia térmica (amortecimento e atraso térmico) de todas as argamassas em análise.

### 3.2. Desenvolvimento dos experimentos para caracterização físico-mecânica

#### 3.2.1. Realização dos experimentos para caracterização física

Os trabalhos experimentais seguiram os preceitos definidos das normas que designam procedimentos e padrões, elaboradas pela Associação Brasileira de Normas Técnica (ABNT). A análise de caracterização física, da argamassa de referência e das argamassas contendo borracha de pneu, abrangeu os seis traços dos compósitos apresentados na Tabela 1.

No início, ocorreram os estudos dos corpos de prova de argamassa de referência, cuja mistura contém apenas cimento, areia e água, em ato contínuo e imediato, os trabalhos de

investigação experimental contemplaram as 05 (cinco) argamassas denominadas “alternativas”, produzidos com base na substituição parcial da areia natural pela borracha reciclada de pneu em percentuais variados.

### 3.2.1.1- Ensaio do índice de consistência

Este índice permite aferir a trabalhabilidade da argamassa pela análise do espalhamento em seu estado fresco. O valor da relação “água/materiais secos” é muito importante para que se possa alcançar argamassas capazes de garantir a adequada trabalhabilidade.

O ensaio foi realizado de acordo com a NBR 13.276 (ABNT, 2016), iniciando pela a limpeza do tampo da mesa e da parede do molde tronco-cônico. As superfícies da mesa e do molde ficaram ligeiramente úmidas com objetivo de evitar atritos entre os mesmos e a argamassa. Em seguida, o molde de ferro (colocado de maneira centralizada sobre uma mesa *flow-table*, dotada de manivela que proporciona o deslocamento da mesma em movimentos verticais) foi preenchido com argamassa, em 3 (três) camadas sucessivas e de alturas aproximadas. Em cada uma destas camadas, o preenchimento foi sucedido por golpes de soquete em quantidades equivalente a quinze, dez e cinco golpes. Para tanto, utilizou-se soquete metálico, com as dimensões de 170 mm de altura e 25 mm de base de diâmetro. Após os últimos golpes na terceira camada foi executado o rasamento da superfície, passando régua metálica com movimentos curtos de vaivém ao longo da borda do molde.

Uma vez realizado o enchimento do molde foi procedido a desmoldagem da argamassa, ou seja, a retirada do compósito do molde tronco-cônico. Após a desmoldagem e estando a argamassa sobre o tampo da mesa, foi acionada a manivela de modo que a *flow-table* subiu e caiu por 30 vezes no intervalo de tempo de 30 segundos, em processo uniforme. Após a última queda da mesa, foi medido o espalhamento das argamassas em estudo, sendo que nestas medições foram realizadas as leituras de diâmetros diferentes, conforme consta na Figura 6. Foram registradas 03 (três) medidas dos diâmetros, calculadas a sua média e estabelecida à relação água/materiais secos para cada uma das 06 (seis) composições de argamassas estudadas.

Assim sendo, o índice de consistência da argamassa corresponde à média das três medidas de diâmetro, expressa em milímetros e arredondada ao número inteiro mais próximo. Tomou-se por referência que o espalhamento das porções submetidas aos ensaios na mesa *flow-table* deve ser de  $255 \pm 10$  mm.

Figura 6 - Desenvolvimento dos ensaios de consistência. (a) equipamentos; b) desmoldagem; c) conferência do cálculo do diâmetro; d) 3 medidas para cálculo da média.



### 3.2.1.2- Densidade de massa da argamassa no estado fresco

A densidade de massa no estado fresco afeta diretamente a trabalhabilidade da argamassa, visto que quanto mais leve o material, melhor ele se apresenta para trabalhar. Para o cálculo da densidade de massa dos compósitos, foi procedido ensaio de acordo com a NBR 13.278 (ABNT, 2005), realizado, inicialmente, a aferição da capacidade volumétrica de um cilíndrico metálico, assim como foi registrado a sua massa ( $M_v$ ), estando devidamente vazio. De maneira contínua, foi preparada a argamassa e colocada imediatamente dentro do cilíndrico, em três camadas sobrepostas, e sendo cada camada devidamente adensada. Para o adensamento, foram aplicados 20 (vinte) golpes ao longo do perímetro, tendo destacado cuidado para que não se atingisse o fundo do cilindro, nem as camadas adjacentes. Depois da execução do golpeamento das camadas, o adensamento da camada era completado executando-se 3 (três) quedas sucessivas do recipiente metálico em altura de 3 cm.

Concluído o enchimento do molde procedeu-se o nivelamento do topo da argamassa usando régua metálica. Após a eliminação de partícula e da água aderida na parede externa do recipiente, realizou-se a pesagem e o registro da massa do molde com argamassa ( $M_c$ ). O cálculo da densidade de massa das argamassas no estado fresco ( $d$ ), expresso em gramas por centímetro cúbico, foi realizado utilizando-se a Equação 7, abaixo descrita:

$$d = \frac{(M_c - M_v)}{V_r}$$

Equação 7

onde:

$d$  = densidade de massa da argamassa no estado fresco ( $\text{g.cm}^{-3}$ );

$m_c$  = massa do recipiente cilíndrico contendo a argamassa de ensaio, em gramas;

$m_v$  = massa do recipiente cilíndrico vazio, em gramas;

$v_r$  = volume do recipiente cilíndrico, em centímetros cúbicos.

### 3.2.1.3- Densidade de massa aparente no estado endurecido

O ensaio foi procedido de acordo com a NBR 13.280 (ABNT, 2005). Iniciou-se com a moldagem de corpos de prova prismático para todas as composições de argamassa estudada, consistindo em materiais prismáticos medindo 40 x 40 x 160 mm. Após a desmoldagem, estas amostras passaram por um processo de cura, por um período de 28 dias.

Passado este período, foram medidas as três dimensões (comprimento, largura e altura) de todos os corpos de prova, de modo a possibilitar o cálculo do seu volume. As dimensões foram realizadas com um paquímetro digital Stainless Hardened - MTX, com resolução de 0,01 mm e fundo de escala 150 mm. Em seguida, foi feita a pesagem das amostras utilizando a balança Marte AS-2000C, instalada no LACRA/CTRN/UFCG. Uma vez conseguidos os dados de volume (V) e da massa (M), foi calculada a densidade de massa no estado endurecido de cada tratamento. Para tanto, foi utilizada a Equação 8 dada abaixo.

$$\rho = \frac{M}{V} \quad \text{Equação 8}$$

onde:

$\rho$  = densidade de massa aparente, em  $\text{g.cm}^{-3}$ ;

M = massa do corpo de prova, em grama;

V = volume do corpo de prova, em  $\text{cm}^3$ .

### 3.2.1.4- Absorção de água por capilaridade

A absorção de água por capilaridade é uma propriedade que permite analisar a obtenção da quantidade da massa de água absorvida, em função da área de contato do corpo de prova, num processo de infiltração por pressão vertical ascendente.

O ensaio para determinar a absorção de água foi realizado de acordo com a NBR 9.779 (ABNT, 2012). É observado o processo da ascensão capilar dos corpos de prova, utilizando amostras cilíndricas para cada tratamento. É considerado o aumento de massa dos corpos que foram imersos, parcialmente, em água por um período de tempo pré-definido.

Após a desmoldagem, os corpos de prova foram colocados em estufa sob temperatura de  $105 \pm 5$  °C, sendo pesados em intervalo de tempo de 2 horas, até atingir a constância de massa. Em seguida, o corpo-de-prova foi resfriado ao ar com temperatura de  $23 + 2$  °C, tendo sua massa e área da base devidamente calculada.

Os corpos-de-prova foram colocados em um recipiente preenchido com água, de modo que o nível d'água permaneceu constante em 5 mm acima da face inferior do corpo de prova (evitando a molhagem de outras superfícies), conforme é apresentado na Figura 7.

Durante o ensaio, foram determinados os pesos dos corpos-de-prova no intervalo de tempo de 3, 6, 24, 48 e 72 h, contados a partir da colocação destes em contato com a água. Antes das pesagens, as amostras eram previamente enxutas com pano seco.

**Figura 7-** Ensaio de absorção de água por capilaridade.



A absorção de água por capilaridade (expressa em  $\text{g.cm}^{-2}$ ) foi alcançada utilizando a Equação 9:

$$A_{cap} = \frac{M_t - M_o}{S} \quad \text{Equação 9}$$

$A_{cap}$  = absorção de água por capilaridade, para cada tempo, em  $\text{g.cm}^{-2}$ ;

$M_t$  = a massa do corpo de prova em cada tempo, em gramas;

$M_o$  = massa inicial do corpo de prova, em gramas;

$S$  = área do corpo de prova, em centímetros quadrados.

### 3.2.2. Realização dos experimentos para caracterização mecânica

A resistência mecânica das argamassas de revestimento de alvenaria está relacionada à capacidade do material em apresentar, no estado endurecido, rigidez capaz de resistir às tensões simultâneas de tração, compressão e cisalhamento.

Por outro lado, deve-se ressaltar que, diferente do concreto usado nas peças estruturais de habitação rural, as argamassas de revestimento não apresentam elevadas resistências mecânicas.

#### 3.2.2.1-Resistência à tração na flexão

O ensaio de resistência à tração na flexão, do tipo destrutivo, caracteriza as argamassas considerando a sua capacidade de suportar carga. Foi procedido o ensaio de acordo com a NBR 13.279 (ABNT, 2005). Para a realização do ensaio, utilizam-se moldes prismáticos de argamassas apoiados sobre dois pontos distando entre si em 100 mm. Logo após o preparo da argamassa, foi realizada a moldagem de corpos de prova prismáticos para cada uma das 06 (seis) composições, sendo confeccionadas amostras prismáticas com as dimensões de comprimento de 160 mm, largura 40 mm e altura de 40 mm. A desmoldagem, por sua vez, foi realizada 48 horas depois. Na sequência, os corpos de provas foram submetidos à cura em tanque de água, sendo procedidas as suas rupturas nas idades de 7, 14, 21 e 28 dias.

O rompimento das amostras foi realizado numa máquina universal, marca Emic, modelo DL 2000, submetido a um carregamento contínuo (pelo dispositivo de carga) em 50 N.s<sup>-1</sup>, até ocorrer à ruptura. Na Figura 8 é apresentada a realização do ensaio resistência à tração na flexão.

**Figura 8-** Ensaio de resistência á tração na flexão.



A resistência a tração na flexão ( $R_{t,f}$ ) é a média das resistências individuais, desconsiderando os valores discrepantes se o desvio absoluto máximo estiver acima de 0,3 MPa, conforme determinado na Norma Técnica 13.279 (ABNT, 2005). A resistência individual é calculada utilizando a Equação 10:

$$R_{t,f} = \frac{1,5 F L}{40^3} \quad \text{Equação 10}$$

onde:

$R_{t,f}$  é a resistência à tração na flexão, em megapascals (MPa);

F é a carga aplicada verticalmente no centro do prisma, em Newtons (N);

L é a distância entre os suportes, expresso em milímetros (mm);

Os resultados foram tratados estatisticamente conforme estabelecido pela Norma 13.279 (ABNT, 2005) para determinar o desvio absoluto máximo ( $DA_{max}$ ), sendo desconsiderados todos os valores discrepantes nos eventuais casos em que  $DA_{max}$  fosse superior a 0,3 MPa. Os ensaios de rompimento foram realizados no Laboratório de Caracterização de Materiais vinculado à Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais-UFCG.

### 3.2.2.2- Resistência à compressão axial

O ensaio foi realizado de acordo com a NBR 13.279 (ABNT, 2005). Os experimentos para determinação de compressão axial das argamassas ocorreram aos 7, 14, 21 e 28 dias após a moldagem das amostras, sendo utilizada máquina de ruptura instalada no Laboratório de Construções Rurais e Ambiente (LACRA) da UFCG, conforme é apresentada na Figura 9.

**Figura 9-** Ensaio de resistência à compressão.



Para este experimento foram utilizadas as metades dos prismas oriundos do ensaio de resistência à tração na flexão e para cada prisma rompido no ensaio por flexão foram obtidos 2 (duas) amostras para os experimentos de resistência à compressão. Este experimento foi realizado, portanto, utilizando um conjunto de 06 (seis) prismas para cada tratamento de argamassa estudada.

O experimento consistiu em aplicar carga de compressão numa área 40 x 40 mm do prisma até a ruptura do material. Deve-se destacar que a face rasada do corpo de prova ficou na posição lateral em relação aos dispositivos de carga. Com as cargas de ruptura dos corpos de prova, foram calculadas as médias das resistências individuais de todas as composições de argamassa, por meio da Equação 11.

$$R_c = \frac{F_c}{1600}$$

Equação 11

onde:

$R_c$  é a resistência à compressão, em MPa;

$F_c$  é a carga máxima aplicada, em Newtons;

1600 é a área da seção do dispositivo de carga, medindo 40 x 40 mm.

Os resultados foram tratados estatisticamente de acordo com as determinações da Norma 13.279 (ABNT, 2005) para determinar o desvio absoluto máximo ( $DA_{max}$ ), sendo desconsiderados todos os valores discrepantes nos eventuais casos em que  $DA_{max}$  fosse superior a 0,5 MPa.

### 3.2.2.3- Resistência à tração por compressão diametral

Após os procedimentos de preparação de argamassa, além da moldagem e da desmoldagem, os corpos de prova foram colocados em tanque de água para processo de cura. Foram confeccionadas amostras de formato cilíndrico medindo 50x100 mm (diâmetro x altura) para cada tratamento, e realizadas as rupturas aos 7, 14, 21 e 28 dias após moldagem. A prensa mecânica utilizada neste ensaio foi à mesma usada no ensaio de compressão axial.

Para a realização deste ensaio foram colocadas taliscas de madeira na lateral de corpos de provas cilíndricos e, em seguida, as amostras foram colocadas no dispositivo da máquina de compressão, em posição horizontal, possibilitando distribuir as cargas segundo seu plano diametral. Em ato contínuo, foi aplicado um carregamento, de modo progressivo e sem choques, até a ocorrência da ruptura por separação das 2 (duas) metades deste corpo, conforme o plano longitudinal do corpo de prova. Nas Figuras 10 e 11 constam os procedimentos relacionados a este ensaio.

**Figura 10-** Esquema do ensaio de resistência à tração por compressão diametral.



**Figura 11** - Ensaio de resistência à compressão diametral. a) corpo com talisca de madeiras; b) corpo de prova submetido a carregamento; c) corpo de prova rompido no plano longitudinal.



Calculou-se a resistência à tração por compressão utilizando a Equação 12:

$$R_{t.c} = \frac{2.F}{\pi.d.L} \quad \text{Equação 12}$$

Onde:

$R_{t.c}$  é a resistência à tração por compressão diametral, em megapascals (MPa);

$F$  é a força máxima obtida no ensaio, expresso em newtons (N);

$d$  é o diâmetro do corpo de prova, expresso em milímetros (mm);

$L$  é o comprimento do corpo de prova, expresso em milímetros (mm).

### 3.3. Desenvolvimento dos experimentos para caracterização térmica

Para a realização dos experimentos de caracterização térmica foram construídos 02 (dois) equipamentos, denominados de “câmaras de fluxo térmico”. Tratam-se de aparatos técnicos que foram submetidos ao processo de transferência de calor (por radiação, condução e convecção) de modo a favorecer a análise térmica das argamassas.

A primeira câmara, de dimensões maiores, teve a função de realizar ensaio para cálculo de inércia térmica, sendo denominada, neste trabalho, como “câmara de fluxo térmico para

*cálculo de inércia*”. A segunda câmara, de dimensões menores, foi utilizada para os ensaios de condutividade, sendo chamada neste trabalho como “*câmara de fluxo térmico para cálculo de condutividade*”.

O ensaio fundamenta-se na obtenção, automatizada, dos valores de temperatura nas superfícies dos revestimentos e no ar, na medição da espessura e área dos compósitos, bem como no fluxo de calor provocado por gradiente térmico. A partir destes valores, torna-se possível determinar o comportamento térmico das alvenarias e argamassas estudadas, utilizando os princípios da transferência de calor e da termodinâmica.

### 3.3.1. Realização dos experimentos para cálculo de inércia térmica

A inércia térmica da alvenaria pode ser analisada pela capacidade de resposta térmica da edificação, relacionado ao amortecimento da temperatura superficial (comparando a temperatura da face oposta com a temperatura da face exposta à fonte de calor), bem como o atraso térmico, demonstrado pelo retardamento temporal entre as temperaturas máximas (oposta e exposta). Nesse viés, amortecimento térmico é um fenômeno que envolve o sistema de vedação da habitação rural e funciona como um redutor das temperaturas internas, servindo, portanto, como indicador da capacidade de isolamento da alvenaria.

#### 3.3.1.1. Simulação térmica para cálculo da inércia térmica da alvenaria

De acordo com os princípios da transferência de calor, pode-se considerar que a alvenaria externa da habitação rural retém parte da energia que flui entre suas faces e que, a quantidade retida tem dependência com as propriedades térmicas dos materiais que constituem esta parede. Daí, entende-se ser fundamental a realização de pesquisas voltadas para avaliação da inércia térmica.

Para esse experimento, em específico, foi utilizada uma câmara climática devidamente instalada no LACRA/CTRN/UFCG. A câmara climática tem área de piso de 5,7 m<sup>2</sup> e com pé-direito de 2,65 m, sendo construída com paredes em chapas de aço laminado com espessura de 0,10 m (dotadas de proteção anticorrosiva e preenchidas com isopor de alta densidade). A câmara climática é formada por sistema integrado de equipamentos, incluindo unidade de refrigeração tipo SPLIT de 18.000 btu.

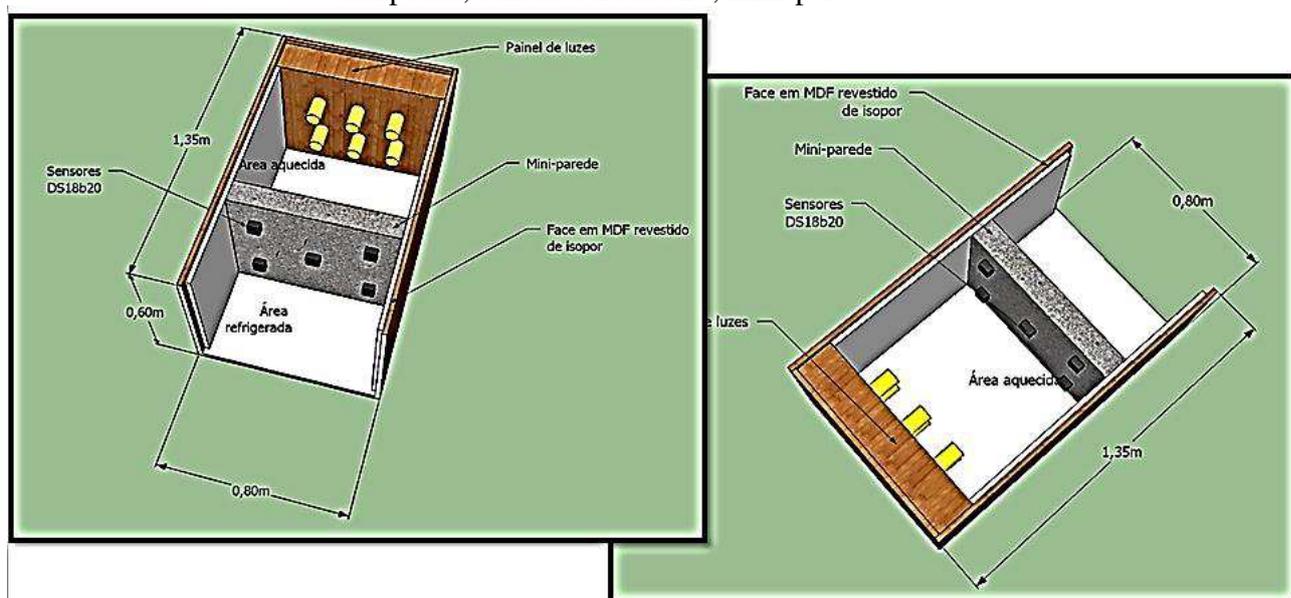
Dentro desta câmara climática foi colocada a “*câmara de fluxo térmico para cálculo de inércia*”, composta por matriz de energia radiante, mini parede e sistema informatizado de

gestão de dados (responsável pelo monitoramento de captação e armazenamento de dados de temperatura).

### 3.3.1.2. Elementos de vedação da "Câmara de fluxo térmico para cálculo de inércia"

A "câmara de fluxo térmico para cálculo de inércia" tem dimensões de 1,35 x 0,80 x 0,60m (Comprimento x Largura x Altura) e foi construída com paredes e forro de madeira, sendo completamente revestidas por placas de isopor com espessura de 30 mm. Essa câmara possui sua face frontal aberta enquanto que todas as demais faces são hermeticamente fechadas. A parte superior da câmara tem pequena abertura, de modo a possibilitar a introdução dos sensores de temperatura. Na Figura 12 é apresentado o esquema de funcionamento da "câmara de fluxo térmico para cálculo de inércia".

Figura 12- Câmara de fluxo térmico para cálculo de inércia em MDF, contendo painel de lâmpadas, sensores Ds18b20, mini parede.



### 3.3.1.3. Painel de Lâmpadas

O aparato experimental foi dotado, também, de uma matriz de calor, cuja função é o aquecimento de uma das faces das mini paredes (chamada de face exposta). Essa matriz de calor (ou fonte radiante) foi composta por um painel em madeira MDF (*Medium Density Fiberboard*), no qual foram instaladas 6 (seis) lâmpadas incandescentes de 100 W, cada. O

painel de lâmpadas teve seu acionamento por intermédio de sistema elétrico conectado na tomada da câmara climática.

#### 3.3.1.4 Minis paredes

Para realização do ensaio de fluxo térmico, com o intuito de conseguir os valores de amortecimento térmico e do atraso térmico, foram procedidos estudos em protótipos construídos especialmente para esta tese. Estes protótipos simularam 04 (quatro) tipos de sistema de vedação vertical externo, sendo um tipo para cada tratamento, conforme apresentado no Quadro 4.

**Quadro 4-** Minis paredes.

<b>Descrição da Mini parede</b>	<b>Nomenclatura</b>	<b>Argamassa no traço 1:5. Quantidade de Borracha reciclada de pneus (%)</b>
Argamassa de referência	MP_0	Zero
Argamassa contendo 10% de Borracha de pneu	MP_10	10%
Argamassa contendo 20% de Borracha de pneu	MP_20	20%
Argamassa contendo 25% de Borracha de pneu	MP_25	25%

As minis paredes foram construídas com dimensões de 0,65 x 0,45 x 0,14 m (comprimento, altura, espessura), sendo utilizados tijolos cerâmicos de 8 furos e argamassa de assentamento no traço 1:5 (cimento:areia). Após 3 dias de construídos, os protótipos receberam chapisco, na composição de 1:3 (cimento: areia). A argamassa de revestimento (reboco) foi aplicada depois de 21 dias de chapiscadas, sendo executado com espessura final de 0,02 m, em cada lado, conforme recomenda a NBR 13.749 (ABNT, 2013). O processo de hidratação da argamassa ocorreu por molhagem das superfícies, no intervalo de tempo de 7 dias posterior a aplicação do reboco. As minis paredes ficaram durante todo o período de 28 dias, na sombra e no final deste ciclo de tempo não foram verificadas existências de fissuras superficiais.

Deve-se destacar que, durante os ensaios, as amostras estudadas foram submetidas à exposição climática mais adversa do que o recebimento de carga térmica direta de radiação solar. Todas as minis paredes foram construídas no LACRA/UFCG e o procedimento de construção pode ser observado na Figura 13.

**Figura 13-** Construção da parede: a) tijolo cerâmico de 8 furos assentado; b) chapisco; c) argamassa de revestimento.



Deve-se salientar que não foram executados serviços de aplicação de massa corrida e tinta sobre as superfícies das minis paredes.

#### *3.3.1.5 Sistema informatizado de gestão e dados*

Foi construído um sistema de monitoramento de dados denominado Sistema Informatizado de Gestão de Dados (SIGD), sendo o mesmo composto por placa de prototipagem, chamada de arduino. Esta placa foi interligada aos sensores de temperatura DS18B20, além das conexões com cartão de memória SD card e relógio. O sistema foi dotado de uma programação que o habilitou para realizar a função de captação e armazenamento das temperaturas a cada minuto. A energia elétrica para o sistema foi fornecida por fonte de tensão AC/DC de 9V/1A.

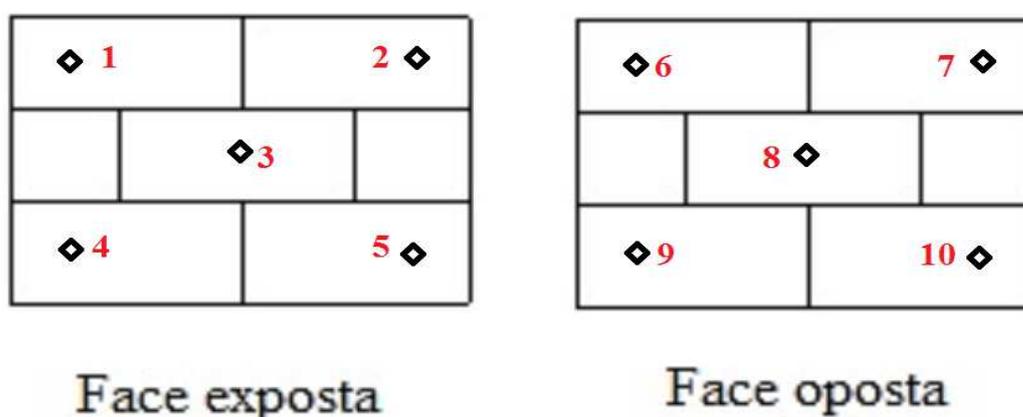
O arduino é uma plataforma de prototipagem cujo micro controlador principal é da família Mega da Atmel. Essa plataforma é um hardware Livre, de baixo custo de compra e de fácil aquisição no mercado. O arduino utilizado nesta pesquisa foi colocado em caixa de PVC medindo 0,30 x 0,20 m, sendo que objetivo deste procedimento foi o de evitar que o arduino ficasse exposto a poeira, a temperatura elevada, aos choques físicos, dentre outros.

#### *3.3.1.6 Realização dos ensaios*

A “*câmara de fluxo térmico para cálculo de inércia*” foi inserida dentro de um ambiente climatizado, ocupando a área central deste. Tanto o aparato experimental quanto o ambiente climatizado, foram ajustados para funcionarem como sistemas hermeticamente fechados, de modo a reduzir interferências (direta ou indireta) provocadas pela radiação solar, ação do vento, precipitações pluviométricas e outras variáveis climáticas. Após o intervalo de 28 dias da sua completa construção, as minis paredes foram colocadas na área interna da “*câmara de fluxo térmico para cálculo de inércia*”, dividindo-a em duas áreas, exposta e oposta a incidência do painel de luz (ver Figura 12).

A face da mini parede chamada de exposta (em posição voltada à fonte radiante) foi colocada à distância de 0,80 m do painel de lâmpadas. Por sua vez, a face chamada de oposta foi colocada em posição contrária a radiação e voltada para área refrigerada por um SPLIT de 18000 *btus*. Todas as aberturas e frestas existentes entre as minis paredes e as faces (laterais e teto) da câmara foram fechadas com isopor e massa corrida. Este procedimento é muito relevante com o intuito de garantir que, dentro da “*câmara de fluxo térmico para cálculo de inércia*”, todo fluxo de energia térmica ocorresse unicamente através das minis paredes, construída com tijolo cerâmico e revestimento com diferentes tratamentos de argamassas. Continuamente se realizou a colocação de 5 (cinco) sensores de temperatura (DS 18B20-tipo encapsulado) em cada face das amostras estudadas. Os sensores foram distribuídos simetricamente na face chamada exposta e, em pontos correspondentes, na outra face (chamada de oposta), conforme pode ser observado na Figura 14.

**Figura 14-** Distribuição dos sensores nas faces das minis paredes.



Para evitar que esses sensores de temperatura fossem expostos à incidência da radiação direta, influenciando no valor das temperaturas registradas, foram colocados, sucessivamente,

fita isolante, silicone e isopor sobre todos os sensores que foram instalados nas duas faces das minis paredes (exposta e oposta), conforme pode ser observado na Figura 15, apresentada a seguir.

**Figura 15-** Instalação dos sensores nas minis paredes. Inicialmente coloca-se os sensores com fita isolante e depois passa silicone. No final coloca isopor sobre os sensores.



Uma vez colocada a instrumentação nas minis paredes, foram realizados os ensaios para determinação das temperaturas das suas faces. O painel de lâmpadas e o ar condicionado foram acionados, simultaneamente, induzindo um fluxo térmico em razão da diferença de temperatura entre as duas faces das amostras e definindo o sentido do fluxo de calor da face exposta, atravessando a mini parede e alcançando a face oposta. Foram registrados no Sistema Informatizado de Gestão de Dados (SIGD), os valores de temperaturas superficiais obtidos pelos 10 (dez) sensores térmicos, obedecendo a um intervalo de tempo de 60 (sessenta) segundos e compreendendo um ciclo de 24 horas de captação das temperaturas das duas faces de cada amostra. A matriz energética (painel de lâmpadas) ficou ligada por um período de 14h00min, tempo necessário para o sistema atingir o regime permanente.

Os valores foram transferidos para a planilha eletrônica Excel (programa da *microsoft Office* 2010), onde se fez a sistematização das temperaturas horárias medidas em cada sensor. Na sequência, foram calculadas as médias de temperaturas dos 05 (cinco) sensores de cada face das minis paredes e, a partir destas médias, foram realizados os cálculos de amortecimento térmico e de atraso térmico.

Os dados coletados no ensaio de fluxo térmico e transferidos para planilhas do *software* Excel, geraram os gráficos referentes ao amortecimento e atraso térmico que são apresentados no capítulo 4- Resultados.

### 3.3.1.7. Cálculo do amortecimento térmico

Os valores de amortecimento térmico ( $\mu$ ) das argamassas estudadas, foram obtidos a partir das análises dos cálculos das amplitudes térmicas da face exposta e da oposta da mini parede. Para tanto, foi utilizada a Equação 5 na realização destes cálculos (devendo ser expresso em percentual). O amortecimento, bem como o atraso térmico, será representado em elementos gráficos, contendo os picos máximos e mínimos das faces das minis paredes, bem como o retardamento térmico.

De posse dos valores obtidos na realização deste ensaio, é possível proceder o trabalho relacionado à análise comparativa entre a argamassa de referência e as argamassas tipo alternativas, quanto à variação das temperaturas das faces opostas, ao longo de um intervalo de 24h de ensaio.

### 3.3.2. Realização de ensaios para cálculo do coeficiente de condutividade

A Condutividade térmica é um parâmetro relacionado à propriedade do material, sendo de muita relevância, visto que, se trata de importante balizador para análise da qualidade do material como elemento contribuinte do bom nível de conforto térmico ambiental. Para a realização do cálculo deste parâmetro, foram executadas as seguintes etapas: (I) confecção das amostras (placas); (II) construção da “*câmara de fluxo térmico para cálculo de condutividade*”; (III) Sistema Informatizado de Gestão de Dados (SIGD); (IV) realização do ensaio de simulação por fluxo térmico nas placas de argamassas.

Para a realização da investigação experimental para cálculo do coeficiente de condutividade térmica, foram adotados os mesmos procedimentos aplicados nos ensaios para o cálculo da inercia térmica das minis paredes, submetidos a semelhantes princípios de transferência de calor.

#### 3.3.2.1. Construção das placas de argamassas

Para a realização desta pesquisa experimental, foi realizada a moldagem de placa de argamassa para cada tratamento. Esta placa foi construída em formato quadrado com seção medindo 0,3 x 0,30 m e espessura de 0,03 m, conforme apresentado na Figura 16. As amostras foram ensaiadas aos 28 dias de cura.

**Figura 16-** Amostra para ensaio de condutividade térmica.



#### 3.3.2.2. Equipamento para simulação térmica de cálculo de condutividade

O equipamento utilizado para cálculo do coeficiente de condutividade das argamassas é denominado, neste experimento, como “*câmara de fluxo térmico para cálculo de condutividade*”, e seu funcionamento está fundamentado na transferência de calor entre 2 (dois) ambientes hermeticamente fechados (sem troca de calor com o ambiente externo) e separados pelas placas de argamassas.

A “*câmara de fluxo térmico para cálculo de condutividade*” é formada por três partes fundamentais: paredes/piso/teto externos, fonte radiante e Sistema Informatizado de Gestão de Dados (SIGD). O equipamento tem medidas de área, perpendicular ao fluxo, com dimensões iguais a da placa (0,30 x 0,30 m) e comprimento de 0,52 m. As paredes são executadas com madeira MDF (*Medium Density Fiberboard*) e seu isolamento feito em isopor de alta densidade, com espessura 0,03 m.

A “*câmara de fluxo térmico para cálculo de condutividade*” tem características semelhantes a que foi usada para ensaio de fluxo térmico nas minis paredes. Porém, o painel radiante é composto de uma lâmpada incandescente 25 W.

Nas Figuras 17 a 20 pode ser observado o esquema do aparato experimental.

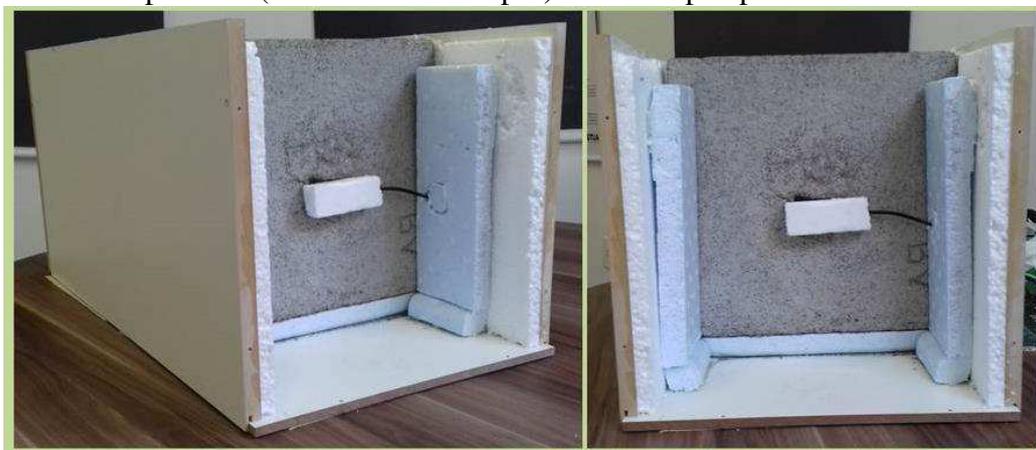
**Figura 17** - Câmara de fluxo térmico, sem a placa de argamassa. Vista em perspectiva e frontal



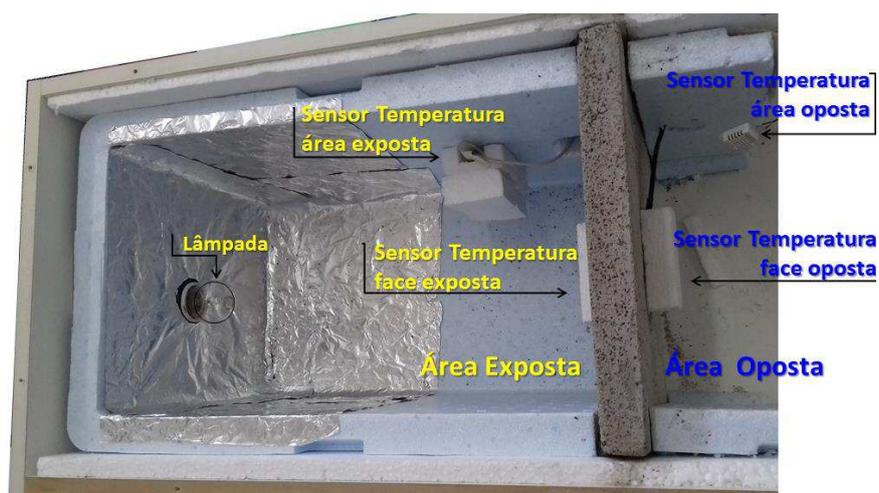
**Figura 18** - Câmara de fluxo térmico com a placa de argamassa e sensores de medição e temperatura, sem silicone e isopor. Vista em perspectiva e frontal



**Figura 19** - Câmara de fluxo térmico com a placa de argamassa, sensores de medição e temperatura (com silicone e isopor) Vista em perspectiva e frontal.



**Figura 20** – Vista superior da Câmara de fluxo térmico com a placa de argamassa



O sistema de medição de temperatura utilizado, foi o mesmo que serviu de captação e armazenamento de dados na pesquisa de simulação térmica para cálculo da inércia das minis paredes. Considerando que as placas de argamassa dividiram a câmara em duas partes, foram colocados sensores de temperatura (DHT 22) em cada um destes ambientes, para registros da temperatura do ar a cada minuto. Foram instalados sensores de temperatura (DS 18b20) no centro de cada face das placas, registrando a temperatura de superfície em igual intervalo de tempo.

### 3.3.2.3 Procedimento do ensaio de fluxo térmico das argamassas

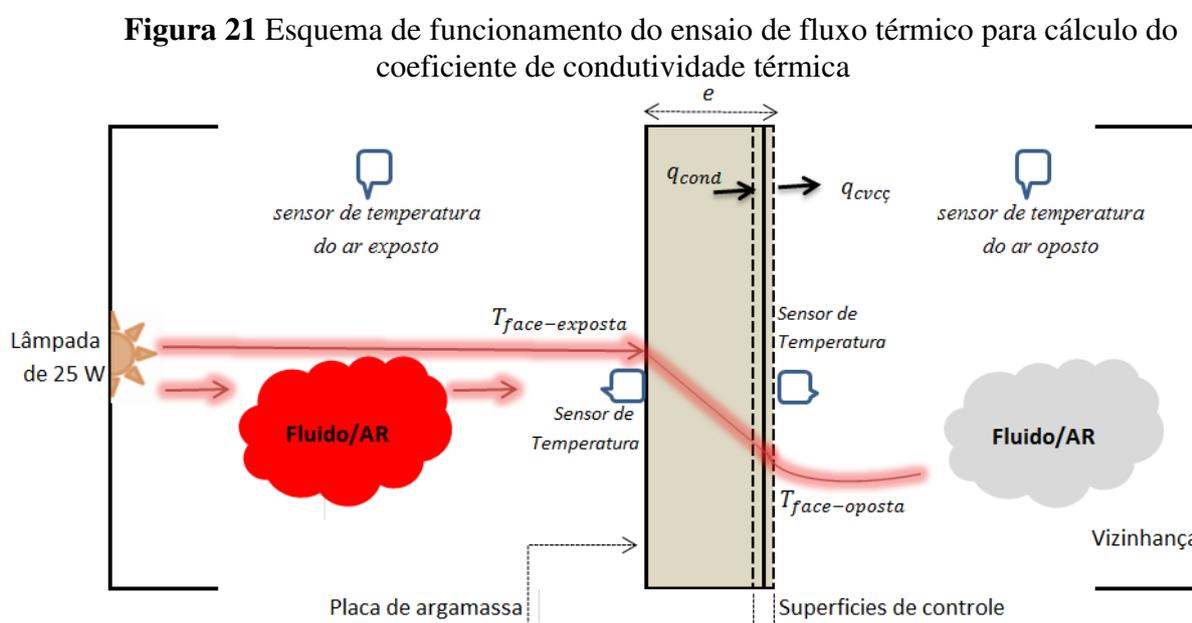
O ensaio para cálculo do coeficiente de condutividade térmica da argamassa se baseia na obtenção da taxa de transferência de calor, da espessura das placas, da área normal ao fluxo de calor, do gradiente de temperatura entre as duas faces das amostras pesquisadas e da temperatura do ar. O processo do cálculo do coeficiente de condutividade térmica ( $k$ ), fundamenta-se na Lei de Fourier para sistema em regime estacionário (em que a temperatura das duas faces das placas planas atingiu um padrão estável).

Para realização dos experimentos de cálculos do coeficiente de condutividade térmica, as amostras foram inseridas na “câmara de fluxo térmico para cálculo de condutividade”. Uma face da placa ficou exposta à matriz de calor (composta por lâmpada incandescente cuja potência era de 25 W), enquanto a outra face era oposta ao painel de lâmpada e sendo refrigerado por sistema de ar condicionado.

A coleta dos dados experimentais necessários para o cálculo do coeficiente de condutividade térmica foi iniciado quando o sistema do aquecimento do ambiente exposto (que fica em localização exposta ao painel de lâmpada incandescente) e o sistema de refrigeração foram acionados, simultaneamente.

Através da fonte radiante ocorreu o aquecimento do fluido interno do ambiente exposto, que se encontrava em estado de repouso. O gradiente de temperatura entre suas regiões provocou um movimento de massa do fluido de modo cíclico, dando origem às correntes convectivas. Assim sendo, o transporte de calor se processou por meio de convecção e de radiação. Quando a radiação e o fluido aquecido atingiram a superfície exposta, da placa de argamassa estudada, gerou um gradiente de temperatura em relação à face oposta. Em seguida, ocorreu fluxo de calor por condução através da placa argamassada, no sentido da face exposta para a oposta.

No ambiente oposto, um fluido (AR), a temperatura  $T_{ar-oposta}$ , moveu-se naturalmente em contato com a superfície da parede de área “A”, e que se encontrava a temperatura  $T_{face-oposta}$ . Como  $T_{face-oposta} > T_{ar-oposta}$  houve transferência de calor da parede para o ar, por convecção. Na Figura 21, a seguir, é demonstrado o esquema de funcionamento do ensaio de fluxo térmico para cálculo do coeficiente de condutividade térmica das argamassas estudadas.



Assim sendo, as amostras foram submetidas a um fluxo de calor gerado por matriz energética alimentada por fonte de tensão regulável. Essa energia térmica fluiu por meio das

amostras, sendo transferida num ambiente refrigerado, formando um fluxo aproximadamente unidimensional, através de paredes planas.

De posse dos registros de dados das temperaturas do ar e das faces da amostra (registrados pelo Sistema Informatizado de Gestão de Dados), foi calculada a taxa de transferência de calor por convecção do ambiente oposto e da condutividade térmica da placa, utilizando as Equações apresentadas a seguir.

Para placa em estudo, pode ser aplicada a Lei de Fourier, que define o valor da taxa de transferência de calor por condução, sendo diretamente proporcional a área normal na direção do fluxo ( $A$ ), inversamente proporcional a espessura da placa ( $e$ ) e diretamente proporcional ao gradiente de temperatura das faces da placa ( $T_{\text{face\_exposta}}$  e  $T_{\text{face\_oposta}}$ ), conforme a Equação 13. A constante de proporcionalidade ( $k$ ) é o coeficiente de condutividade térmica.

$$q_{\text{cond}} = k \cdot A \cdot \frac{T_{\text{face\_exposta}} - T_{\text{face\_oposta}}}{e} \quad \text{Equação 13}$$

em que:

$q_{\text{cond}}$  é a taxa de transferência de calor por condução, em W;

$A$  é a área da superfície exposta da placa, em  $\text{m}^2$ ;

$k$  é o coeficiente de condutividade térmica por condução, em  $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ;

$T_{\text{face-oposta}}$  é temperatura da face oposta da placa, em K;

$T_{\text{face-exposta}}$  é a temperatura da face exposta da placa, em contato com painel radiante, em K;

$e$  é espessura da placa, em m.

Diante do exposto, o valor do coeficiente da condutividade térmica ( $k$ ) pode ser calculado a partir da Equação 14.

$$k = \frac{(e \cdot q_{\text{cond}})}{A \cdot (T_{\text{face\_exposta}} - T_{\text{face\_oposta}})} \quad \text{Equação 14}$$

O cálculo da taxa de transferência de calor por convecção foi realizado utilizando a Lei de resfriamento de Newton, conforme a Equação 15 apresentada a seguir:

$$q_{\text{cvcc}} = A \cdot h \cdot (T_{\text{face-oposta}} - T_{\text{ar-oposta}}) \quad \text{Equação 15}$$

em que:

$q_{cvcc}$  é a taxa de transferência de calor por convecção, em W;

$A$  é a área da superfície exposta da placa, em  $m^2$ ;

$h$  é o coeficiente médio de transferência de calor por convecção, em  $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ;

$T_{ar-oposto}$  é temperatura do fluido no ambiente refrigerado, em K;

$T_{face-oposta}$  a temperatura da face oposta da placa, não em contato com painel radiante, em K.

Considera-se que  $h = 1/Rse$ , onde  $Rse$  tem valor igual a  $0,04 \text{ m}^2 \cdot K \cdot W^{-1}$ , para o ar, de acordo com a NBR 15.220 (ABNT, 2005), considerando a direção do fluxo de calor horizontal, então  $h = 25 \text{ W} \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ . Incropera *et al.* (2008) e Moran & Shapiro (2009) corroboram com este valor de coeficiente de transferência de calor por convecção, informando que o mesmo varia numa faixa entre 2 a  $25 \text{ W} \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ , para diversos gases e em convecção natural.

Conforme o princípio do balanço de energia na superfície da placa/argamassada que fica do lado oposto à fonte, tem-se que o fluxo de calor que chega por condução é igual à taxa de transferência de calor que chega por convecção ( $q_{cond} = q_{cvcc}$ ). Assim, da igualdade dos fluxos na superfície da parede, resulta a Equação 16, apresentada a seguir:

$$k \cdot A \cdot \frac{T_{face\_exposta} - T_{face\_oposta}}{e} = A \cdot h \cdot (T_{face\_oposta} - T_{ar\_oposto}) \quad \text{Equação 16}$$

O painel de lâmpada foi desligado após um intervalo de 4 horas de funcionamento, uma vez que tinha atingido a condição do regime permanente. O tempo de 4 (quatro) horas foi identificado em ensaios prévios aos estudos de cálculo para coeficiente de condutividade térmica.

### 3.4. Análise estatística dos dados

Concluídos todos os ensaios e calculadas as médias de cada grandeza (considerando fatores de tratamento e idade para os casos dos ensaios de resistência mecânica e o fator único -tratamento- para os demais ensaios), foram procedidos os trabalhos relacionados à análise estatística dos dados.

Inicialmente, foi estudada a qualidade dos dados obtidos nos ensaios, sendo feito um estudo de dispersão por desvio padrão da amostra ( $\sigma$ ) e pelo coeficiente de variação (CV). Em

seguida, as médias de tratamentos diferentes foram avaliadas estatisticamente utilizando o diagrama de regressão e o teste F.

### 3.4.1. Medidas de dispersão

Para a análise da série de dados concernente à caracterização mecânica, física e térmica, utilizou-se o desvio padrão das amostras, dada pela Equação 17.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (V_i - V_m)^2} \quad \text{Equação 17}$$

Onde

$V_i$  é o valor individual da grandeza;

$V_m$  é o valor da média da série;

$N$  é o número de amostras

Considerando que o número de valores individuais é pequeno, nos casos dos ensaios com apenas 3 repetições (valores individuais), foi aplicada o coeficiente de correção 1,32, enquanto que nos ensaios para cálculo de resistência à compressão (que teve 5 repetições), o coeficiente de correção foi de 1,14. Todavia, deve-se atentar que foi considerada a probabilidade de 68,3%.

Uma vez calculado o desvio padrão da amostra corrigido, foi verificada a aceitabilidade dos valores individuais a partir da curva gaussiana. Procedeu-se, também, a classificação dos diversos fatores (conjunto de valores individuais submetidos à mesma imposição técnica, considerando a combinação do teor de borracha e da idade) de acordo com os valores obtidos para o coeficiente de variação ( $CV$ ). Para conseguir isso, foi utilizado à classificação aplicada por Isaia *et al.* (2009). Para o caso específico do ensaio de resistência à compressão foi procedido avaliação da eficiência do mesmo.

### 3.4.2. Ajustes de curvas (ou regressão)

Para encontrar a função que melhor descreve a relação entre os resultados obtidos e o teor de borracha, foi feita pesquisa de várias funções ajustadas aos dados experimentais usando o LAB FIT CURVE FITTING SOFTWARE® (<http://zeus.df.ufcg.edu.br/labfit>). Esse

software foi desenvolvido por Silva & Silva (1998), com característica particular: tem uma biblioteca com mais de 200 funções com 1 (uma) variável independente. Se um conjunto de dados for fornecido ao programa, cada função de sua biblioteca é ajustada aos dados experimentais. Os melhores resultados são classificados por comparação de parâmetros estatísticos (qui-quadrado e coeficiente de determinação) referentes a cada ajuste. Esta ferramenta, disponível em opção chamada 'Finder', foi usada com o objetivo de determinar uma função com dois parâmetros para expressar a grandeza desejada, em função do teor de borracha, usando os conjuntos de dados experimentais. O modelo proposto pode ser descrito conforme consta na Equação 18, com apenas dois parâmetros de ajuste:

$$Y(x) = f(x, a, b)$$

Equação 18

onde a e b são os parâmetros de ajuste.

### 3.4.3. Comparação das médias

Foi realizada, também, a análise estatística de comparação das médias dos 06 (seis) tratamentos de cada grandeza. Para isso, utilizou-se a ferramenta estatística conhecida como Análise de Variância (ANOVA). A ANOVA é um teste de hipótese no qual há um controle sobre as médias calculadas, observando uma maior confiança dos resultados.

Foi determinado o valor de  $p$  que define se a variância dos resultados tem diferença significativa ou não. Calculou-se então o grau de liberdade, a soma do quadrado, o quadrado da média e o valor de F, que foi chamado nesta tese de  $F_{calcul}$ . No caso em que o valor de  $p$  foi inferior a 0,05 (5%), o tratamento foi considerado com significância diferença nos valores dos resultados.

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Neste capítulo constam os resultados e discussões relativos às pesquisas desenvolvidas, e que tiveram o intuito de conhecer relevantes propriedades físicas, mecânicas e térmicas das argamassas de revestimento de parede, contendo borracha reciclada de pneu.

Os valores das médias das diversas grandezas estudadas são apresentados na forma de gráficos e tabelas, sendo sucedidos de discussão dos resultados (análise técnica e numérica). Foi realizada, ainda, análise estatística dos dados apresentados.

### **4.1. Ensaio para caracterização dos agregados**

Os ensaios para caracterização dos agregados antecederam o preparo das argamassas, se constituindo de alta relevância para a correta utilização nos compósitos. Procedeu-se então, a investigação experimental de diversos aspectos importantes dos dois tipos de agregados, que serviram de base à confecção das argamassas.

#### **4.1.1 Caracterização da areia**

A Granulometria e o formato da areia atuam como aspectos relevantes nas propriedades das argamassas, a exemplo da trabalhabilidade (agregados de formato arredondados são mais trabalháveis) e da resistência mecânica (argamassas com agregados de forma alongada tem maior resistência devido a maior aderência), interferindo, também, em propriedades como a permeabilidade. Ademais, a granulometria da areia natural realiza expressiva importância em aspectos relacionados ao consumo de água e de aglomerantes.

Na Tabela 4 são apresentados os resultados da pesquisa relativa à composição granulométrica do agregado areia, realizado conforme estabelecido na norma brasileira NBR NM 248 (ABNT, 2003).

**Tabela 4-** Composição granulométrica da areia.

<b>Peneira</b>	<b>Abertura (mm)</b>	<b>Massa (g)</b>	<b>% da amostra total</b>	<b>% acumulado</b>
Nº 8	2,40	9,6	1,93	1,93
Nº 16	1,20	26,4	5,27	7,21
Nº 30	0,60	164,3	32,87	40,07
Nº 50	0,30	179,7	35,94	76,00
Nº 100	0,15	120,0	24,00	100
Dimensão máxima característica (mm)			2,40	
Módulo de finura da areia			2,25	

O estudo da composição granulométrica da areia natural atendeu aos preceitos contidos nas normas técnicas. Observa-se predominância de grãos com diâmetros de 0,30 mm (35,94%), sendo que a maior concentração de grãos deste agregado natural encontra-se entre as faixas de 0,30 mm e 0,60 mm (acumulado de 76%). Portanto, a areia utilizada nesta pesquisa é classificada como areia fina, conforme classificação granulométrica apresentada por Lopes Neto (2017). O valor do módulo de finura da areia natural condiz com valores obtidos por Ferreira (2009), Araújo (2014), Andrade & Guimarães (2017) e Pczieczek (2017).

Na Tabela 5 constam os resultados dos ensaios da massa unitária e massa específica real, com base na norma brasileira NBR NM 45 (ABNT, 2006).

**Tabela 5 -** Massa unitária e massa específica real da areia

<b>Ensaio</b>	<b>Valores</b>
Massa unitária da areia ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	1,42
Massa esp. real da areia ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	2,50

Os resultados alcançados para a massa unitária deste agregado natural estão em conformidade com valores de Marques (2005), Ferreira (2009), Araújo (2014), Canova (2015) e Pczieczek (2017).

#### 4.1.2. Caracterização da borracha reciclada de pneus

Observando a não existência de norma técnica para caracterizar fisicamente a borracha de pneu, foi realizada a caracterização deste material utilizando as determinações básicas previstas para os agregados miúdos tipo convencional, a exemplo do procedimento para a granulometria, a massa unitária e a massa específica real. Deve-se destacar que a borracha de pneu apresentou forma bastante regular e se mostrou muito homogênea. A composição granulométrica da borracha reciclada de pneu é apresentada na Tabela 6.

**Tabela 6-** Composição granulométrica da borracha de pneu.

<b>Peneira</b>	<b>Abertura (mm)</b>	<b>Peso (gr)</b>	<b>% da amostra total</b>	<b>% acumulado</b>
n° 8	2,40	0	0	0
n° 16	1,20	131	26,2	26,2
n° 30	0,60	202	40,4	66,6
n° 50	0,30	98	19,6	86,2
n° 100	0,15	69	13,8	100
Dimensão máxima característica (mm)			2,40	
Módulo de finura da borracha de pneu			2,83	

A granulometria assemelhada a da areia, viabiliza a utilização da borracha reciclada de pneu como agregado para argamassa de revestimento, possibilitando alcançar o desempenho físico-mecânico-térmico em patamares dentro de valores aceitáveis, de acordo com as normas pertinentes. Foi observada predominância de grãos de borracha de pneu com diâmetros de 0,60 mm (40,4%), sendo que, a maior concentração de grãos deste agregado encontra-se entre as faixas que variam de 0,60 a 1,20 mm (acumulado de 66,6%). Portanto, a borracha de pneu utilizada nesta pesquisa é classificada como de “agregado de diâmetro médio”, conforme classificação granulométrica apresentada por Lopes Neto (2017). O valor do módulo de finura condiz com os valores calculados por Meneguini (2003) e Ferreira (2009).

Na Tabela 7 são apresentados os dados referentes aos ensaios da massa unitária e massa específica real.

**Tabela 7-** Massa unitária e massa específica real da borracha.

<b>Ensaio</b>	<b>Valores</b>
Massa unitária ( $\text{g.cm}^{-3}$ )	0,46
Massa esp. real ( $\text{g.cm}^{-3}$ )	0,92

#### 4.2. Caracterização física da argamassa

#### 4.2.1. Índice de consistência

A consistência de argamassa à base de cimento, é uma propriedade influenciada pela quantidade de água e exerce papel importante na trabalhabilidade deste compósito. Os resultados dos ensaios para as composições de argamassas alvo deste estudo são apresentadas na Tabela 8.

**Tabela 8-** Índice de consistência. Tratamentos/Composições das argamassas utilizadas.

<b>COMPOSIÇÃO</b>	<b>TR (0%BP)</b>	<b>TAB_5 (5%BP)</b>	<b>TAB_10 (10%BP)</b>	<b>TAB_15 (15%BP)</b>	<b>TAB_20 (20%BP)</b>	<b>TAB_25 (25%BP)</b>
Espalhamento (mm)	247,12	247,95	248,75	249,72	250,85	251,12
Água/materiais secos	0,1947	0,1932	0,1946	0,1938	0,1956	0,1946

Observando a Tabela 8, constata-se que ocorreram pequenas diferenças entre os espalhamentos dos traços estudados, e que essas argamassas podem ser caracterizadas como de boa trabalhabilidade. Tal assertiva se apoia no fato que foi observado espalhamento (relativo ao índice de consistência) atendendo, em todos os tratamentos, a faixa pré-estabelecida dentro de limites que variavam entre 245 e 265 mm. Percebeu-se que, a quantidade de água inserida favoreceu para que a argamassa pudesse alcançar a medida de referência do espalhamento nessa faixa.

O tratamento com argamassa sem borracha de pneu requereu quantidade ligeiramente maior de água, para alcançar esta faixa do índice de consistência. Pode-se atestar, portanto, que a borracha reciclada de pneu é um elemento que diminui a exigência de água na mistura. Analisando a relação água por material seco vê-se que as diferenças entre os tratamentos são pouco significantes.

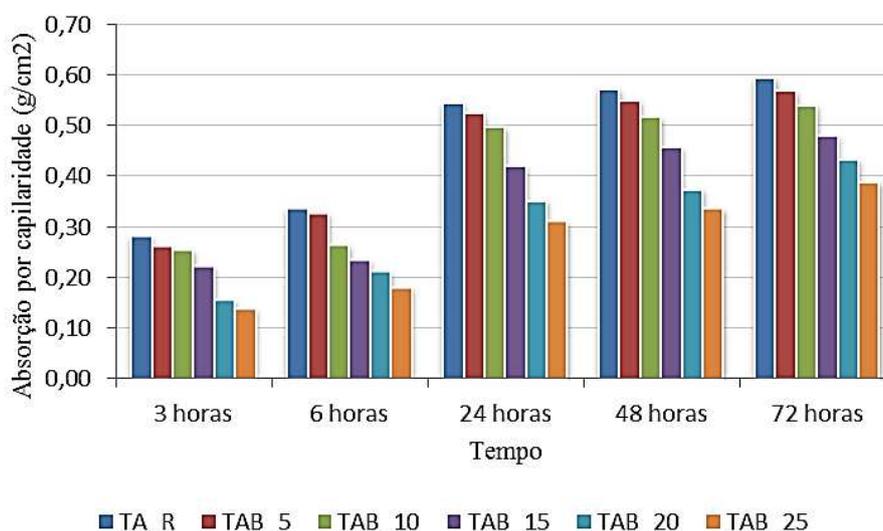
O aspecto em formato arredondado das partículas dos agregados (seja areia ou borracha de pneu) contribui para a existência de capacidade hidrodinâmica no deslocamento dos elementos componentes das argamassas.

Os ensaios permitem identificar que as argamassas contendo borracha reciclada de pneu promovem maior espalhamento dos compósitos, o que pode ser explicado em razão da maior facilidade da movimentação entre as suas partículas. Esses resultados são condizentes com pesquisas realizadas por Meneguini (2003), Ferreira (2009), Canova *et al.* (2015) e Pczieczek (2017).

#### 4.2.2. Absorção de água por capilaridade

O fenômeno de absorção de água por capilaridade é avaliado pelo grau de passagem de água na argamassa endurecida através de infiltração sob pressão. Essa permeabilidade está diretamente submetida à influência da granulometria dos agregados, técnica de execução, traço, água usada mistura, fissuras existentes e porosidade. Na Figura 22, são apresentados os resultados do ensaio de absorção de água por capilaridade para os tratamentos. Foram consideradas a argamassa de referência e as 05 argamassas alternativas, confeccionadas a partir dos diferentes percentuais de substituição de areia natural por partículas de borracha de pneu. O trabalho experimental foi realizado aos 28 dias após a moldagem dos compósitos.

**Figura 22-** Absorção de água por capilaridade.



Foi averiguado que o aumento da inserção da borracha reciclada de pneu provocou redução da absorção de água, quando comparado com a argamassa de referência. Foi observado que, durante o experimento, todas as amostras de argamassas contendo borracha reciclada de pneu apresentaram valores de absorção menores que o da argamassa sem o agregado alternativo (borracha de pneu).

Estes dados estão em conformidade com os trabalhos de: Segre (1999), Meneguini (2003) e Marques (2005) que verificaram que as argamassas cimentícias com borracha reciclada de pneus, estão submetidas a menor absorção de água por capilaridade do que as argamassas convencionais. Vale salientar que, em todas as medidas de tempo, os tratamentos apresentaram incremento na absorção de água, quando comparado com o início do experimento.

Na Tabela 9 constam os valores obtidos nos ensaios de absorção de água por capilaridade, mostrando o tratamento estatístico dos dados. A análise estatística foi realizada utilizando medidas de dispersão (desvio padrão da amostra e coeficiente de variação) e de medidas de ajustamento.

**Tabela 9** - Absorção por capilaridade.

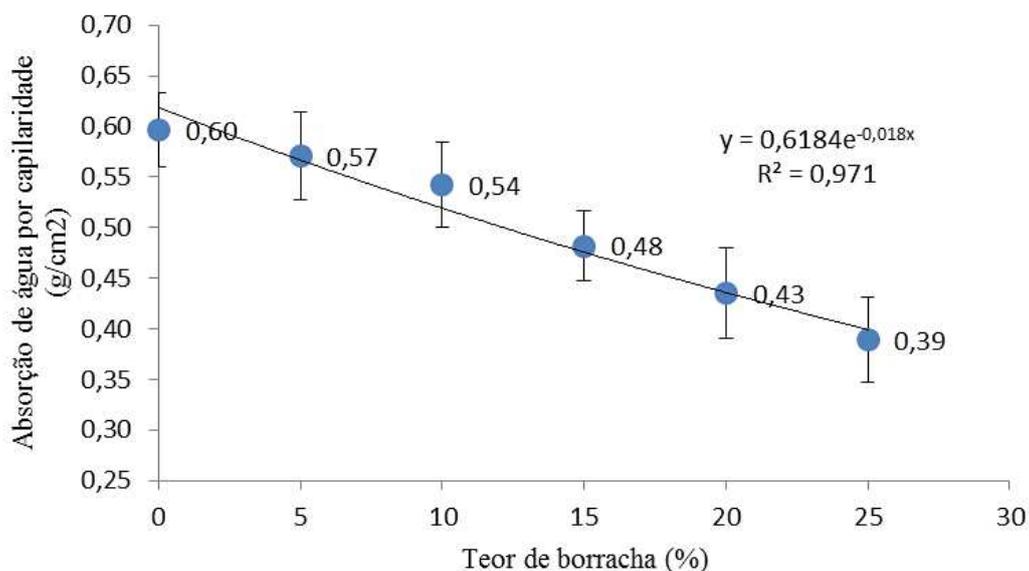
Absorção de água por capilaridade (g/cm <sup>2</sup> )												
	TA_R		TAB_5		TAB_10		TAB_15		TAB_20		TAB_25	
	Absorção de água	$\sigma$	Absorção de água	$\sigma$	Absorção de água	$\sigma$	Absorção de água	$\sigma$	Absorção de água	$\sigma$	Absorção de água	$\sigma$
3 horas	<b>0,28</b>	0,006	<b>0,26</b>	0,004	<b>0,26</b>	0,036	<b>0,22</b>	0,011	<b>0,16</b>	0,006	<b>0,14</b>	0,011
6 horas	<b>0,34</b>	0,015	<b>0,33</b>	0,022	<b>0,26</b>	0,023	<b>0,24</b>	0,016	<b>0,21</b>	0,030	<b>0,18</b>	0,007
24 horas	<b>0,55</b>	0,030	<b>0,53</b>	0,035	<b>0,50</b>	0,035	<b>0,42</b>	0,052	<b>0,35</b>	0,041	<b>0,31</b>	0,014
48 horas	<b>0,57</b>	0,002	<b>0,55</b>	0,011	<b>0,52</b>	0,010	<b>0,46</b>	0,025	<b>0,38</b>	0,019	<b>0,34</b>	0,008
72 horas	<b>0,60</b>	0,037	<b>0,57</b>	0,043	<b>0,54</b>	0,042	<b>0,48</b>	0,035	<b>0,43</b>	0,045	<b>0,39</b>	0,042

As informações numéricas apresentadas na Tabela 9 mostram que, no tempo de 72 horas, a argamassa *TAB-10* (contendo 10% de borracha de pneu) apresentou redução de cerca 10 % da absorção de água em relação à argamassa de referência (*TA\_R*). Fazendo a análise comparativa entre os tratamentos *TAB\_15* e *TAB\_20* com a *TA\_R*, observa-se que esta redução foi de 19,91 e 28,33%, respectivamente, considerando o mesmo período.

A redução de absorção de água por capilaridade ocorreu, dentre outras razões, devido à redução da formação de poros intercomunicáveis na argamassa, bem como da característica hidrofugante da borracha de pneu. É necessário ressaltar que, quanto menor a absorção de água por capilaridade, maior será a estanqueidade da argamassa de revestimento. Portanto, a inserção de borracha reciclada de pneu contribui para a melhoria do desempenho das argamassas concernente a sua função de estanqueidade.

Realizando a análise estatística dos dados, foi constatado que os valores individuais se encontram enquadrados conforme a curva gaussiana, dentro do intervalo  $V_{\text{media}} \pm 3.\sigma$ , não sendo necessário dispensar nenhum valor individual. No entanto, o coeficiente de variação (CV) oscilou na faixa entre 0,4 e 14%. Observando a classificação apresentada por Correia (2003), este conjunto de dados pode ser classificado como de “baixa dispersão”.

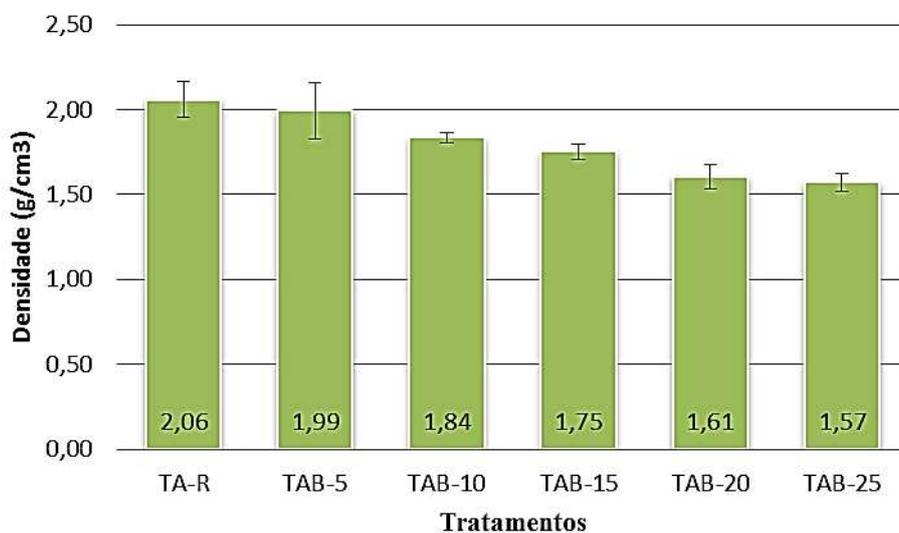
Na Figura 23 se encontra a análise estatística de dados por meio do diagrama de regressão dotado de linha de tendência do tipo curvilínea. É possível avaliar a correlação entre a variável dependente (absorção de água) e a variável independente (teores de borracha de pneu), considerando os dados obtidos nas últimas leituras do ensaio (na duração de 72 horas).

**Figura 23-** Diagrama de regressão para absorção por capilaridade.

Conforme a classificação apresentada por Isaia *et al.* (2009), o diagrama de regressão estudado pode ser classificado como muito forte, visto que o  $R^2$  foi maior que 0,90.

#### 4.2.3. Densidade de massa no estado fresco

Observa-se, na Figura 24, a relação inversa entre a densidade da massa do compósito no estado fresco e o teor de borracha de pneu incorporado na argamassa. As incertezas (do ponto de vista da estatística) apresentadas na Figura abaixo foram calculadas pelo desvio padrão da amostra ( $\sigma$ ).

**Figura 24** – Densidade de massa dos compósitos no estado fresco (g.cm<sup>-3</sup>).

A redução da densidade de massa nos compósitos, pode ser explicada em razão do menor valor de massa unitária da borracha de pneu em relação a da areia (3 vezes menor), o que influencia nas argamassas cimentícias. Infere-se, portanto, que a diminuição gradual da densidade de massa ocorre devido ao aumento do teor de borracha de pneu, devidamente fundamentado no fato que a borracha é um agregado menos denso do que a areia. Os resultados das densidades de massa no estado fresco, para todas as argamassas estudadas, estão de acordo com a literatura que trata o assunto. Esta conclusão condiz com os resultados publicados por Canova *et al.* (2007), Cintra (2013), Pinto & Fioriti (2016) e Pczieczek (2017).

Na Tabela 10 constam os valores médios da densidade de massa no estado fresco para os diferentes traços utilizados nas argamassas estudadas.

**Tabela 10** – Densidade de massa dos compósitos no estado fresco.

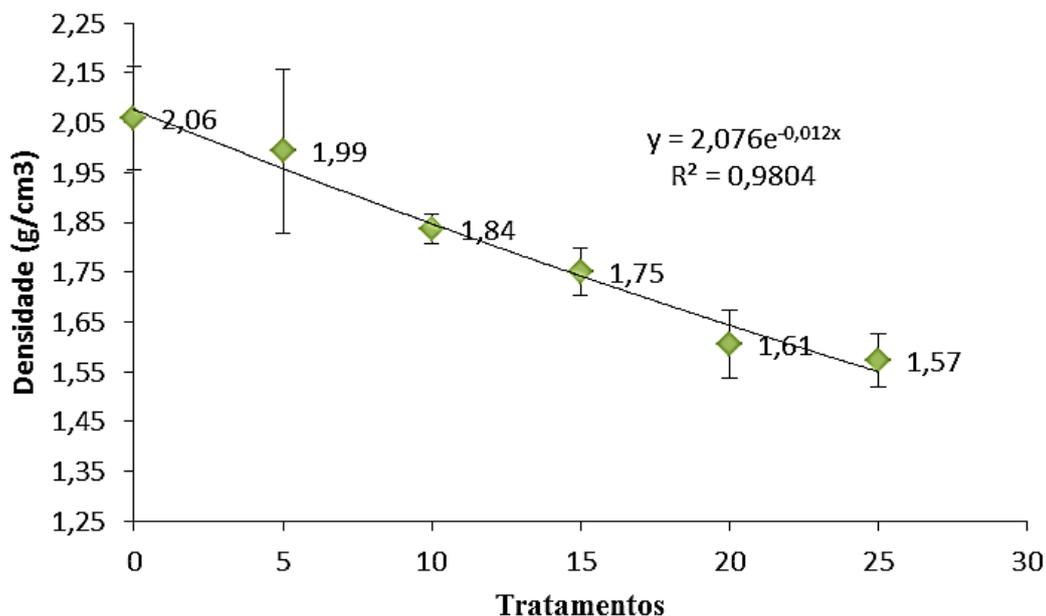
<b>Densidade no estado fresco (g.cm<sup>-3</sup>)</b>			
<b>Descrição</b>	<b>Densidade</b>	<b><math>\sigma</math></b>	<b>CV (%)</b>
Argamassa de referência (TA_R)	2,06	0,103	5,00%
Argamassa contendo 5% de borracha (TAB_5)	1,99	0,165	8,27%
Argamassa contendo 10% de borracha (TAB_10)	1,84	0,030	1,65%
Argamassa contendo 15% de borracha (TAB_15)	1,75	0,048	2,73%
Argamassa contendo 20% de borracha (TAB_20)	1,61	0,069	4,32%
Argamassa contendo 25% de borracha (TAB_25)	1,57	0,053	3,37%

Após análise dos dados apresentados, percebe-se que a inclusão de agregados tipo borracha reciclada de pneus contribui para redução da densidade de massa do compósito, quando comparados com argamassa convencional, em percentual que varia entre 3,39 e 23,63%, dependendo do teor de incorporação e borracha de pneu. A densidade de massa do compósito contendo borracha reciclada com teor de 10% (TAB\_10) sofreu redução de 10,68%. Por sua vez, o valor da densidade das argamassas TAB\_15 e TAB\_20 sofreu redução de 15,05 e 21,86%, respectivamente, em comparação ao valor da argamassa de referência.

Procedendo a análise estatística e avaliando a distribuição normal dos dados por meio da curva gaussiana, observa-se que os valores individuais da densidade de massa estão dentro do intervalo  $V_{\text{media}} \pm 3.\sigma$ . Uma vez que foi atendida esta exigência, não houve necessidade de descartar valores individuais, visto não existir erros grosseiros. Vê-se, também, que os dados podem ser classificados como de “baixo nível de dispersão”, visto que todos os coeficientes de variação são inferiores a 15%.

Na Figura 25 é apresentada a correlação entre os diferentes tratamentos de argamassa (variando conforme a quantidade de borracha de pneu) e a densidade de massa no estado fresco.

**Figura 25-** Diagrama de regressão para densidade de massa no estado fresco.



De acordo com a definição apresentada por Isaia *et al.* (2009), o diagrama de regressão é classificado como muito forte, visto que o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) é de 0,985. As incertezas (aspecto estatístico) apresentadas referem-se ao desvio padrão das amostras ( $\sigma$ ). A curva adotada neste estudo foi a exponencial, sendo adotado após análise no software LAB FIT®.

Foi feita a análise estatística de variância (ANOVA) dos resultados, para verificar se houve diferença significativa das médias, ao nível probabilístico de significância de 5% ( $p < 0,05$ ). As médias das densidades de massa no estado fresco apontaram a ocorrência de diferença significativa, visto que as médias das argamassas diferem significativamente entre si (ver  $F_{\text{calculado}} 28,57 > F_{\text{crit}} 3,11$ ).

Conforme a estratificação apresentada por Carasek (2007), todas as argamassas estudadas são classificadas como “normal” (variou entre 1,40 e 2,30). No Quadro 5 consta análise de estratificação com base no que estabelece a NBR 13.281 (ABNT, 2005), que classifica as argamassas de assentamento e revestimento de paredes e tetos segundo a densidade de argamassa no estado fresco.

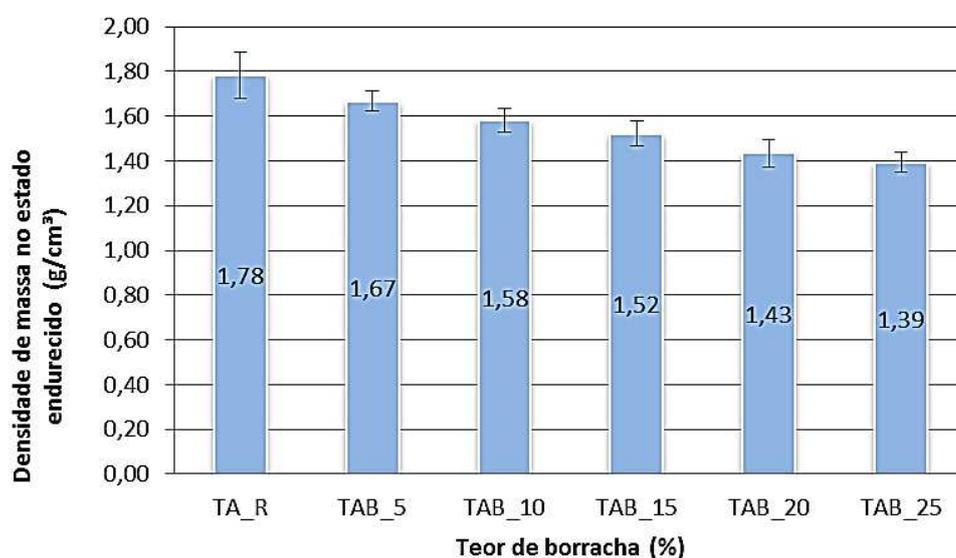
**Quadro 5-** Classificação da densidade de massa do estado fresco.

Descrição	Classificação
Argamassa de referência (TA_R)	D6
Argamassa contendo 5% de borracha (TAB_5)	D5
Argamassa contendo 10% de borracha (TAB_10)	D5
Argamassa contendo 15% de borracha (TAB_15)	D4
Argamassa contendo 20% de borracha (TAB_20)	D4
Argamassa contendo 25% de borracha (TAB_25)	D3

Fonte: NBR 13.281 (ABNT, 2005).

#### 4.2.4. Densidade de massa no estado endurecido

A pesquisa experimental para determinação das densidades de massa aparentes, no estado endurecido tem seus resultados apresentados na Figura 26 e na Tabela 11. Avaliando os dados, é possível fazer análise comparativa dos valores de todos os tratamentos estudados. As incertezas (do ponto de vista da estatística) apresentadas foram calculadas pelo desvio padrão das amostras ( $\sigma$ ).

**Figura 26** – densidade de massa dos compósitos no estado endurecido.

Esses resultados evidenciam que a adição das partículas de borracha reciclada de pneus, na argamassa, diminui a densidade de massa aparente do compósito no estado endurecido. Verifica-se também, que a densidade de massa no estado endurecido apresenta valores

menores que os seus correspondentes valores para as argamassas no estado fresco. Tal fato ocorre em razão da perda de parte da água do corpo de prova.

**Tabela 11-** Densidade de massa no estado endurecido.

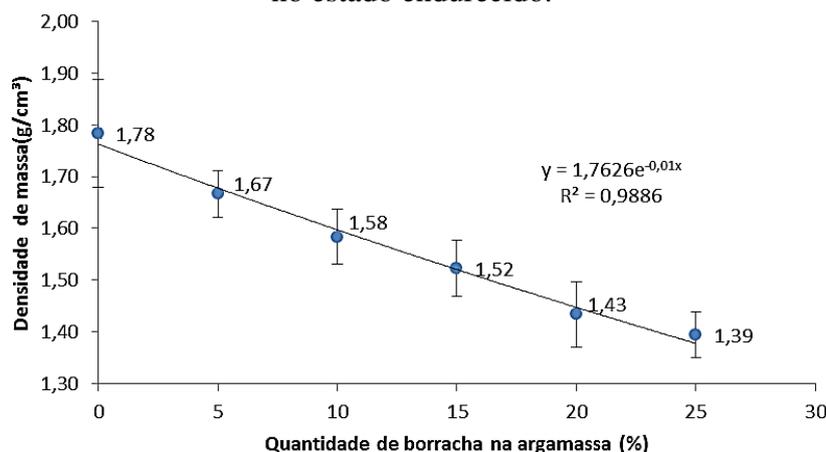
<b>Densidade de massa no estado endurecido (g.cm<sup>-3</sup>)</b>			
<b>Descrição</b>	<b>Densidade</b>	<b><math>\sigma</math></b>	<b>CV (%)</b>
Argamassa de referência (TA_R)	1,78	0,104	5,85%
Argamassa contendo 5% de borracha (TAB_5)	1,67	0,045	2,67%
Argamassa contendo 10% de borracha (TAB_10)	1,58	0,053	3,34%
Argamassa contendo 15% de borracha (TAB_15)	1,52	0,054	3,52%
Argamassa contendo 20% de borracha (TAB_20)	1,43	0,063	4,37%
Argamassa contendo 25% de borracha (TAB_25)	1,39	0,044	3,19%

Analisando a Tabela 11, constata-se uma relação inversamente proporcional entre a incorporação de borracha reciclada de pneu e a densidade de massa do corpo de prova. Ao comparar o tratamento *TAB\_5%* com o *TA\_R* há redução de 6,18 %. Por sua vez, nos tratamentos *TAB\_20%* e *TAB\_25%*, comparado com o *TA\_R*, ocorreu redução de 19,66 e 21,91 %, respectivamente.

Procedendo a análise estatística dos dados, verificou-se que há baixo nível de dispersão de dados visto que todos os coeficientes de variação (CV) são inferiores a 15%. Observando a distribuição dos dados na curva gaussiana, nota-se que todos os valores individuais obtidos se encontram na faixa definida pela expressão “ $V_{\text{média}} \pm 2.\sigma$ ”. A partir desta constatação, compreende-se não existir necessidade de descartar valores individuais, pois não há erros grosseiros.

Na Figura 27 são apresentados o coeficiente de determinação e o diagrama de regressão, construído a partir dos dados resultantes dos experimentos, para cálculo da densidade de massa no estado endurecido. Observa-se correlação considerada forte, visto que a equação de ajustamento reproduz grande aproximação dos pontos experimentais, retratado pelo valor de  $R^2$  muito próximo de 1.

**Figura 27-** Diagrama de regressão e coeficiente de determinação da densidade de massa no estado endurecido.



Foi realizada análise estatística das médias da densidade de massa e verificado que existe diferença significativa ao observar o valor- $p < 0,00$  e  $F_{\text{calculado}} (27,42) > F_{\text{crit}} (3,11)$ .

No Quadro 6 é apresentada a classificação das argamassas estudadas. Esta classificação está embasada na NBR 13.281 (ABNT, 2005) que trata dos requisitos de argamassas para assentamento e revestimento de paredes e tetos.

**Quadro 6-** Classificação de densidade de massa no estado endurecido.

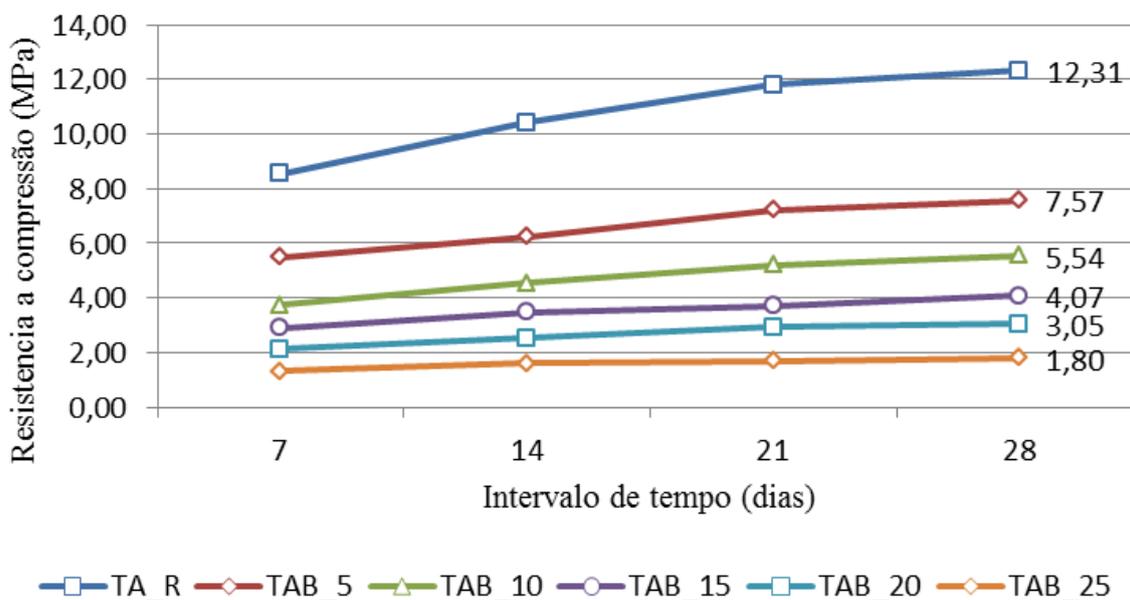
Descrição	Classificação
Argamassa de referência (TA_R)	M5
Argamassa contendo 5% de borracha (TAB_5)	M5
Argamassa contendo 10% de borracha (TAB_10)	M5
Argamassa contendo 15% de borracha (TAB_15)	M4
Argamassa contendo 20% de borracha (TAB_20)	M4
Argamassa contendo 25% de borracha (TAB_25)	M3

Fonte: NBR 13.281 (ABNT, 2005).

### 4.3. Caracterização mecânica da argamassa

#### 4.3.1. Resistência à compressão axial

A resistência à compressão axial é a propriedade que melhor possibilita a análise do comportamento mecânico das argamassas de base cimentícia. Por esta razão, a resistência por compressão axial foi um dos principais balizadores para que fosse definido o limite máximo de taxa de substituição, na ordem de 25%. Os resultados podem ser observados na Figura 28 apresentada a seguir.

**Figura 28-** Resistência à compressão axial.

De posse dos dados apresentados da Figura 26, nota-se que a resistência à compressão axial tem valores em relação inversa à da quantidade de partículas borracha reciclada de pneus na argamassa, ou seja, quanto maior a quantidade de borracha reciclada incorporada no compósito, menor será sua resistência à compressão axial. Por outro lado, é válido ressaltar a assertiva de Izquierdo (2011) acerca do tema, pois para o pesquisador, a resistência à compressão da argamassa não transfere grande influência na resistência a compressão do conjunto da alvenaria.

Pode-se constatar, ainda, que as curvas obtidas para evolução da resistência a compressão, para cada argamassa, têm um comportamento bastante assemelhada entre si, ou seja, uma linha com suave inclinação, considerando o aumento de resistência ao longo da idade. Os resultados dos ensaios para caracterização das argamassas estudadas quanto à resistência à compressão axial estão na Tabela 12.

**Tabela 12-** Resistência à compressão axial.

	7 dias			14 dias			21 dias			28 dias		
	$R_c$	$\Sigma$	CV	$R_c$	$\Sigma$	CV	$R_c$	$\sigma$	CV	$R_c$	$\sigma$	CV
<b>TA_R</b>	<b>8,55</b>	<b>0,150</b>	<b>1,75%</b>	<b>10,42</b>	<b>0,196</b>	<b>1,88%</b>	<b>11,82</b>	<b>0,190</b>	<b>1,61%</b>	<b>12,31</b>	<b>0,139</b>	<b>1,13%</b>
<b>TAB_5</b>	<b>5,49</b>	<b>0,308</b>	<b>5,61%</b>	<b>6,25</b>	<b>0,180</b>	<b>2,88%</b>	<b>7,23</b>	<b>0,137</b>	<b>1,90%</b>	<b>7,57</b>	<b>0,168</b>	<b>2,22%</b>
<b>TAB_10</b>	<b>3,75</b>	<b>0,185</b>	<b>4,93%</b>	<b>4,53</b>	<b>0,204</b>	<b>4,50%</b>	<b>5,20</b>	<b>0,257</b>	<b>4,95%</b>	<b>5,54</b>	<b>0,204</b>	<b>3,69%</b>
<b>TAB_15</b>	<b>2,89</b>	<b>0,099</b>	<b>3,43%</b>	<b>3,47</b>	<b>0,216</b>	<b>6,23%</b>	<b>3,70</b>	<b>0,108</b>	<b>2,94%</b>	<b>4,07</b>	<b>0,095</b>	<b>2,34%</b>
<b>TAB_20</b>	<b>2,13</b>	<b>0,093</b>	<b>4,35%</b>	<b>2,52</b>	<b>0,118</b>	<b>4,69%</b>	<b>2,93</b>	<b>0,148</b>	<b>5,06%</b>	<b>3,05</b>	<b>0,146</b>	<b>4,78%</b>
<b>TAB_25</b>	<b>1,32</b>	<b>0,054</b>	<b>4,14%</b>	<b>1,62</b>	<b>0,068</b>	<b>4,19%</b>	<b>1,69</b>	<b>0,068</b>	<b>4,02%</b>	<b>1,80</b>	<b>0,070</b>	<b>3,89%</b>

Os valores apresentados na Tabela 12 foram obtidos por meio de cálculo da média das resistências individuais na forma estabelecida pela NBR 13.279 (ABNT, 2005).

Ao analisar os resultados apresentados na Tabela 12, é averiguado que todas as argamassas com resíduo de borracha de pneu, tiveram resistência muito inferior ao tratamento de referência ( $TA_R$ ). A redução da resistência à compressão para os tratamentos  $TAB_5$ ,  $TAB_{10}$ ,  $TAB_{15}$ ,  $TAB_{20}$  e  $TAB_{25}$  foram de 38,51; 55,00; 66,91; 75,22 e 85,38%, respectivamente, em relação a argamassa sem resíduo de borracha de pneus, considerando os valores aos 28 dias. Pode-se concluir que, as argamassas alternativas são recomendáveis para aplicação como revestimento de elementos construtivos, cuja circunstância não precise de resistência mecânica elevada. Esses resultados estão de acordo com os trabalhos realizados por Ferreira (2009), Pedro *et al.* (2012), Canova *et al.* (2015), Pczieczek (2017) e Kurz *et al.* (2018), que fizeram pesquisa experimental envolvendo argamassa de revestimento contendo borracha de pneu, e identificaram que a resistência à compressão axial diminui com o aumento dos teores de borracha na argamassa. Canova *et al.* (2015) elucidaram que esta redução pode estar ligada ao fato da borracha ser um material altamente elástico e possuir baixas resistências mecânicas, bem como baixa massa específica.

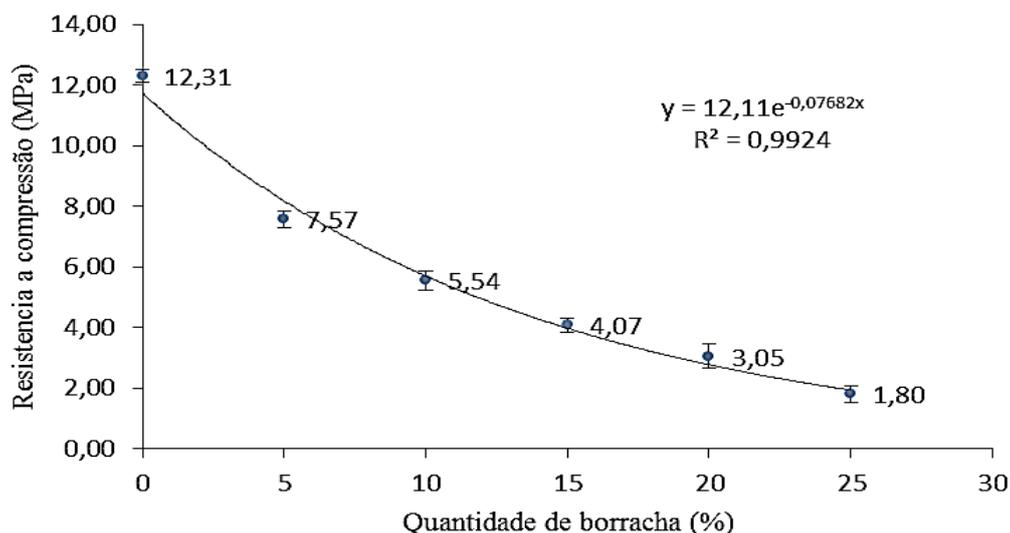
A evolução da resistência à compressão axial da argamassa de referência, no intervalo entre o 7º e o 28º dia de moldada, foi de 43,98%, enquanto a  $TAB_{10}$  e a  $TAB_{20}$  foram de 47,73 e 43,19%, respectivamente. A partir da análise estatística das leituras individuais calculadas neste ensaio, e não existiu a necessidade de desconsiderar nenhuma medida da resistência individual, tendo em vista que nenhum valor calculado foi discrepante quando analisado conforme a curva gaussiana. Os resultados foram tratados estatisticamente, também, de acordo com as determinações da Norma 13.279 (ABNT, 2005) que determina o desvio absoluto máximo ( $DA_{max}$ ). Da mesma forma, não ocorreu a necessidade de desconsiderar nenhum valor individual visto inexistir discrepância.

Na análise estatística, foram estudados os valores percentuais dos coeficientes de variação (CV). Compreende-se que os valores apresentam baixa dispersão, já que todos os cálculos ficaram abaixo de 15%, atestando, assim, a boa qualidade dos dados obtidos por meio de ensaios da resistência à compressão.

É evidenciada na Figura 29, a excelente concordância entre os valores do diagrama de regressão e os experimentais, caracterizada pelo coeficiente de determinação ( $R^2$ ) que teve valor próximo de 1,0. Conforme a classificação apresentada por Isaia *et al.* (2009), o diagrama de regressão pode ser classificado como muito forte. Para realização deste estudo

estatístico, foi utilizado o software LAB FIT CURVE FITTING SOFTWARE® (<http://zeus.df.ufcg.edu.br/labfit>), sendo verificado que a curva que melhor promove o ajuste das médias foi a “exponencial”.

**Figura 29-** Diagrama de regressão resistência à compressão axial da argamassa.



Foi realizada análise estatística de variância com intuito de comparar as médias. Foi considerado o esquema fatorial 6 x 4, sendo 6 tratamentos (0, 5, 10, 15, 20, 25%) em 4 idades (7°, 14°, 21° e 28° dias), com 5 repetições em cada tratamento. Procedido a ANOVA verificou-se que todas as diferenças foram significativas, com  $p\text{-valor} < 0,00$ .

No Quadro 7 é apresentada a classificação e limites de resistência à compressão das argamassas estudadas nesta tese.

**Quadro 7-** Classificação à resistência à compressão das argamassas.

Descrição	Classificação
Argamassa de referência (TA_R)	P6
Argamassa contendo 5% de borracha (TAB_5)	P5
Argamassa contendo 10% de borracha (TAB_10)	P4
Argamassa contendo 15% de borracha (TAB_15)	P4
Argamassa contendo 20% de borracha (TAB_20)	P3
Argamassa contendo 25% de borracha (TAB_25)	P2

Fonte: NBR 13.281 (ABNT, 2005).

Esta classificação ratifica a assertiva que apesar da queda na resistência à compressão axial, essas resistências das argamassas alternativas não são comprometedoras, podendo estes

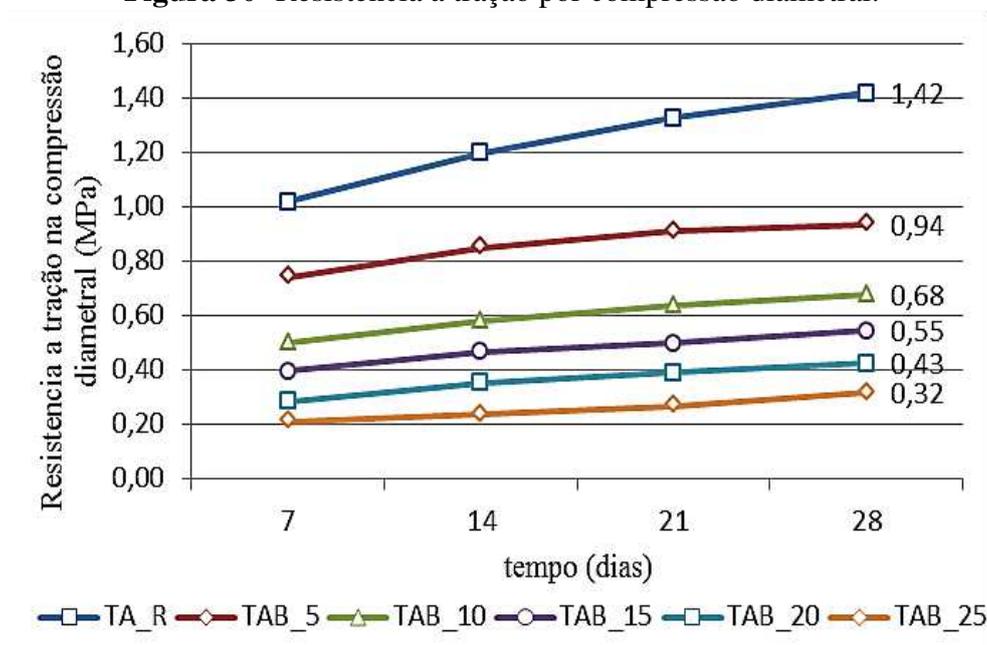
compósitos serem utilizados em locais e em elementos em que a resistência mecânica não seja propriedade tão essencial.

#### 4.3.2. Resistência à tração por compressão diametral

O ensaio de tração por compressão diametral é um dos mais usados para determinação da resistência à tração de um elemento de base cimentícias. Tal fato decorre da facilidade na realização deste ensaio, associado ao seu baixo custo quando comparado com outros ensaios.

A evolução dos resultados ao longo dos 28 dias de ensaio pode ser analisada a partir de observações da Figura 30.

**Figura 30-** Resistência à tração por compressão diametral.



Vê-se que no caso da resistência à tração na compressão diametral, a diminuição da resistência (entre argamassa convencional e as alternativas) é menor que do que a verificada nos ensaios para a resistência a compressão axial.

Verifica-se, também, acentuada redução na resistência à tração por compressão diametral quando comparada com os valores correspondentes obtidos na resistência à compressão axial. Essa redução tem valores que variam na ordem de 8 (oito) vezes.

Na Tabela 13 são apresentados os valores de resistência à compressão diametral e os seus respectivos desvios padrão da amostra ( $\sigma$ ).

**Tabela 13** – Resistência à tração na compressão diametral (MPa).

Resistência à tração por compressão diametral												
	7 dias			14 dias			21 dias			28 dias		
	$R_{t.cd}$	$\sigma$	CV									
TA_R	<b>1,02</b>	0,035	3,44%	<b>1,20</b>	0,064	5,37%	<b>1,33</b>	0,101	7,62%	<b>1,42</b>	0,047	3,31%
TAB_5	<b>0,74</b>	0,057	7,71%	<b>0,85</b>	0,066	7,76%	<b>0,91</b>	0,080	8,77%	<b>0,94</b>	0,063	6,70%
TAB_10	<b>0,50</b>	0,067	13,49%	<b>0,58</b>	0,058	9,93%	<b>0,64</b>	0,057	8,97%	<b>0,68</b>	0,079	11,66%
TAB_15	<b>0,40</b>	0,051	12,71%	<b>0,47</b>	0,070	14,96%	<b>0,50</b>	0,062	12,38%	<b>0,55</b>	0,073	13,34%
TAB_20	<b>0,29</b>	0,041	14,26%	<b>0,35</b>	0,048	13,59%	<b>0,39</b>	0,051	12,91%	<b>0,43</b>	0,049	11,60%
TAB_25	<b>0,21</b>	0,025	11,66%	<b>0,24</b>	0,031	12,85%	<b>0,27</b>	0,030	11,01%	<b>0,32</b>	0,040	12,52%

Observa-se que a incorporação da borracha reciclada de pneu provocou significativa redução da resistência à tração por compressão diametral nas argamassas de revestimento. Os dados mostram que, o aumento progressivo da quantidade de borracha diminui gradualmente esta resistência, da mesma forma como ocorreu para resistência à compressão. Tal fenômeno se verificou para todos os tratamentos e em todas as datas.

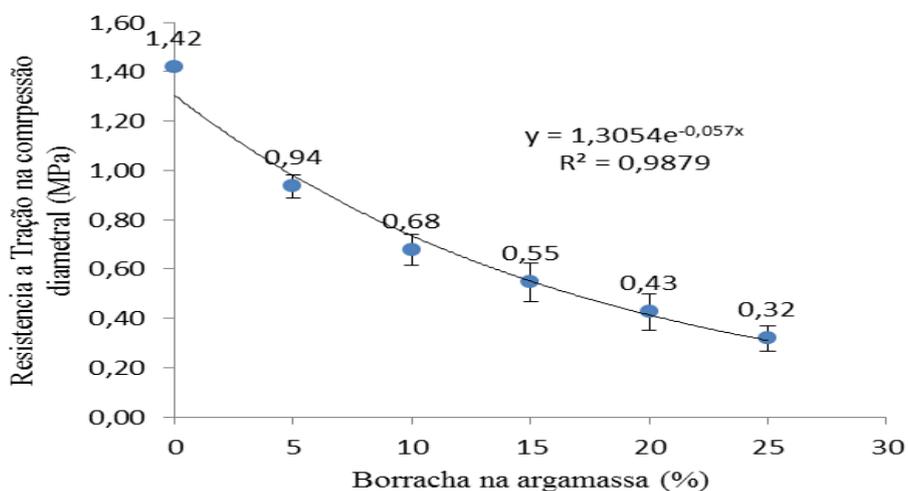
Analisando os resultados de resistência à tração por compressão diametral, nota-se que a argamassa contendo borracha de pneus apresenta forte diminuição de resistência em relação aos valores obtidos pelo tratamento de referência (TA\_R) variando de 33,86 a 77,45%, de acordo com a quantidade de borracha incorporada na argamassa. Feita a comparação entre os corpos-de-prova da argamassa de referência (TA\_R) com argamassa alternativa contendo 10 e 20% de borracha (TAB\_10 e TAB\_20), verifica-se redução dos valores da tração por compressão diametral na ordem de 52,11 e 69,86%, respectivamente, para a idade de 28 dias. A ocorrência da redução da tração por compressão diametral em relação inversa a incorporação de borracha de pneu na argamassa está em conformidade com os trabalhos realizados por Meneguini (2003), Ferreira (2009), Cintra (2013), Canova *et al.* (2015) e Kurz *et al.* (2018).

Foi realizada a análise dos valores individuais referentes ao ensaio da resistência à tração na compressão diametral, e não houve necessidade de desconsiderar medida da resistência individual, visto que esses valores não foram discrepantes, quando procedido estudo da curva gaussiana.

Na Figura 31 é exposta a linha de ruptura dos corpos-de-prova, demonstrando o modo como ocorreu o rompimento dos tratamentos estudados. Nos diversos casos, a ruptura ocorreu numa linha aproximadamente reta vertical, com pequenas mudanças de direção.

**Figura 31-** rompimento de corpo de prova.

Na Figura 32 é exibido o diagrama de regressão referente ao ensaio da resistência da tração por compressão diametral versus o teor de borracha reciclada incorporada na argamassa. Percebe-se que foi obtido um bom ajuste, devidamente caracterizado pelo coeficiente de determinação ( $R^2$ ). A faixa de incerteza (do ponto de vista da estatística) apresentada na Figura 30 refere-se ao desvio padrão da amostra ( $\sigma$ ).

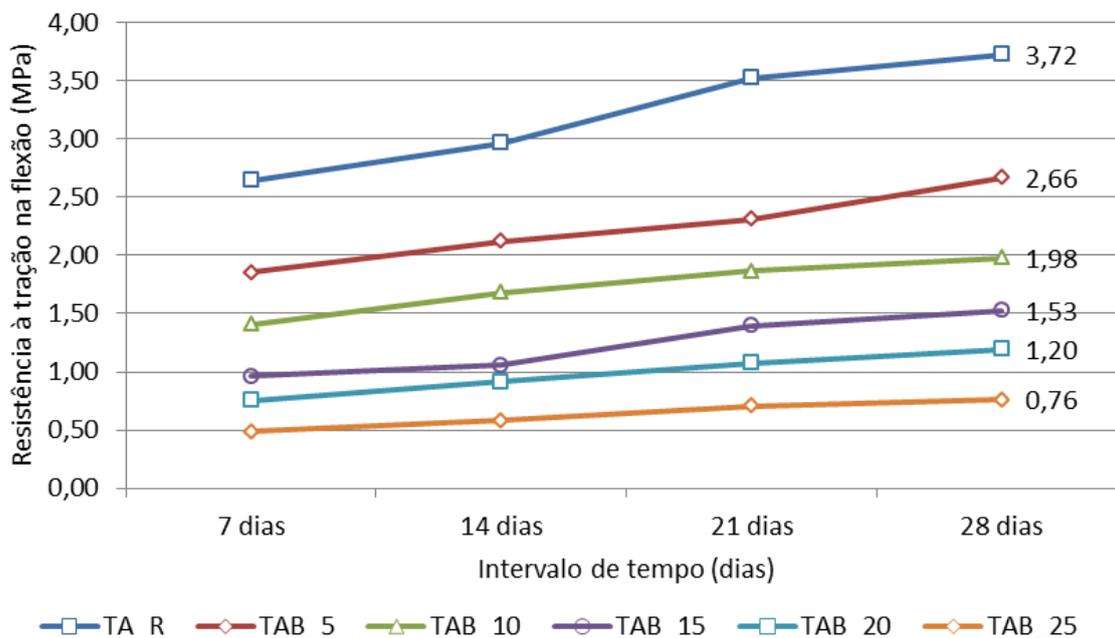
**Figuras 32** – Diagrama de regressão. Resistência à tração na compressão.

Conforme a classificação apresentada por Isaia *et al.* (2009), o diagrama de regressão pode ser classificado como muito forte, pois o  $r^2$  foi maior que 0,90.

#### 4.3.3. Resistência à tração na flexão

Na Figura 33 vê-se a evolução da resistência à tração na flexão com o aumento do teor de borracha.

**Figura 33-** Resistência à tração na flexão (MPa).



Para esta pesquisa, os resultados de cada resistência à tração na flexão, apresentada na Figura 31, foram obtidos calculando a média dos resultados de rompimento, conforme estabelece a NBR 13.279 (ABNT, 2005). Os resultados indicaram que, quanto maior o teor de borracha incorporado na argamassa, maior foi a redução desta resistência mecânica. Neste ensaio é observado um desempenho mecânico semelhante ao verificado no ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

Giacobbe (2008) realizou pesquisa com elemento a base de cimento contendo borracha e também chegou a mesma conclusão. Comparando diversos tratamentos, a pesquisadora percebeu que o acréscimo da incorporação da borracha de pneu e a resistência a tração na flexão obedecem a relação inversamente proporcional. O comportamento da evolução da resistência a tração na flexão, apresentada na Figura 31, corroboram com as pesquisas realizadas por Marques (2005).

Na Tabela 14 são apresentados os dados comparativos da evolução da resistência a tração na flexão para os diversos tratamentos.  $R_{if}$  representa a resistência a tração na flexão (em MPa),  $\sigma$  corresponde ao desvio padrão da amostra e CV é o coeficiente de variação (em percentual).

**Tabela 14** - Resistência à tração na flexão.  
Resistência à Tração na Flexão (MPa)

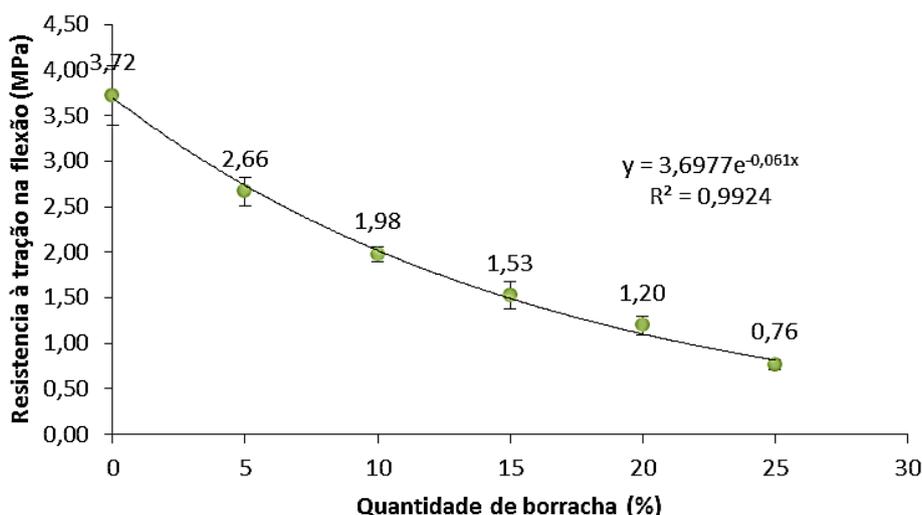
	7 dias			14 dias			21 dias			28 dias		
	$R_{t,f}$	$\sigma$	CV	$R_{t,f}$	$\sigma$	CV	$R_{t,f}$	$\sigma$	CV	$R_{t,f}$	$\sigma$	CV
<b>TA_R</b>	<b>2,64</b>	0,095	3,61%	<b>2,96</b>	0,030	1,03%	<b>3,52</b>	0,108	3,07%	<b>3,72</b>	0,329	8,83%
<b>TAB_5</b>	<b>1,85</b>	0,097	5,25%	<b>2,12</b>	0,043	2,01%	<b>2,31</b>	0,203	8,79%	<b>2,66</b>	0,152	5,71%
<b>TAB_10</b>	<b>1,41</b>	0,048	3,38%	<b>1,68</b>	0,137	8,16%	<b>1,87</b>	0,152	8,17%	<b>1,98</b>	0,080	4,06%
<b>TAB_15</b>	<b>0,96</b>	0,106	11,00%	<b>1,06</b>	0,048	4,49%	<b>1,40</b>	0,097	6,94%	<b>1,53</b>	0,151	9,92%
<b>TAB_20</b>	<b>0,75</b>	0,035	4,68%	<b>0,91</b>	0,020	2,21%	<b>1,08</b>	0,085	7,88%	<b>1,20</b>	0,106	8,90%
<b>TAB_25</b>	<b>0,49</b>	0,029	5,88%	<b>0,58</b>	0,026	4,55%	<b>0,71</b>	0,050	7,12%	<b>0,76</b>	0,055	7,20%

Através dos resultados, se pode observar uma redução que varia de 28,49 a 79,50%, para a idade de 28 dias, conforme era procedido o aumento no teor de borracha de pneu na argamassa. O tratamento de argamassa com 10% de borracha (*TAB\_10*) teve redução de 46,82% da sua resistência a tração na flexão, em relação a argamassa de referência (*TA\_R*). Já o *TAB\_20* teve redução maior 67,89% quando comparado com a resistência a tração na flexão do *TA\_R*.

Com fundamento na análise estatística dos dados foi observado que não houve a necessidade de desconsiderar nenhuma leitura da resistência individual, uma vez que os valores obtidos não apresentaram discrepância. Os resultados foram, também, tratados estatisticamente de acordo com as determinações da norma técnica NBR 13.279 (ABNT, 2005), que estabelece o desvio absoluto máximo ( $DA_{max}$ ), sendo observada a inexistência de valores discrepantes para esta avaliação.

Analisando a Tabela 14 dos ensaios dos diversos tratamentos de argamassas aos 3, 7, 21 e 28 dias de idade, nota-se que os valores percentuais dos coeficientes de variação variam entre 1,03 e 11%. Compreende-se que apresenta baixa dispersão visto que todos os valores ficaram abaixo de 15%, atestando, assim, a boa qualidade dos dados por meio de ensaios da resistência à tração na flexão.

Na figura 34 é apresentado o diagrama de regressão da resistência à tração na flexão, bem como o coeficiente de determinação ( $R^2$ ). Para realização deste estudo estatístico, foi utilizado o software LAB FIT CURVE FITTING SOFTWARE® (<http://zeus.df.ufcg.edu.br/labfit>), sendo verificado que a curva que melhor promove o ajuste das médias foi a “exponencial”.

**Figura 34-** Diagrama de regressão da resistência à tração na flexão.

Ao analisar a Figura 34, que consta o diagrama de regressão e o coeficiente de determinação para os valores dos ensaios de resistência a tração na flexão, constata-se que há correlação estatisticamente significativa entre as duas variáveis, porque o coeficiente de determinação é de 0,9924. Seguindo a classificação apresentada por Isaia *et al.* (2009), o diagrama de regressão pode ser classificado como muito forte.

A comparação das médias foi analisada estatisticamente com auxílio da Análise de Variância (ANOVA). Foi observado que as médias apresentam diferenças significativas, visto que  $F_{calc} > F_{critico}$  e que o *p-valor* é menor que zero.

No Quadro 8 está a classificação da resistência a tração na flexão para os 06 (seis) tratamentos, conforme definida pela Norma Brasileira NBR 13.281 (ABNT, 2005).

**Quadro 8-** Classificação à Resistência à tração na flexão das argamassas.

Descrição	Classificação
Argamassa de referência (TA_R)	R5
Argamassa contendo 5% de borracha (TAB_5)	R4
Argamassa contendo 10% de borracha (TAB_10)	R3
Argamassa contendo 15% de borracha (TAB_15)	R3
Argamassa contendo 20% de borracha (TAB_20)	R2
Argamassa contendo 25% de borracha (TAB_25)	R1

Fonte: NBR 13.281 (ABNT, 2005).

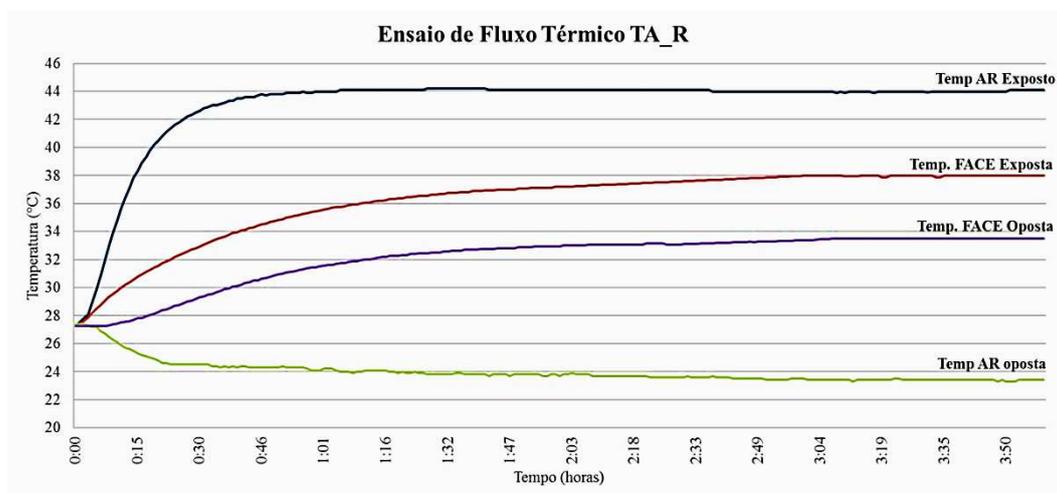
## 4.4. Caracterização térmica

### 4.4.1. Coeficiente de condutividade térmica da argamassa

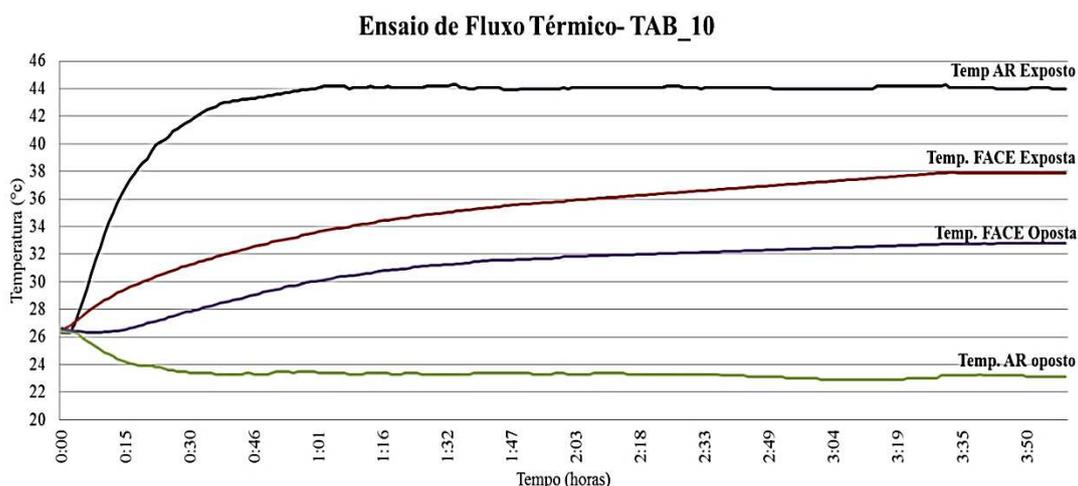
A condutividade térmica ( $k$ ) está relacionada a natureza e umidade do material, além da densidade de massa. O valor do coeficiente  $k$  é maior para os materiais que são bons condutores e baixo para aqueles que são isolantes térmicos.

Para o cálculo do coeficiente de condutividade térmica foi realizado o ensaio de fluxo térmico com o intuito de se obter as temperaturas dos ambientes (ar exposto e oposto à fonte radiante) e as temperaturas das faces (face exposta e oposta à fonte radiante). O comportamento das temperaturas pode ser visualizado nas Figuras de 35 a 38.

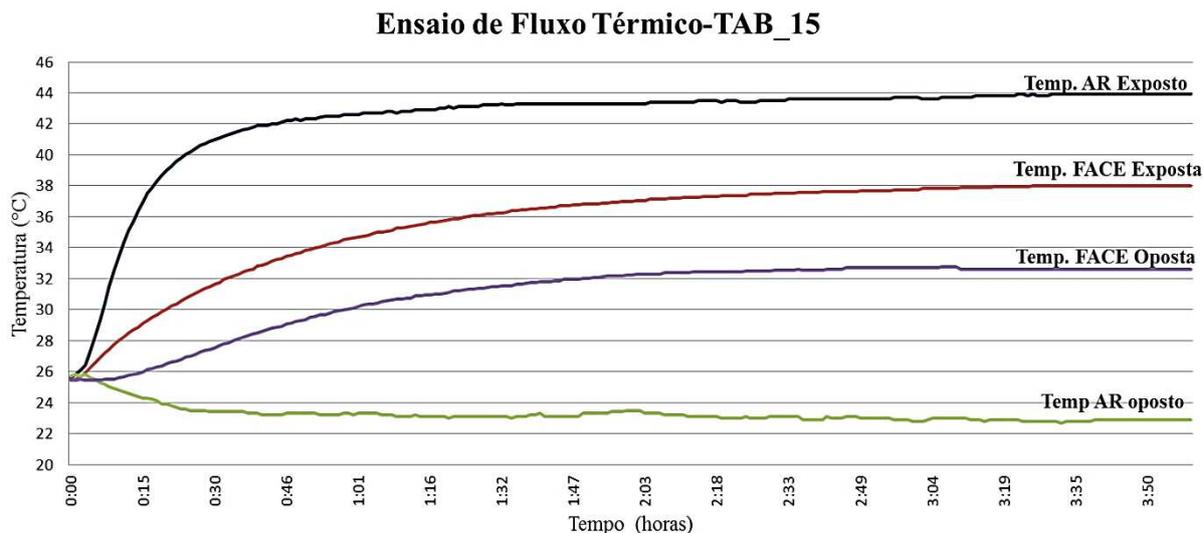
**Figura 35-** Ensaio de Fluxo térmico para Tratamento TA\_R (tratamento de referência).



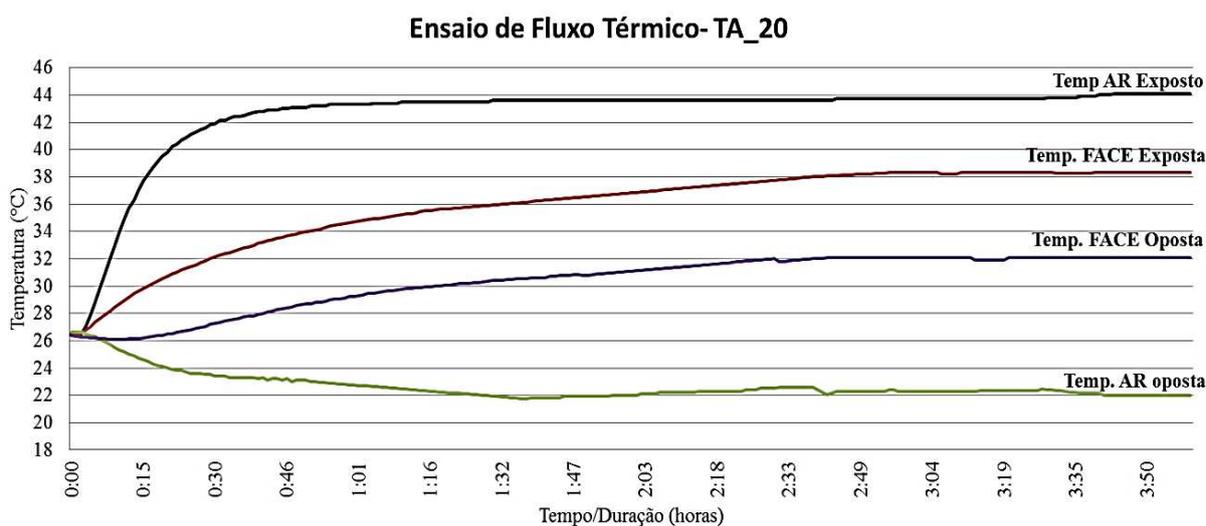
**Figura 36-** Ensaio de Fluxo térmico para Tratamento TAB\_10 (argamassa contendo 10% de borracha reciclada de pneu).



**Figura 37-** Ensaio de Fluxo térmico para Tratamento TAB\_15 (argamassa contendo 15% de borracha reciclada de pneu).



**Figura 38-** Ensaio de Fluxo térmico para Tratamento TAB\_20 (argamassa contendo 20% de borracha reciclada de pneu).



Nas Figuras 33 a 36, a *Temp. AR Exposto* representa a temperatura do ar exposto a fonte radiante, enquanto *Temp. AR Oposto* trata-se da temperatura do ar oposto (voltado para ambiente contrário à essa fonte). Por sua vez, *Temp. FACE Exposta* representa a temperatura da face exposta a fonte radiante, enquanto *Temp. FACE Oposta* da temperatura da face oposta.

A análise comparativa desta importante propriedade térmica das argamassas estudadas possibilita investigar o nível de contribuição da borracha de pneu influenciando na melhoria do desempenho térmico das alvenarias. Os valores para coeficiente de condutividade térmica estão dispostos na Tabela 15.

**Tabela 15** – Valores de condutividade térmica dos compósitos.

<b>Condutividade térmica <math>W.m^{-1}.K^{-1}</math></b>			
	<b><i>k</i></b>	<b><math>\sigma</math></b>	<b>CV (%)</b>
<b>TA_R</b>	<b>1,67</b>	<i>0,051</i>	3,05%
<b>TAB_5</b>	<b>1,47</b>	<i>0,046</i>	3,11%
<b>TAB_10</b>	<b>1,41</b>	<i>0,047</i>	3,34%
<b>TAB_15</b>	<b>1,35</b>	<i>0,069</i>	5,08%
<b>TAB_20</b>	<b>1,20</b>	<i>0,081</i>	6,66%
<b>TAB_25</b>	<b>1,12</b>	<i>0,032</i>	2,88%

Compreende-se então que, a diminuição da condutividade térmica das argamassas estudadas encontra-se diretamente relacionada com as características intrínsecas da borracha de pneu, considerando sua baixa capacidade de condução de energia térmica. Esses dados evidenciam a afirmativa de que a borracha de pneu, considerado como bom isolante térmico, contribui para a construção de compósito cimentício com menor coeficiente de condutividade térmica, melhorando a propriedade de isolamento térmico da argamassa.

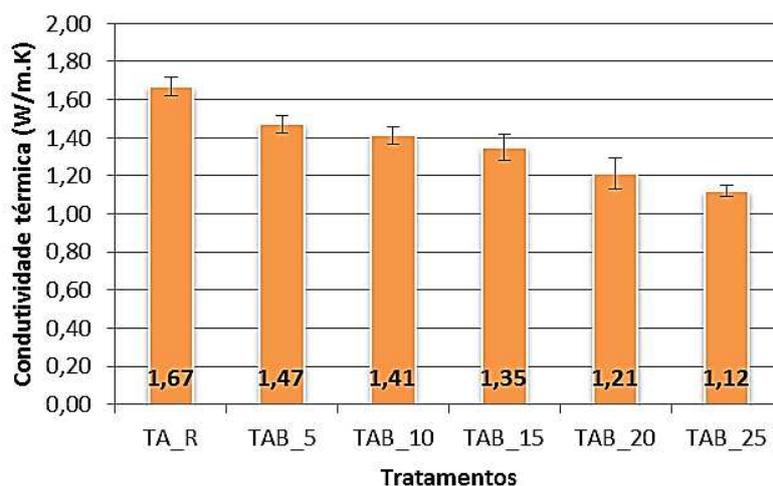
Concernente aos dados obtidos neste ensaio para obtenção do coeficiente de condutividade térmica, as argamassas contendo borracha reciclada de pneus apresentaram valores mais baixos do que o do tratamento de referência. Pode-se, então, inferir que a redução na condutividade térmica para as argamassas alternativas ocorreu em relação inversa ao teor da borracha reciclada de pneu, destacando o fato que este agregado tem baixa condutividade térmica. Observa-se que esta redução, em relação ao tratamento de argamassa de referência, foi de 11,98; 15,57; 19,16; 28,14 e 32,93% para as argamassas com borracha de pneus nas proporções de 5, 10, 15, 20 e 25%, respectivamente.

Foi percebido, também, que a variação da condutividade térmica se encontra diretamente relacionada com a densidade de massa do material, ou seja, quanto menor a densidade de massa menor é a condutividade térmica.

Investigando a Tabela 15 dos ensaios do tratamento de referência, e dos 5 tipos de compósitos alternativos, nota-se que os valores percentuais dos coeficientes de variação oscilam entre 2,88 e 6,66%. Compreende-se que os resultados apresentam baixa dispersão visto que todos os valores ficaram abaixo de 15%, atestando, assim, a boa qualidade dos dados obtidos por meio de ensaios de cálculo do coeficiente de condutividade térmica.

Na Figura 39 é apresentado gráfico comparativo dos valores de condutividade térmica relativos as argamassas estudadas.

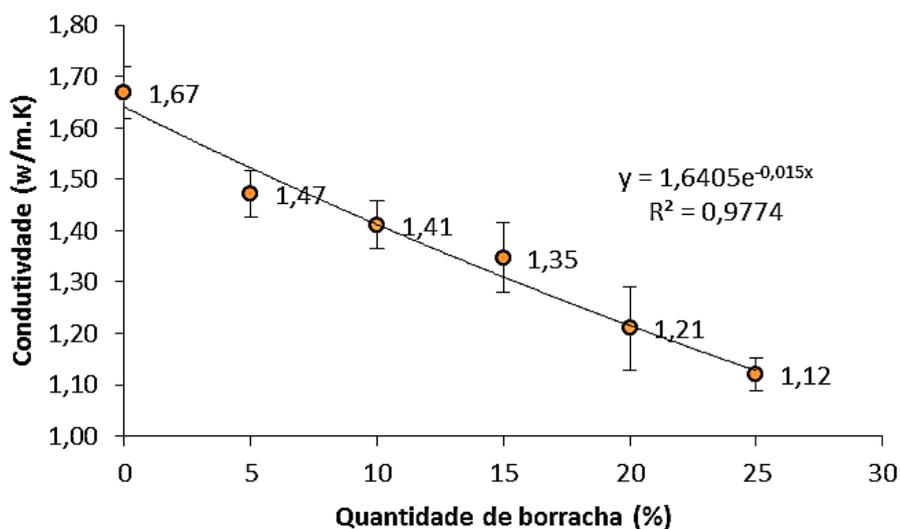
**Figura 39-** Valores de condutividade térmica dos tratamentos ( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ).



Pode-se constatar que a redução da condutividade térmica da argamassa de referência, comparando com os compósitos que contêm borracha de pneu, pode ser explicada pelo fato desta borracha ter baixa condutividade térmica. Considerando estes resultados, pode-se entender que as argamassas alternativas têm elevado potencial de isolamento térmico quando aplicadas como elemento revestimento.

Na Figura 40 está exposto o diagrama de regressão e o coeficiente de determinação para os coeficientes de condutividade térmica. Verifica-se que esta análise de regressão é classificada como muito forte, uma vez que o coeficiente de determinação é de 0,9774.

**Figura 40-** Diagrama de regressão do coeficiente de condutividade térmica.



Aplicando-se a análise de variância (ANOVA) foi possível identificar que há diferença significativa entre as médias.

#### 4.4.2. Inércia térmica das minis paredes

O comportamento térmico da alvenaria pode ser avaliado a partir da análise comparativa da inércia térmica, podendo ser calculada através de ensaios que abrangem as temperaturas na face exposta (submetidas à radiação de matriz de calor) e na face oposta.

Para avaliação da inercia térmica das paredes, procedeu-se os ensaios de fluxo térmico de mini parede, possibilitando análise fundamentada do desempenho térmico do sistema de vedação vertical externo. Através deste experimento, foi possível investigar a influência provocada pela borracha de pneus na inercia térmica das paredes, visto que se permite a obtenção de duas variáveis relevantes: o atraso térmico ( $\omega$ ) e amortecimento térmico ( $\mu$ ). Deve-se observar que um maior amortecimento térmico indica maior capacidade de isolamento térmico da mini parede.

A temperatura máxima em uma face da parede tem seu valor correspondente (ou seja, máximo) na outra face, sendo que tais manifestações acontecem com intensidade diferente e somente após um intervalo tempo. Este atraso de transmissão da onda térmica denomina-se de atraso térmico ( $\omega$ ).

Os Gráficos e Tabela apresentados para análise deste fenômeno, foram elaborados com a utilização do software Excel, permitindo quantificar em minutos, o atraso da transmissão de onda de calor na mini parede. Na Tabela 16 vê-se a evolução numérica do amortecimento e atraso térmico das minis paredes, considerando as diferentes proporções da incorporação de borracha de pneu. Foi observada relação direta entre o amortecimento térmico e a quantidade de borracha de pneu incorporada na amostra.

Tabela 16- Amortecimento e atraso térmico das minis paredes.

MINI PAREDE	FACE EXPOSTA			FACE OPOSTA			Amortec. ( $\mu$ ) (%)	Atraso térmico ( $\phi$ ) (min)
	Temp. Máxima (°C)	Temp. Mínima (°C)	Amplit. (°C)	Temp. Máxima (°C)	Temp. Mínima (°C)	Amplit. (°C)		
MP-0	60,88	27,31	33,57	41,69	27,31	14,38	57,16	00:53:19
MP-10	61,81	26,94	34,87	40,75	26,94	13,81	60,40	01:04:36
MP-15	62,41	26,82	35,59	40,31	26,81	13,5	62,24	01:07:40
MP-20	61,75	27,52	34,23	38,38	27,52	10,86	68,27	01:14:50

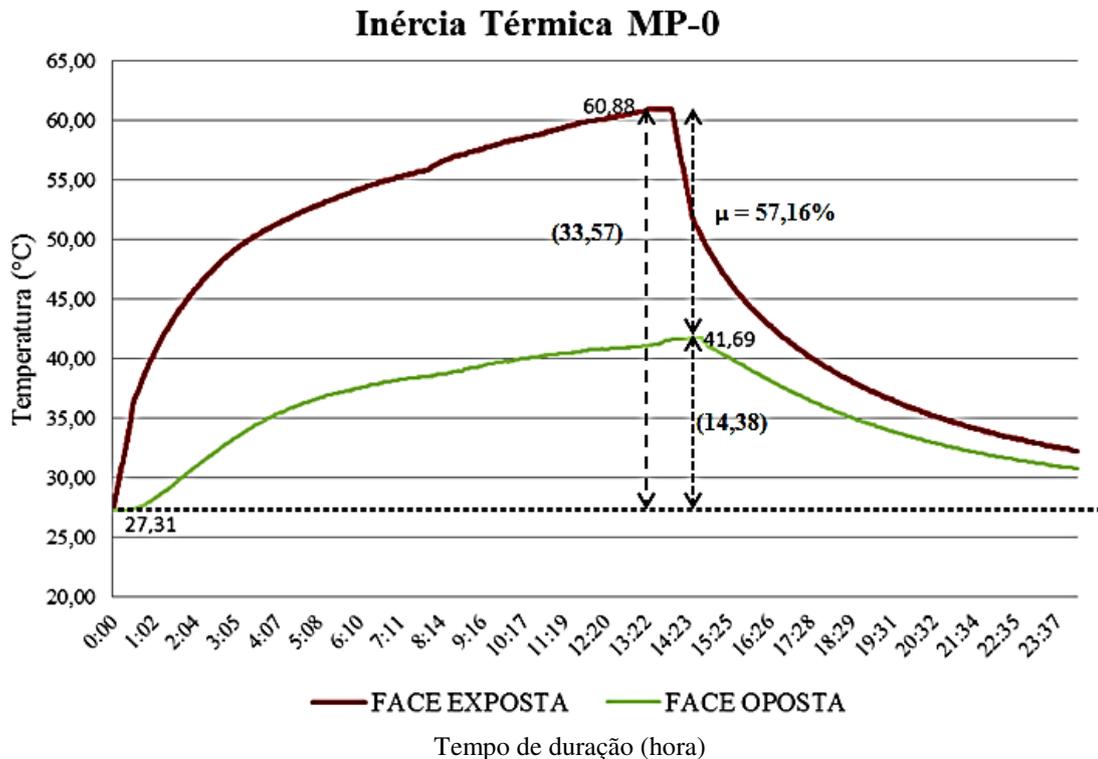
A análise comparativa dos dados apresentados na Tabela 16, permite compreender que as incorporações de borracha de pneu contribuem para que a alvenaria possa reter quantidade

mais significativa da energia térmica que flui entre suas faces. Pode-se compreender que as minis paredes com revestimento contendo borracha reciclada de pneu tem maior inércia térmica, contribuindo para redução da temperatura no interior das habitações e diminuindo as sensações de desconforto em razão do “calor”. Conclui-se, portanto, que a aplicação da borracha reciclada de pneus é alternativa sustentável viável como componentes das argamassas de revestimento, possuidora de propriedades térmicas que a caracteriza como bom isolante térmico.

Os resultados dos ensaios de caracterização térmica são demonstrados através das Figuras 39 a 42, apresentando as alterações das temperaturas superficiais em relação ao tempo de duração do ensaio. A redução de temperatura entre as faces da mini parede ocorreu, dentre outros motivos, por causa das interações entre a resistência térmica e condutividade térmica do material alternativo (borracha reciclada de pneu) que compõe o revestimento externo da mini parede.

Na Figura 41 tem-se o ensaio de fluxo térmico da mini parede *MP\_0* (revestimento sem de borracha de pneu, nas duas faces).

**Figura 41** – Temperatura superficial da MP 0.



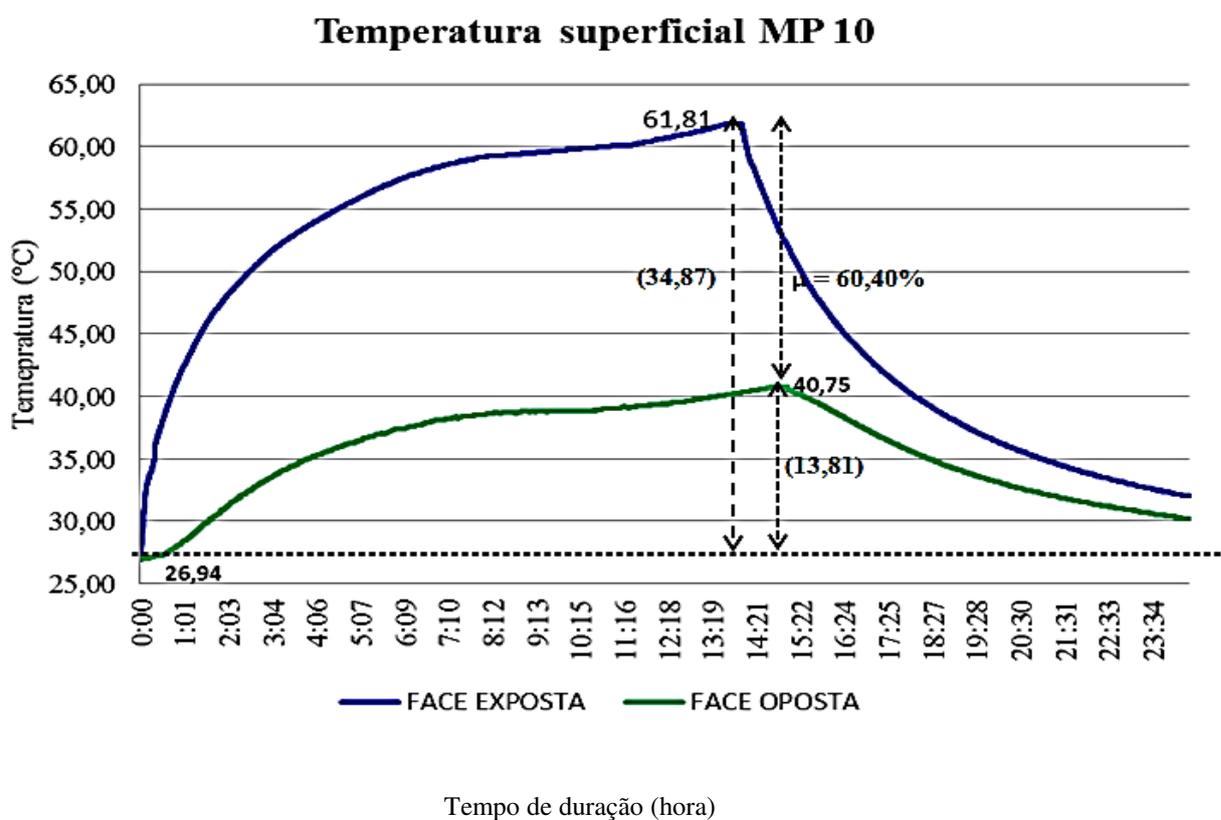
Durante os ensaios foi verificado que as temperaturas superficiais, na face exposta das minis paredes, atingiram seus valores máximos entre a 13<sup>a</sup> e 14<sup>a</sup> hora (após o acionamento do

painel de lâmpadas), momento em que o regime deixou de ser transitório para ser permanente. A fonte radiante foi desligada em torno de 14 horas depois de acionada. No entanto, o Sistema Informatizado de Gestão de Dados (SIGD) foi mantido ligado.

Ao longo do período em que a fonte radiante esteve ligada, a temperatura da face exposta permaneceu com variação crescente e atingindo seu valor máximo em 60,88°C. Por outro lado, a face exposta somente atingiu sua temperatura máxima (41,69°C) depois de 14h27min do início do ensaio. Assim sendo, pode-se notar a ocorrência de atraso térmico em 53 minutos e um amortecimento térmico de 57,16%, comparando as temperaturas das duas faces da mini parede.

A Figura 42 apresenta o ensaio da mini parede *MP\_10*. A partir dela pode-se observar que parte da energia térmica que atingiu a face exposta da mini parede, foi retida pelo envoltório para seu próprio aquecimento, deixando “passar”, portanto, parcela da energia térmica. Este fato também foi visto nos ensaios para mini parede sem borracha de pneu. No entanto, com valores maiores para o amortecimento e para o atraso térmico.

**Figura 42 - Temperatura superficial MP 10.**



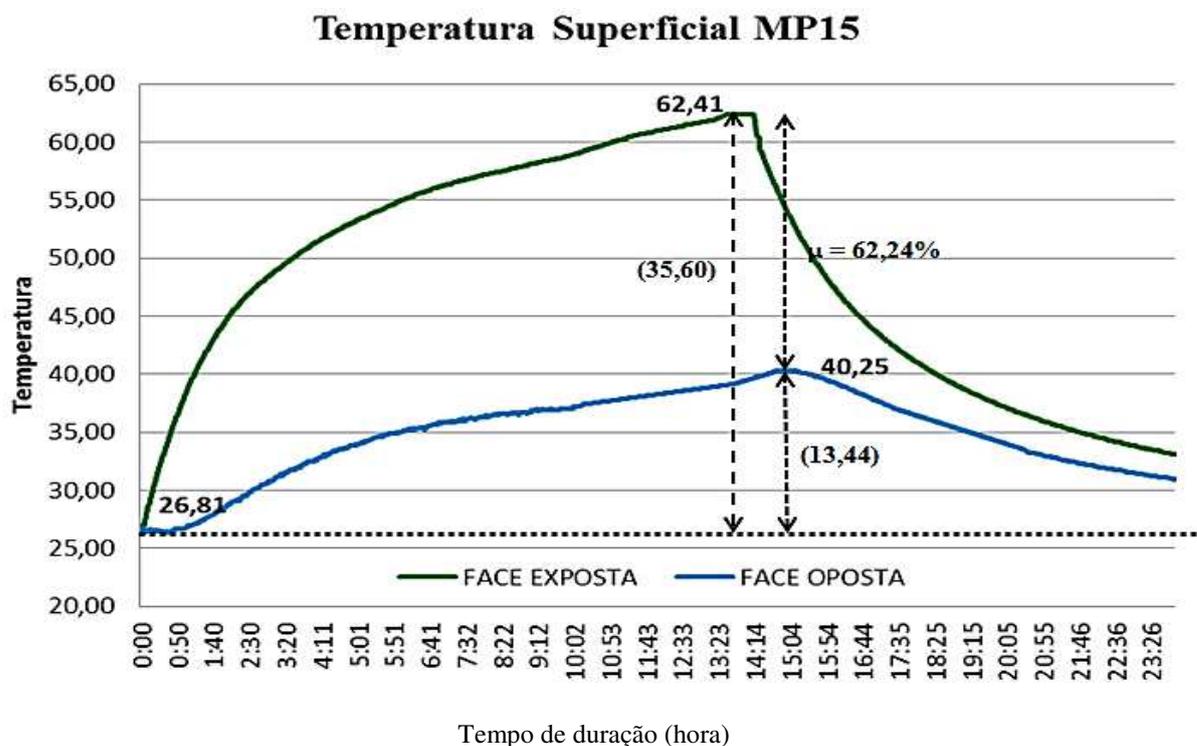
A temperatura da face exposta (que contém argamassa alternativa com 10% de borracha de pneu) chegou ao valor máximo de 61,81 °C, num intervalo de tempo de 01h04min menor

que o registro da temperatura máxima na face oposta ( $40,75^{\circ}\text{C}$ ). O amortecimento térmico da MP\_10 foi bastante expressivo, atingindo 60,40%.

O maior amortecimento da energia térmica da MP\_10 evidencia o esforço para o cumprimento da função de isolamento térmico da argamassa de revestimento, buscando, dessa forma, oferecer maior satisfação de conforto aos moradores e usuários da habitação rural. A redução da taxa de transferência de calor que atravessa está intimamente relacionada com condição de conforto térmico interno.

Na Figura 43, vê-se o ensaio de fluxo térmico relativo a mini parede MP\_15 (que contém argamassa alternativa com 15% de borracha de pneu na face exposta), possibilitando análise da inercia térmica.

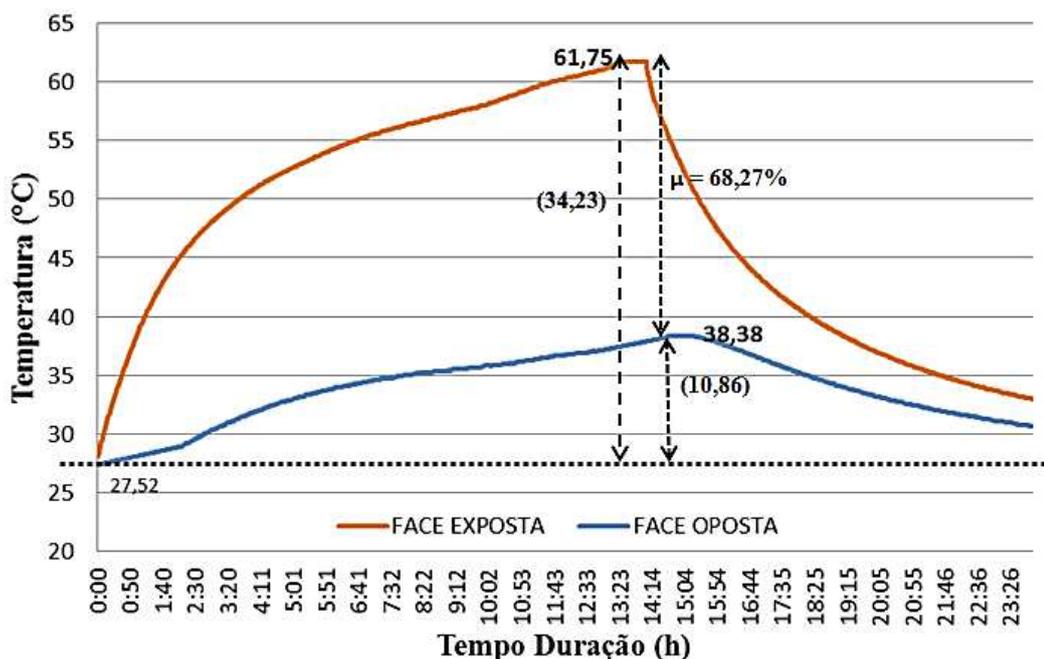
**Figura 43-** Temperatura superficial MP 15.



No ensaio da MP\_15, verificou-se que a temperatura máxima ( $62,41^{\circ}\text{C}$ ) foi atingida 01h07min antes do registro da temperatura máxima na face oposta ( $40,25^{\circ}\text{C}$ ), e tendo um amortecimento térmico foi 62,24%.

Na Figura 44 é apresentado o ensaio de fluxo térmico relativo a mini parede MP\_20.

**Figura 44** - Temperatura superficial MP 20.  
**Temperatura Superficial MP\_20**



Para a argamassa MP\_20 (com argamassa contendo 20% de borracha de pneu), as temperaturas superficiais das minis paredes se estabilizaram nos valores de 61,75 e 38,38°C para as faces exposta e oposta, respectivamente. Ambas as faces iniciaram o ensaio com a mesma temperatura, de 27,52°C. Conforme pode ser observado na Figura 43, o amortecimento foi de 68,27%. Portanto, 68,27% do gradiente térmico (34,23 °C) da temperatura da face exposta foi amortecido pelo mini parede (ou seja, 23,37°C) ocorrendo a transmissão, apenas, de 10,86°C. Todavia, o atraso térmico teve o maior retardamento entre as argamassas estudadas, ou seja, 01h14 min. Pode-se inferir a partir disso, que a argamassa de revestimento contendo 20% borracha reciclada de pneu contribui para maior capacidade de retenção de energia térmica.

É possível constatar que a argamassa contendo borracha reciclada de pneu funciona como bom amortecedor do fluxo térmico, uma vez que a incorporação deste material (na argamassa de revestimento da face exposta) foi a única mudança em relação ao ensaio inicial (reboco sem borracha de pneu).

Assim exposto, evidencia-se a contribuição da borracha de pneu para que a alvenaria atenda a exigência de isolamento térmico e conforto dos moradores da habitação. Sobretudo, por considerar que a obtenção da condição de conforto térmico interno perpassa pela redução

do fluxo de calor que atravessa a alvenaria da habitação rural, controlando a temperatura interna e procurando evitar que o ambiente se torne desconfortável em razão do frio ou calor.

## 5. CONCLUSÃO

Esta pesquisa concluiu que:

(1) O aumento do teor de borracha reciclada de pneu nas argamassas para revestimento de alvenaria, promove diminuição nas densidades de massas, no estado endurecido e fresco, e melhora do espalhamento da mistura;

(2) A incorporação da borracha na argamassa contribui para redução significativa das propriedades mecânicas: resistência a compressão axial, resistência a tração na compressão diametral e resistência a tração na flexão.

(3) O acréscimo da quantidade de borracha reciclada de pneu nas argamassas de revestimento, causa aumento gradativo do amortecimento térmico e do atraso térmico. As argamassas alternativas, contendo borracha de pneu, exercem melhor a função de isolante térmico que a argamassa convencional;

(4) As argamassas que receberam borracha reciclada de pneu tiveram menor coeficiente de condutividade térmica do que a argamassa convencional, evidenciando assim, a capacidade de desempenhar melhor a função de isolante térmico;

(5) Alvenarias com revestimento contendo resíduo de borracha de pneu tem desempenho térmico melhor do que as que são revestidas com argamassa convencional;

(6) Todas as argamassas estudadas apresentaram bom desempenho para uso como revestimento de alvenaria, conforme a NBR 13.281 (ABNT, 2005);

## 6. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

A continuidade da análise do desempenho mecânico e térmico de argamassa, contendo borracha de pneu é de grande importância para garantir a viabilidade de seu uso em aplicações das habitações rurais. Com o objetivo de dar continuidade a este trabalho relativo à incorporação de borracha reciclada de pneu, apresenta-se como sugestões para trabalhos futuros:

(1) Realização de trabalhos referentes ao desempenho físico, mecânico e térmico de argamassa contendo borracha de reciclagem de pneu, alterando o tipo do cimento;

(2) Realização de pesquisa similar as que foram realizadas nesta tese para cálculo de outras propriedades térmicas, a exemplo de calor específico, difusividade, resistência térmica, transmitância, fator ganho solar;

(3) Realização de pesquisa com argamassa de revestimento contendo borracha de pneu e com uso de aditivos químico, para caracterização física, mecânica e térmica do compósito.

## 7. REFERÊNCIAS

- Acevedo, C. R.; Nohara, J.; Caparroz, M. M. O materialismo no contexto dos consumidores de luxo. **Revista ENIAC Pesquisa**, v. 4, n. 2, jul.-dez. 2015.
- Alam, I.; Mahmood, U. A.; Khattak, N. Use of Rubber as Aggregate in Concrete: A Review. **International Journal of Advanced Structures and Geotechnical Engineering**. v. 04, n. 02, p. 92-96, April 2015.
- Alves, V. E. da S; Vasconcelos, G. M.; Moreira, R. N.; Alves Filho, M. de J.; Barreto, T. da S. Impacto ambiental provocado pela destinação incorreta de pneus. **Revista ENIAC Pesquisa**, v. 5, n. 1, jan.- jun. 2016.
- Amaral, J. E. M. do. **Análise das dificuldades associadas ao uso de pneus inservíveis na construção de habitações: o estudo de caso de Goiatuba – GO**. Araraquara-SP: Centro Universitário de Araraquara – UNIARA. 2012. 132p. Dissertação de Mestrado em desenvolvimento regional e meio ambiente
- Andrade, E. S., Guimarães, C. C. Propriedades de argamassas com eva (*ethylene vinyl acetate*) em substituição parcial ao agregado. **REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil**. V.13, n.01, p. 174-192, Jan/2017.
- Araújo, A. V. P. de. **Velocidade de ultrassonografia longitudinal e transversal em concretos estruturais de variadas resistências à compressão simples e à tração por compressão diametral**. Recife-PE. Universidade Católica de Pernambuco. 2015. 156p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil
- Araújo, N. N. de. **Desempenho de argamassas de revestimento produzidas com agregados reciclados oriundos do resíduo de construção e demolição da grande NATAL-RN**. Natal-RN: UFRN. 2014. 130p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7.211. **Agregados para concreto- Especificações**. Rio de Janeiro, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7.222. **Concreto e Argamassa -Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2011.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9.779. **Argamassa e concretos endurecidos-Determinação da absorção de água por capilaridade.** Rio de Janeiro, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13.276. **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos- Preparo da mistura e determinação do índice de consistência.** Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13.278. **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos-Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado.** Rio de Janeiro, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13.279. **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos-Determinação da resistência à compressão.** Rio de Janeiro, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13.280. **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos-Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido.** Rio de Janeiro, 1995.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13.281. **Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos- Requisitos.** Rio de Janeiro, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13.529. **Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas. Terminologia.** Rio de Janeiro, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13.749. **Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas. Especificações.** Rio de Janeiro, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15.220. **Desempenho térmico de edificações.** Rio de Janeiro, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 45. **Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios.** Rio de Janeiro, 2006.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 52. **Agregados miúdo – Determinação da massa específica e da massa específica aparente.** Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 248. **Agregados - Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE PNEUMÁTICOS (ANIP). **História do pneu.** Disponível em: <http://www.anip.com.br/?cont=anip>. Acesso em: 06 abril. 2019.

- Assunção, L. T. de; Carvalho, G. F. de; Barata, M. S. Avaliação das propriedades das argamassas de revestimento produzidas com resíduos da construção e demolição como agregado. **Exacta**, v. 5, n. 2, p. 223-230, jul./dez. 2007.
- Ataíde, J. S. P. **Transferência de calor durante o processo de pasteurização de polpa de frutas armazenamento em recebimento obtido por revolução de áreas planas**. Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande. 2014, 259 p. Tese de Doutorado em Engenharia de Processo
- Benazzouk, A., Douzane, O., Mezreb, K., Laidoudi, B. & Quéneudec, M., Thermal conductivity of cement composites containing rubber waste particles: Experimental study and modeling. **Construction and Building Materials**, 22<sup>a</sup> Ed. p. 573–579, 2008.
- Beraldo, J. C. **Eficiência Energética em edifícios: avaliação e uma proposta de regulamento de desempenho térmico para a arquitetura do estado de São Paulo**. São Paulo: Universidade de São Paulo. 2006. 285p.
- Bezerra, L. A. C. **Análise do desempenho térmico de sistema construtivo de concreto com EPS como agregado graúdo**. Natal-RN: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2003. 64 p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica
- Borém, F. M.; Ribeiro, R. C. de M. S.; Corrêa, P. C.; Pereira, R. G. F. A. Propriedades térmicas de cinco variedades de café cereja descascado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.6, n.3, p.475-480, 2002.
- Cabral, P. **Erros e incertezas nas medições**. Porto-Portugal. Instituto Eletrotécnico Portugues. Junho 2004.
- Callister Jr., W. D. **Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais**, Rio de Janeiro, LTC, 2005.
- Canova, J. A.; Bergamasco, R.; Angelis Neto, G. A utilização de resíduos de pneus inservíveis em argamassa de revestimento. **Acta Scientiarum. Technology**. v. 29, n. 2, p. 141-149, 2007.
- Canova, J. A.; Bergamasco, R.; Angelis Neto, G. Pó de borracha de pneus inservíveis em argamassa de revestimento. **REEC – Revista Eletrônica de Engenharia Civil**. v. 10, n. 3, p. 41-53, 2015.
- Carasek, H. “Argamassas”. In: Isaias, G.C. (ed.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo, IBRACON, v 2., pp. 863-905, 2007.

- Carasek, H.; Cascudo, O.; Santos, M. S. J. dos; Lemes, N. Avaliação em obra da resistência superficial de revestimentos de argamassa. **Revista ALCONPAT**. v. 1, n. 2, p. 115–135, maio-agosto 2011.
- Cardoso, F. A.; Pileggi, R. G.; John, V. M. **Caracterização reológica de argamassas pelo método de squeeze-flow**. VI Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassa, I International Symposium on Mortars Technology. Florianópolis, 2005. p. 121-143. Disponível em <<https://www.gtargamassas.org.br/eventos/file/241-caracterizacao-reologica-de-argamassa-pelo-metodo-de-squeeze-flow>>. Acessado em 06 de março de 2019.
- Castro, A. L.; Santos, R. F. C.; Gonçalves, K. M.; Quarcioni, V. A. Caracterização de cimentos compostos com resíduo da indústria de cerâmica vermelha. **Cerâmica**, v. 63, p. 65-76. 2017.
- Cimino, M. A.; Zanta, V. M. Gerenciamento de pneumáticos inservíveis (GPI): análise crítica de ações institucionais e tecnologias para minimização. **Engenharia Sanitária e Ambiental**. v.10, n. 4, p. 299-306, out/dez 2005.
- Cintra, C. L. D. **Argamassa de revestimento com propriedades termo acústica, produzidas a partir de vermiculita expandida e borracha de pneu reciclada**. São Carlos-SP: UFSCar, 2013. 182p. Tese de Doutorado em Ciências e Engenharia de Materiais
- 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 pneu-Propriedades relevantes. **Cerâmica**. v. 60, n. 353, p 69-76, fev. 2014.
- Clarke, J.A.; Yaneske, P.P. A rational approach to the harmonisation of the thermal properties of building materials. **Building and Environment**. v. 44, p. 2046–2055. 2009.
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução CONAMA N°. 416, de 30 de setembro de 2009.
- Correia, S.M.B.B. **Probabilidade e Estatística**. 2ª Edição. PUC Minas Virtual, Belo Horizonte. 2003.
- Dornelles, K. A. **Estudo de casos sobre a inércia térmica de edificações na cidade de São Carlos-SP**. São Carlos-SP: UFSCar, 2004. 150 p. Dissertação de Mestrado em Construção Civil.
- Dubaj, E. **Estudo Comparativo Entre Traços de argamassa de revestimento utilizadas em Porto Alegre**. Porto Alegre-RS. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2000. 115p. Dissertação de Mestre em Engenharia

- Faria, J. S. de. **Incorporação de resíduo pó de borracha de pneus inservíveis em cerâmica vermelha**. Campos dos Goytacazes–RJ: Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF), 2015. 137p. Dissertação de Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais
- Farias, R. P. de. **Secagem de banana em estufa: efeitos térmicos e geométricos**. Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande. 2011. 136 p. Tese de Doutorado em Engenharia de Processos
- Farias, V. S. de O. **Difusão 3D em sólidos com forma arbitrária usando coordenadas generalizadas**. Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande. 2011, 265 p. Tese de Doutorado em Engenharia de Processos.
- Ferreira, C. R. G. **Análise de propriedades térmicas e mecânicas de compósitos de argamassa e resíduo de borracha**. Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2009. 74 p. Dissertação de Mestre em Ciência e Engenharia dos Materiais
- Ferreira, K. C. **Estudo de parâmetros físicoquímicos para a produção de argamassas utilizando resíduos industriais e da construção civil**. Belém: Universidade Federal do Pará. 2014. 75 p. Dissertação de Mestre em Engenharia Química
- 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**, v. 7, n. 4, p. 43-54, 2007.
- Flores, C.; S. Rodríguez, S.; Cárdenas, A.; Guarneros, O. Evaluación mecánica de concreto y de corrosión en mortero con partículas de neumático reciclado. **Revista ALCONPAT**, v. 3, n. 3, p. 192 – 203. Septiembre - Diciembre 2013.
- Ford, E. T. L. C. **Desenvolvimento de material compósito a base de raspa de pneu e látex para isolamento térmico**. Natal-RN: UFRN, 2011. 164p. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica
- Frota, A. B., Schiffer, S. R., **Manual Conforto Térmico**, 7ª. ed., v. 1, São Paulo, Studio Nobel, 2005.
- Giacobbe, S. **Estudo do Comportamento Físico–Mecânico do Concreto de Cimento Portland com Adição de Borracha de Pneus**. São Paulo: USP, 2008. 106p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil e Urbana
- Golub, A.; Silva, C. V. da. Influência do uso de materiais alternativos em argamassa de revestimento interno: avaliação quanto ao isolamento térmico. **Perspectiva**, v. 41, n.154, p. 111-126, junho/2017

- Gomes, E. G. S. **Desempenho térmico de alvenaria: alternativa com uso de blocos de EVA**. João Pessoa: UFPB, 2015. 127p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil e Urbanismo
- Graças, J. A. das. **Residências Sustentáveis e sua Contribuição ao Meio Ambiente**. Guimarães/Portugal: Universidade de Minho, 2010. 133p. Dissertação Mestrado
- Grilo, M. B.; Cardoso, F.I.B. **Simulador de radiação solar, resultados, funcionamento e testes em um equipamento construído**. In: <https://www.ipen.br/biblioteca/cd/conem/2000/DC8738.pdf>, acesso em 22/02/2019.
- Hollmuller, P.; Lamberts, R.; Westphal, F. S.; Ordenes, M. M.; Carlo, J. C. **Potencial da ventilação inercial para resfriamento passivo em climas brasileiros**. In: Encontro Nacional de Conforto do Ambiente Construído, ENCAC, 2005. Disponível em <https://archive-ouverte.unige.ch/unige:18082>, acesso em 01/05/2019.
- Incropera, F.P.; DeWitt, D. P.; Bergman, T.L; Lavine, A. S. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**, 6a edição, LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S. A., Rio de Janeiro 2008.
- Isaia, G. C.; Furquim, P. R. de V.; Gastaldini, A. L. G. Análise estatística de variáveis influentes na microestrutura e durabilidade de concretos com adições minerais. **Ambiente Construído**, v. 9, n. 1, p. 07-23, jan./mar. 2009.
- Izquierdo. O. S. **Influência do tipo de argamassa e da utilização de peças de ajustes dimensional na resistência á compressão da alvenaria de blocos de concreto**. São Carlos-SP: Universidade de São Paulo. 2011. 179 p. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Estruturas
- Kazmierczak, C. de S.; Rosa, M.; Arnold, D. C. M. Influência da adição de filer de areia de britagem nas propriedades de argamassas de revestimento. **Ambiente Construído**, v. 16, n. 2, p. 7-19, abr./jun. 2016.
- Khatib, Z. K.; Bayomy, F. M. Rubberized Portland cement concrete. **Journal of materials in civil engineering**, p. 206-213. august 1999.
- Kurz, M. N.; Brandelli, T. M.; Paliga, C. M.; Torres, A. da S. A potencialidade do uso de resíduo de borracha de pneu em argamassa: análise das propriedades físicas e mecânicas. **Revista Matéria**, v. 23, n. 3, 2018.
- Lagarinhos, C. A. F.; Tenório, J. A. S. Tecnologias utilizadas para a reutilização, reciclagem e valorização energética de pneus no Brasil. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 18, n. 2, p. 106-118, 2008.

- Lamberts, R.; Ghisi, E.; Abreu, A. L. P. de.; Carlo, J. C. **Desempenho térmico de edificações**. Apostila da Disciplina de Graduação ECV 5161, Graduação em Engenharia Civil. 3.ed. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2005. 82p.
- Libera, F. V. D., Zanini; M. A.; Rossato, M. V.; Guse, J. C.; Dorr, A. D. Parâmetros operacionais para implantação de uma recicladora de pneus inservíveis em Santa Maria – RS. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**. v. 6, n. 6, p. 1049–1065, 2012.
- Lima, F. A. S de. **Obtenção e caracterização de um compósito de matriz cerâmica com cargas de resíduos de EPS e raspa de pneu para construção de casas populares**. Natal: UFRN, 2016. 101 p. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica
- Lopes Neto, J. P. **Construções e Instalações Rurais**. Brasília – DF. NT editora. 2017.
- Lyra, D. S. F. M. **Aplicabilidade de índices de conforto térmico: um estudo de caso em Salvador – BA**. Universidade Federal da Bahia. 2007. 132 p. Dissertação Mestrado
- Maia, J. A. ; Gonçalves, F. L. T. **Uma análise do conforto térmico e suas relações meteorotrópicas na cidade de São Paulo** – In: XII Congresso Brasileiro de Meteorologia, p. 305-314, Foz de Iguaçu, 2002. Disponível em: <http://www.cbmet.org.br/cbm-files/11-19f8631710445b997afefb613926e2b0.pdf>. Acessado em: 27/04/2019
- Marques, A. C. **Estudo da influência da adição de borracha vulcanizada em concreto à temperatura ambiente e elevada temperatura**. Ilha Solteira-SP: UNESP. 2005. 117p. Dissertação de Mestre em Engenharia Civil
- Marques, A. C., Nirschl, G. C.; Akasaki, J. L. Propriedades Mecânicas do concreto adicionado com borracha de pneus. **HOLOS Environment**, v.6, n.1, p. 31-41, 2006.
- Marques, W; Castro, R. de; Isaac, M. **Desempenho térmico de alvenaria de solo-cimento e sua adequação ao zoneamento bioclimático brasileiro**. In: X Encontro Nacional e VI Encontro Latino Americano de Conforto no ambiente construído. Anais. Natal-RN. 2009.
- Martins, A. F.; Callejas, I. J. A.; Durante, L. C.; Rosseti, K. de A. C.; Louzich, K. M. D.; Cardoso, A. A. **Condutividade térmica de argamassas de revestimento: uma revisão sistemática**. In: XVI Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. São Paulo. 2016.
- Meneguini, E. C. A. **Comportamento de argamassas com o emprego de pó de borracha**. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2003. 101p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil

- Mohamad, G.; Santos Neto, A.B.S.; Pelisser F.; Lourenço, P.B.; Roman, H.R. Caracterização mecânica das argamassas de assentamento para alvenaria estrutural – previsão e modo de ruptura. **Revista Matéria**, v. 14, n.2, p. 824 – 844, 2009.
- Moran, M. J.; Shapiro, H. N. **Princípios de termodinâmica para engenharia**. 6a edição. Rio de Janeiro. LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S. A. 2009.
- Motta, F. de C. **Caracterização da condutividade térmica, viscosidade dinâmica e ângulo de contato de nanofluidos baseados em partículas de alumina-gama em água**. São Carlos-SP: Universidade de São Paulo, 2012. 102p. Dissertação do Mestrado em Engenharia Mecânica
- Motta, F. G. A cadeia de destinação dos pneus inservíveis – o papel da regulação e do desenvolvimento tecnológico. **Ambiente & Sociedade**, v. 11, n. 1, p. 167-184, jan.-jun. 2008.
- Najim, K. B. External load-bearing walls configuration of residential buildings in Iraq and their thermal performance and dynamic thermal behaviour. **Energy and Buildings**. v. 84, p.169–181, 2014.
- Nakakura, E. H.; Cincotto M. A. **Análise dos requisitos de classificação de argamassas de assentamento e revestimento**. São Paulo: Escola Politécnica da USP, 2004. Boletim Técnico BT/PCC/359.
- Nóbrega, R. S.; Lemos, T. V. da S. O microclima e o (des)conforto térmico em ambientes abertos na cidade do Recife. **Revista de Geografia (UFPE)** v. 28, n 1, p. 93-109, 2011.
- Oda, S.; Fernandes Júnior, J. L. Borracha de pneus como modificador de cimentos asfálticos para uso em obra de pavimentação. **Acta Scientiarum**. v. 23, n. 6, p. 1589-1599, 2001.
- Oliveira, O. J. de; Castro, R. de. **Estudo da destinação e da reciclagem de pneus inservíveis no Brasil**. XXVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Foz do Iguaçu-PR. Outubro 2007. Disponível em <[http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2007\\_TR650481\\_0291.pdf](http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2007_TR650481_0291.pdf)>, acessado em 25 de fevereiro de 2019;
- Oliveira, W. L.; Xavier, A. A. B.; Souza, P. M. S; Chaves, R. C. F.; Silva, L.O. **Determinação do coeficiente de condutividade térmica de compósitos constituídos a partir da fibra de coco**. VI Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental. Porto Alegre, 2015. Disponível em:< <https://www.ibeas.org.br/congresso/congresso6.htm>>, acessado em 22 de fevereiro de 2019;
- Özişik, M. N. **Transferência de calor: um texto básico**. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Koogan S.A. 661 p. 1990.

- Papst, A. L. **Uso de Inércia térmica no clima subtropical. Estudo de caso em Florianópolis – SC.** Florianópolis,- UFSC. 1999. 165p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil
- Pedro, D.; Brito, J. de; Veiga, R. Argamassas fabricadas com materiais finos provenientes da trituração de pneus. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, n.19, p.63-76, Maio, 2012.
- Pereira, C. D. **A Influência do Envelope no Desempenho Térmico de Edificações Residenciais Unifamiliares Ocupadas e Ventiladas Naturalmente.** Florianópolis: UFSC, 2009. 141p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil
- Pétalas, K. V. **Estudo da sensação térmica e definição de limites de conforto para espaços abertos na cidade de Fortaleza, CE.** Fortaleza: Universidade Federal do Ceará. 2015. 274p. Tese de Doutorado em Engenharia Civil
- Pinto, N. A.; Akasaki, J. L. Incorporação de resíduos de borracha de pneus em matriz de gesso para utilização na construção civil. **Revista de Engenharia Civil.** Universidade do Minho. N. 53,p. 43-56. 2016.
- Pinto, N. A.; Fioriti, C. F. Avaliação de argamassas mistas de revestimento produzidas com borracha de pneus. **Revista Tecno-Lógica**, v. 20, n. 2, p. 103-110, Jul/Dez. 2016.
- Polycarpo, E. **Noções rápidas de estatística e tratamento de dados.** Disponível em <<https://www.if.ufrj.br/~poly/pdf/Modulo5.pdf>>. Acessado em 01 de março de 2019.
- Prado, L. F. P.; Resende, H. F.; Caldas, R. B.; Silva, R. M.; Bueno, M. dos S. Uso de análise numérica no estudo da resistência à ação de calor e choque térmico em painéis de fachada. **Revista Construindo.** V. 10, n. 01, p. 75 – 91. Jan – jun., 2018.
- PROTOLAB-Laboratório de Propriedades Termo-físicas e Prototipação. Tabela de condutividade térmica de materiais de construção. Disponível em: <<http://www.protolab.com.br/Tabela-Condutividade-Material-Construcao.htm>> Acesso em: 4 de março de 2019.
- Pczieczek, A. **Análise das propriedades físicas e mecânicas de argamassa para revestimento utilizando cinza volante e resíduos de borracha de pneus inservíveis.** Joenville. Universidade Estadual de Santa Catarina. 2017. 141p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil
- Queiroz, C. de A; Melo, A. B. Caracterização das propriedades térmicas da pedra reconstituída com resíduos da extração de quartzito para aplicação em revestimento de fachadas de edifícios. **REEC- Revista Eletrônica de Engenharia Civil.** v. 15, n. 1, p. 136-150. 2019.

- Rocha, A. A. **Desenvolvimento e análise térmica de textura tipo fulget usada para revestimentos de paredes externas em edificações**. Campina Grande: UFCG, 2018. 167 p. Tese de Doutorado em Engenharia de Processos
- Rocha, V de P. T. **Conforto térmico de residência no semiárido paraibano: estudo de caso**. Campina Grande: UFCG, 2016. 152 p. Dissertação de mestrado em Engenharia Agrícola
- Roriz, M. **Conforto e desempenho térmico de edificações**. Apostila da Disciplina, 2008.
- Sacht, H. M.; Rossignolo, J.A.; Santos, W.N. Avaliação da condutividade térmica de concretos leves com argila expandida. **Revista Matéria**. v. 15, n. 1, p. 031–039, 2010.
- Santos, W. N. dos; Gregório Filho, R.; Mummery, P.; Wallwork, A. Método de Fio Quente na Determinação das Propriedades Térmicas de Polímeros. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 14, n. 5, p. 354-359, 2004.
- Segre, N. C. **Reutilização de borracha de pneus usados como adição em pasta de cimento**. Campinas. Universidade Estadual de Campinas. 1999. 104 p. Tese de Doutorado em Química
- Silva, C. ; Sousa, V.C. ; Ferreira, T.; Oliveira, A.M. **Avaliação de propriedades no estado fresco e endurecido de argamassas de revestimento cimentícias produzidas com aditivos químicos plastificantes**. XXII CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. Natal. 2016. p. 761-773. Disponível em: <<http://www.metallum.com.br/22cbecimat/anais/PDF/104-061.pdf>>, Acessado em 05 de março de 2019.
- Silva, E. P. da; Melo, A. B. de; Queiroga, A. B. R. do E. **Desempenho térmico de vedações: estudo comparativo com blocos de E.V.A., tijolo cerâmico e gesso acartonado**. XII Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, 2013, Brasília-DF. Disponível em: <<http://www.infohab.org.br/encac/files/2013/topico4artigo35.pdf>>, Acessado em 07/02/2019;
- Silva, D. F.; Araújo, E. M.; Melo, T. J. A. Desenvolvimento de blendas de poliamida 6/composto de borracha reciclada (SBRr). **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v.7, p. 104 – 110, 2012.
- Silva, R. P.; Barros, M. M.S.B.; Pileggi, R. G.; John, V. M. **Avaliação do comportamento da argamassa no estado fresco através dos métodos de mesa de consistência, dropping ball e squeeze flow**. In: VI Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas. Florianópolis. 2005. Disponível em:

<<https://www.gtargamassas.org.br/eventos/category/6-vi-sbta-2005>>, acessado em 04 de março de 2019;

- Silva, T. R. **Comportamento Mecânico de Argamassas de Reboco com Regranulado Negro de Cortiça**. Lisboa-Portugal: IJT. 2014. 147p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil
- Silva, W. P. e Silva, C. M. D. P. S., **Tratamento de Dados Experimentais**. João Pessoa: UFPB/Editora Universitária, 2<sup>a</sup> Edição, 1998, 197 p.
- Silveira, P.M.; Albuquerque, M.C.F.; Cassola, S.; Bortolucci, A.A.; Paulli, L.D.; Villa, F.M.D. Estudo do comportamento mecânico do concreto com borracha de pneu. **Revista Matéria**, v.21, n.2, p. 416–428, 2016.
- Souza, C. R. **Avaliação do desempenho térmico de vedações em blocos de concreto produzidos com lã de rocha**. Salvador: UFBA, 2017. 187p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana
- Stancato, A. C. **Determinação da condutividade térmica e da resistência mecânica em argamassa leve**. Campinas: Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas. 2000. 155p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil
- Werlang, R. B.; Silveira, F. L. da; A Física dos Pneumáticos. **Caderno Brasileiro de Ensino da Física**, v. 30, n. 3, p. 614-627, dez. 2013.
- Zanelatto, K. C. Barros, M .M. S. B., Monte, R., Sabbatini, F. H. Avaliação da influência da técnica de execução no comportamento de revestimento de argamassa aplicado com projeção mecânica contínua. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 13, n. 2, p. 87-109, abr./jun. 2013.