



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

AUTOR: UBIRACI SILVA NASCIMENTO

Borracha de Pneus no Isolamento Térmico de Paredes e Tetos: Modelagem, Validação e Comparação com Paredes Convencionais

**CAMPINAS
2020**



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

AUTOR: UBIRACI SILVA NASCIMENTO

Borracha de Pneus no Isolamento Térmico de Paredes e Tetos: Modelagem, Validação e Comparação com Paredes Convencionais

Tese de Doutorado apresentada à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica, na Área de Térmicas e Fluidos

Orientador: **Prof. Dr. Kamal Abdel Radi Ismail**

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA TESE DO ALUNO UBIRACI SILVA NASCIMENTO, E ORIENTADO PELO PROF. DR KAMAL ABDEL RADI ISMAIL

CAMPINAS
2020

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

N17b Nascimento, Ubiraci Silva, 1962-
Borracha de pneus no isolamento térmico de paredes e tetos : modelagem, validação e comparação com paredes convencionais / Ubiraci Silva Nascimento. – Campinas, SP : [s.n.], 2020.

Orientador: Kamal Abdel Radi Ismail.

Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Borracha. 2. Pneus. 3. Isolamento térmico. 4. Materiais compostos. I. Ismail, Kamal Abdel Radi, 1940-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Tire rubber for thermal insulation of walls ceilings: modeling, validation and comparison with conventional walls

Palavras-chave em inglês:

Rubber

Tires

Thermal insulation

Thermal conductivity

Composite materials

Área de concentração: Térmica e Fluídos

Titulação: Doutor em Engenharia Mecânica

Banca examinadora:

Kamal Abdel Radi Ismail

Vicente Luiz Scalon

Jorge Recarte Henriquez Guerrero

Waldir Antônio Bizzo

Alcides Padilha

Data de defesa: 08-10-2020

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Mecânica

Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)

- ORCID do autor: 0000-0002-4069-601X

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/4862.0300.2911.9964>

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

TESE DE DOUTORADO

**Borracha de Pneus no Isolamento Térmico de Paredes e Tetos:
Modelagem, Validação e Comparação com Paredes
Convencionais**

Autor: Ubiraci Silva Nascimento

Orientador: Prof. Dr. Kamal Abdel Radi Ismail

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Tese:

Prof. Dr. Kamal Abdel Radi Ismail, Presidente
FEM/UNICAMP/CAMPINAS/SP

Prof. Dr. Waldir Antônio Bizzo
FEM/UNICAMP/CAMPINAS/SP

Prof. Dr. Vicente Luiz Scalon
DEM/UNESP/BAURÚ/SP

Prof. Dr. Jorge Recarte Henriquez Guerrero
DEM/UFPE/PERNAMBUCO/PE

Prof. Dr. Alcides Padilha
DEM/UNESP/BAURÚ/SP

A Ata de Defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no SIGA/Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese e na Secretaria do Programa da Unidade.

Campinas, 08 de outubro de 2020

Dedicatória

Dedico este trabalho em memória do meu filho Ubiraci Filho, por acreditar que "O segredo da vida é a esperança e a morte nunca é o fim, nos veremos no novo Renascer".

Aos meus familiares, que partilhei toda a minha vida, aos meus irmãos: Francimar, Paraci, Caubi, Moacir Filho (em memória), Lucimar, Cleidimar, Leidimar, Ubirani e a meus pais Moacir Nascimento (em memória) e mãe Maria José, pelo incentivo e ajuda nas orações durante toda a jornada do DINTER.

Em especial a minha família atual, esposa Sandra e filhos: Pablo, Luana e João Pedro, pelo apoio e incentivo incondicional ao longo do trabalho.

Agradecimentos

Este trabalho não poderia ser terminado sem a ajuda de diversas pessoas às quais presto meus agradecimentos:

Inicialmente, A Deus, por sempre me acompanhar em todos os momentos difíceis e felizes da minha vida.

Aos meus pais pelos ensinamentos proporcionados, mesmo sem ter escolaridade, me mostraram os valores morais, éticos e cidadania, entre outros.

A minha esposa Sandra e meu filho João Pedro, por estarem sempre ao meu lado nessa jornada.

Ao meu orientador prof. Kamal, que me mostrou os caminhos a serem seguidos.

A todos os professores e colegas do DINTER, que ajudaram de forma direta e indireta na conclusão deste trabalho, em especial os professores da banca de avaliação.

Aos amigos do dia a dia: da Igreja, do futebol, do DEFIS-UEMA, aos irmãos e familiares, que sempre acreditaram e me deram força, principalmente na fase da prova de proficiência.

Um agradecimento especial para os amigos: Passinho, Pestana, Flávio, André e Ribeirinho, que se mantiveram sempre presentes na ajuda e retirada de dúvidas em todas as etapas dessa Tese.

Finalmente, não poderia esquecer da força dos meus orientandos de iniciação científica: Alúcio, Thalison, Lucas e Nizar e aos amigos: José de Ribamar e Cláudia Rosa, que me ajudaram na reta final deste trabalho.

*A Natureza humana parece nos dotar da habilidade
de formular conceitos sobre todas as pessoas do
mundo, exceto de nós mesmos*

(John C. Maxwell)

Resumo

O aquecimento e arrefecimento de edifícios e residências é responsável por quase 25% do consumo de eletricidade. Entre os métodos utilizados para reduzir esse consumo de energia, estão a utilização de paredes e tetos térmicos. Este estudo tem o objetivo de melhorar o conforto térmico, reduzindo o consumo de energia e reutilizar pneus inservíveis. Uma bancada experimental é concebida e calibrada para determinar a condutividade térmica da borracha dos pneus usados de diferentes grãos e a resistência térmica global das paredes e tetos compostos. Um modelo de condução é formulado para paredes planas de várias camadas, discretizado de forma explícita em diferenças finitas e um código é elaborado em MATLAB, testado e validado. A investigação numérica é feita para analisar os efeitos da espessura da parede, condutividade térmica do material, cor, biomassa e preenchimento de borracha sobre o Fator de Decremento, atraso no tempo e o ganho total de calor interno. As medições experimentais mostraram uma condutividade térmica da borracha granulada de 0,25 W/m.K e de 0,39 W/m.K para a parede composta. As simulações indicaram uma redução de 21% no fator de decremento e um aumento no atraso de 1,63 vezes, quando comparado com a parede rebocada para uso local. O teto mostrou uma redução de 23,3% no ganho de calor solar, ao aumentar a sua espessura de 15 para 25 cm.

Palavras-chave: Borracha; Pneus; Parede térmica; Condutividade térmica; Parede composta; Parede com enchimento de borracha

Abstract

Heating and cooling of buildings and residences is responsible for almost 25% of the electricity demand. Among the methods used to reduce energy demands are the use thermal walls and roofs. This study has the objective of achieving thermal comfort, reduce energy demands and reuse rejected tires. An experimental rig is designed and calibrated to determine the thermal conductivity of crushed tires rubber of different grains and the overall thermal resistance of composite walls and roofs. A conduction model is formulated for multilayered plane wall, discretized in explicit form in finite difference and a home built code is elaborated in MATLAB, tested and validated. Numerical investigation is done to analyze the effects of the wall thickness, thermal conductivity of the material, color, gap and rubber filling of the gap on Decrement Factor and Time Lag and total internal heat gain. Experimental measurements showed a thermal conductivity of crushed rubber of about 0.25 W/m.K and of about 0.39 W/m.K for the composite wall. The simulations indicated a 21% reduction in the decrease factor and an increase in the elapsed time of 1.63 times, when compared with the plastered wall for local use. The ceiling showed a 23.3% reduction in solar heatgain, by increasing its thickness from 15 to 25 cm.

Keywords: Rubber; Tires; Thermal Wall; Thermal Conductivity; Composite wall; Wall with rubber filling.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1	Trabalhadores da coleta seletiva de São Luís	26
Figura 2.2	Composição de pneus radiais para automóveis	29
Figura 2.3	Partes de um pneu radial, com a nomenclatura usada	30
Figura 2.4	Apresentação das partes que compõem o pneu	31
Figura 2.5	Esquema dos fenômenos de transferência de calor na parede	45
Figura 2.6	Transmitância térmica em uma parede	51
Figura 3.1	Fluxograma do desenvolvimento do experimento	67
Figura 3.2	Desenho esquemático da Instalação Experimental	68
Figura 3.3	Planta baixa e localização dos Pontos de Medição	69
Figura 3.4	Conjunto <i>Dimmer</i> , Termostato e Fonte	72
Figura 3.5	Termopar Tipo K	73
Figura 3.6	Termômetro de Precisão em uso na Calibração dos Termopares	74
Figura 3.7	<i>Datalogger</i> utilizado para as medições	75
Figura 3.8	Lâmpada Incandescente de 40W	77
Figura 3.9	Tijolo Maciço (0,05x0,10x0,20) m	78
Figura 3.10	Tijolo Furado (0,10x0,15x0,20) m	78
Figura 3.11	Perfil em U de Aço Galvanizado	79
Figura 3.12	Barra Roscada-Tipo Parafuso	79
Figura 3.13	Dobradiça –Tarugo	79
Figura 3.14	Eletrodo Elétrico –Solda	79
Figura 3.15	Tinta Esmalte Sintético	79
Figura 3.16	Grãos de Pneus Cortados	80
Figura 3.17	G2 – Granulado de Pneu de Borracha, espessura de 2mm à 3,2 mm	81
Figura 3.18	G3 – Granulado de Pneu de Borracha, espessura de 0,68mm á 2mm	81
Figura 3.19	Paquímetro Universal Analógico	82
Figura 3.20	Tiras de Poliestireno Expandido	83
Figura 3.21	Balança com avaliação da Massa dos Grãos de Pneus	84
Figura 3.22	Parede dupla de alvenaria-NUTENGE	84
Figura 3.23	Vista geral da Montagem da Bancada	84
Figura 3.24	Ligações Iniciais dos Termopares	84
Figura 3.25	Vista com os pneus picados e termopares instalados	84
Figura 3.26	Experimento em andamento	85
Figura 3.27	Coleta de dados	85
Figura 3.28	Configuração da Parede 01	85
Figura 3.29	Configuração da Parede 02	86
Figura 3.30	Configuração da Parede 03	86
Figura 3.31	Configuração da Parede 04	87
Figura 3.32	Configuração da Parede 05	87
Figura 3.33	Configuração da Parede 06	88

Figura 3.34	Incursão dos termopares e foto real das Paredes 01 e 02	96
Figura 3.35	Incursão dos termopares e foto real das Paredes 03 e 04	97
Figura 3.36	Incursão dos termopares e foto real das Paredes 05 e 06	98
Figura 3.37	Aferição da temperatura da parede do prédio de Física da UEMA	100
Figura 3.38	(Parede da UEMA)-Variação da Temperatura x horas do dia	100
Figura 4.1	Composição da parede composta com pontos de interesse	104
Figura 4.2	Pontos no interior da malha	107
Figura 4.3	Nó entre as duas placas	108
Figura 4.4	Condição do nó na fronteira externa	109
Figura 4.5	Discretização na fronteira interna do ambiente	110
Figura 4.6	Intensidade da Radiação Horária Média em São Luís	112
Figura 4.7	Os valores do fator e a curva de ajuste	114
Figura 4.8	Temperatura horária baseada no modelo da ASHRAE e dados do INMET	115
Figura 4.9	Fluxograma sintético do programa computacional	117
Figura 4.10	Comparação da temperatura interna prevista com os resultados de Ozel	118
Figura 4.11	Comparação dos fatores de decremento previstos e dos atrasos no tempo com os resultados de Asan e Sancaktar	119
Figura 5.1	Parede Composta de Três Camadas	122
Figura 5.2	Condutividade Térmica na Variação de Granulometria dos pneus Paredes (P1 a P5)	131
Figura 5.3	Condutividade Térmica das Paredes P1 e P6	131
Figura 5.4	Temperatura em ambas as faces da parede P6 ao longo do dia	134
Figura 5.5	Efeito da variação da granulometria nas temperaturas da superfície externa	136
Figura 5.6	Efeito da variação da granulometria nas temperaturas da superfície interna	136
Figura 5.7	Efeito da granulometria sobre o fator de decremento e o atraso no tempo	137
Figura 5.8	Efeito da variação da espessura da parede nas temperaturas da superfície externa	138
Figura 5.9	Efeito da variação da espessura de parede nas temperaturas da superfície interna	138
Figura 5.10	Efeito da espessura da parede sobre o fator de decréscimo e o desfasamento temporal	139
Figura 5.11	Efeito da variação de cores da pintura externa da parede padrão nas temperaturas da superfície externa.	141
Figura 5.12	Efeito da variação de cores da pintura externa da parede padrão nas temperaturas da superfície interna.	141
Figura 5.13	Efeito da cor da parede sobre o fator de decremento e o defasamento temporal.	142
Figura 5.14	Efeito da variação do uso de materiais de construção da parede padrão nas temperaturas da superfície externa.	143
Figura 5.15	Efeito da variação do uso de materiais de construção da parede padrão nas temperaturas da superfície interna.	144

Figura 5.16	Efeito do tipo de material de construção sobre o fator de decréscimo e o desfasamento temporal	144
Figura 5.17	Efeito da variação da adição de biomassa em argamassa de revestimento da parede padrão nas temperaturas da superfície externa	146
Figura 5.18	Efeito da variação da adição de biomassa em argamassa de revestimento da parede padrão nas temperaturas da superfície interna.	146
Figura 5.19	Efeito da variação da adição de biomassa em argamassa de revestimento da parede padrão nas temperaturas da superfície externa	147
Figura 5.20	Temperatura da parede externa para várias modelagens de paredes.	149
Figura 5.21	Temperatura da parede interna para várias modelagens de paredes.	149
Figura 5.22	Efeito do tipo de parede sobre o fator de decréscimo e o desfasamento temporal	150
Figura 5.23	Corte Transversal da casa de 100m ² .	151
Figura 5.24	Detalhe do Teto com Laje de Concreto Maciça da Casa de 100m ² .	151
Figura 5.25	Temperaturas da superfície externa das lajes de teto	153
Figura 5.26	Temperaturas da superfície interna das lajes de teto	153
Figura 5.27	Efeito da espessura do teto sobre o fator de decréscimo e o desfasamento temporal	154

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 2.1	Apresenta os valores de k para alguns materiais usados na construção	49
Tabela 3.1	Eficiência de Lâmpadas Incandescentes	76
Tabela 3.2	Exigências do cimento Portland CP-II-F-32	89
Tabela 3.3	Dados utilizados na calibração dos Termopares	93
Tabela 3.4	Equação de regressão linear dos termopares	93
Tabela 4.1	Fator da equação para a temperatura diária	113
Tabela 5.1	Média das temperaturas aferidas nas faces da parede P1	121
Tabela 5.2	Média das temperaturas aferidas nas faces da parede P2	123
Tabela 5.3	Média das temperaturas aferidas nas faces da parede P3	125
Tabela 5.4	Média das temperaturas aferidas nas faces da parede P4	126
Tabela 5.5	Média das temperaturas aferidas nas faces da parede P5	127
Tabela 5.6	Média das temperaturas aferidas nas faces da parede P6	129
Tabela 5.7	Medidas da Massa por m^2 de Parede para cada Granulometria	132
Tabela 5.8	Dados para a simulação do grupo – G1	135
Tabela 5.9	Grupo-G1-Variação de Granulometria da Borracha	136
Tabela 5.10	Dados para simulação do grupo – G2	137
Tabela 5.11	Grupo-G2-Variação da Espessura da parede	139
Tabela 5.12	Dados para a simulação do grupo – G3	140
Tabela 5.13	Grupo-G3-Variação de cores da parede	141
Tabela 5.14	Dados para a simulação do grupo – G4	142
Tabela 5.15	Grupo-G4-Diferentes materiais de construção	144
Tabela 5.16	Propriedades térmicas da biomassa	145
Tabela 5.17	Dados para a simulação do grupo – G5	145
Tabela 5.18	Grupo-G5-Adição de Biomassa em paredes	147
Tabela 5.19	Dados para a simulação do grupo – G6	148
Tabela 5.20.	Grupo-G6-Comparação entre as paredes P1, P6 e P23	149
Tabela 5.21	Dados para a simulação do grupo – G7	152
Tabela 5.22	Grupo-G7-Variação das Espessuras das Lajes de Teto	153
Quadro 3.1	Tabela Climática INMET	101
Quadro 5.1	Resumo dos Resultados do Experimento	130

NOMENCLATURA

Letras Latinas

Q – quantidade de calor	[kcal]
S – superfície	[m ²]
e – espessura da parede	[m]
k – coeficiente de condutividade térmica	[W/m.K]
U – tensão elétrica	[V]
I – corrente elétrica	[A]
R – resistência elétrica	[Ω]
R _t – resistência térmica total	[m ² °C/W]
U – transmitância térmica	[(W/m ² °C)
R _{se} – resistência superficial interna	(m ² °C/W)
R _{si} – resistência superficial externa	(m ² °C/W)
E – espessura de camada do material	[m]

Letras gregas

Δt – diferença de temperatura	[°C, K]
\dot{Q} – fluxo de calor	[kcal/h]
α – difusividade térmica	[m ² /s]
α_s – absorvidade	[adimensional]
ϵ – emissividade da superfície	[adimensional]
ρ – massa específica	[kg/m ³]
σ – constante de Stefan-Boltzmann	[adimensional]
τ – número adimensional de Fourier da malha	[adimensional]

Superescritos

\dot{q}_{cond} – Fluxo de calor por condução	[W]
------------------------------------------------	-----

Subscritos

c_p – calor específico	[J/kg.K]
T_{max} – temperatura máxima	[°C]
T_{min} – temperatura mínima	[°C]
k_{ef} – condutividade térmica efetiva da parede composta	[W/mK]
D _f – Fator de decremento	[adimensional]
TI – Atraso no tempo	[h]
Pi-Si - Paredes – Simulações	[-]
T _{EXT} - Temperatura do ambiente externo	[°C]
T _{INT} - Temperatura do ambiente interno	[°C]
E _p - Espessura da parede	[cm]
E _b - Espessura da borracha	[cm]
k _p - Condutividade térmica efetiva da parede	[W/m.K]
k _b - Condutividade térmica da	[W/m.K]

Abreviações

LCD – liquidcrystal display (display de cristal líquido)

MDF – Método de Diferenças Finitas

RET – Retardamento do pico de temperatura

SNMP – Simple Network Management Protocol (Protocolo Simples de gerenciamento de redes)

USB – Universal Serial Bus (Porta Universal)

EPS – sigla internacional de Poliestireno Expandido

F.e.m – Força eletromotriz

Siglas

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnica

ANSI – American National Standards Institute (Instituto Nacional Americano de Padrões)

ASHRAE – American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers (Sociedade Americana de Engenheiros de Refrigeração e Ar Condicionado para Aquecimento)

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

IPT – Instituto de Pesquisa Tecnológica

LABFIS – Laboratório de Física da UEMA

LABSOL – Laboratório de Energia Solar da UFRGS

MME – Ministério de Minas e Energia

NBR – Norma Técnica Brasileira

NUTENGE – Núcleo Tecnológico de Engenharia Mecânica da UEMA

RADIASOL 2 - Software para geração de dados horários de radiação solar

SBPC – Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência

SENAI – Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial

UEMA – Universidade Estadual do Maranhão

UFGO – Universidade Federal de Goiás

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

SEMOSP – Secretaria Municipal de Obras e Serviços Público de São Luis-Ma

PMRS – Programa Municipal de Resíduos Sólidos

SEMUS – Secretaria Municipal de Saúde de São Luís-Ma

SIMPEP – Simpósio de Engenharia de Produção

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

BNDES – Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social

CEMPRE – Compromisso Empresarial para Reciclagem

PGIRPN – Plano de Gerenciamento Integrado de Resíduos Pneumáticos

DECEX – Departamento de Comércio Exterior

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	20
1.1	Contextualização do Estudo.....	21
1.2	Justificativa	21
1.3	Objetivo Geral.....	22
1.3.1	Objetivos Especificos.....	22
1.4	Descrição do Trabalho.....	22
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	24
2.1	Pneus usados – caracterização, gerenciamento e destinação.....	24
2.1.1	Características dos pneus e boracha.....	27
2.1.2	Gerenciamento de Pneus usados.....	31
2.1.3	Destinação de Pneus inservíveis.....	34
2.1.3.1	Reciclagem de Pneus.....	35
2.1.3.2	Alternativas de reciclagem de Pneu inservível.....	36
2.1.3.3	Reaproveitamento de pneus inservível em sua forma inteira, Outras alterações de reciclagem.....	37
2.1.3.4	Iniciativas de empresas privadas.....	40
2.1.3.5	Iniciativas de prefeituras.....	41
2.2	Conforto Térmico.....	42
2.2.1	Processos de Transferência de Calor.....	45
2.2.1.1	Transferência de calor por condução.....	46
2.2.1.2	Trabsferência de calor por convecção natural.....	47
2.2.1.3	Transferência de calor por radiação.....	48
2.2.2	Propriedades Térmicas dos Materiais.....	48
2.2.2.1	Condutividade Térmica.....	48
2.2.2.2	Resistência e Transmitância Térmicas.....	50
2.2.2.3	Difusividade Térmica.....	51
2.2.3	Índice de Conforto Térmico.....	52
2.3	Parede Térmica.....	54
2.3.1	Desempenho Térmico em Paredes.....	57

2.3.2	Elementos Construtivos com uso de Pneus.....	58
3	ANÁLISE EXPERIMENTAL DE PAREDES TÉRMICAS COM USO DE BORRACHA DE PNEUS.....	66
3.1	Definição da Bancada Experimental.....	66
3.1.1	Dimensionamento Inicial: Construção e Montagem.....	67
3.1.1.1	Projeto Bancada.....	68
3.2	Variáveis Investigadas.....	70
3.3	Instrumentação da Bancada.....	70
3.3.1	Material Permanente.....	70
3.3.2	Material de Consumo.....	71
3.3.3	Descrição de Instrumentos e Materiais.....	71
3.3.3.1	Modelo Dimmer.....	71
3.3.3.2	W1401 de 12V displav digital termostato controlador de temperatura.....	72
3.3.3.3	Fonte industrial VTXWG 24V.....	72
3.3.3.4	Termopar tipo K.....	73
3.3.3.5	Termômetro de pressão.....	73
3.3.3.6	Field Logger 512K.....	74
3.3.3.7	Lâmpadas incandescentes.....	75
3.3.3.8	Tijolos cerâmicos maciços e furados.....	77
3.3.3.9	Perfil tipo U, parafuso, barra roscada, tarugos, soldas e tinta.....	79
3.3.3.10	Pneus inservíveis: grãos e em pó.....	80
3.3.3.11	Paquímetro, poliestileno expandido e balança digital.....	81
3.4	Descrição das Paredes de Teste.....	85
3.5	Materiais de Construção Utilizados.....	88
3.5.1	Cimento.....	88
3.5.2	Areia.....	89
3.5.3	Bloco de 6 furos.....	89
3.5.4	Tijolo Maciço.....	90
3.5.5	Argamassa de assentamento.....	90
3.5.6	Chapisco.....	90
3.5.7	Argamassa de revestimento.....	90
3.6	Avaliação das Incertezas.....	90
3.6.1	Incerteza da Temperatura.....	91

3.6.2	Incerteza do comprimento e volumes.....	91
3.7	Procedimentos Experimentais.....	92
3.7.1	Calibração dos sensores de temperatura.....	92
3.7.2	Procedimentos de Instrumentação das paredes.....	94
3.8	Levantamento de Dados.....	99
4	MODELAGEM NUMÉRICA DE UMA PAREDE COMPOSTA PLANA.....	103
4.1	Modelagem Matemática.....	103
4.2	Discretização da Equação da difusão Térmica.....	105
4.2.1	Discretização no interior de cada camada.....	107
4.2.2	Discretização entre diferentes camadas.....	108
4.2.3	Discretização da Fronteira da face externa.....	109
4.2.4	Discretização da Fronteira da face interna.....	110
4.2.5	Critério de Estabilidade.....	111
4.3	Solução computacional e modelo climático para São Luís.....	111
4.3.1	Modelo para radiação média horária.....	112
4.3.2	Modelo para a temperatura ambiental.....	113
4.4	Algoritmo para simulação numérica.....	116
4.5	Validação do Programa.....	118
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	120
5.1	Resultados Experimentais para as paredes ensaiadas.....	120
5.1.1	Parede Padrão - P1 (G=25,7mm).....	120
5.1.2	Parede Padrão – P2 (G=12,8mm).....	123
5.1.3	Parede Padrão – P3 (G=6,4mm).....	124
5.1.4	Parede Padrão – P4 (Pó de Pneus, G=3,2mm).....	125
5.1.5	Parede Padrão – P5 (Pó de Pneus, G=2,0mm).....	127
5.1.6	Parede Simples Rebocada – P6 (Tijolo 6 furos, E=15,0cm).....	128
5.1.7	Variação da Condutividade Térmica com a Granulometria dos Pneus e=15cm.....	130
5.1.8	Comparação da Condutividade Térmica entre as Paredes P1 e P6.....	131
5.1.9	Consumo de pneus necessários para uma casa de 100m ²	132
5.2	Resultados das simulações numéricas.....	133
5.2.1	Simulação da parede simples convencional – S6 = P6.....	134

5.2.2	Efeitos da granulometria da borracha na parede composta – S1 a S5.....	135
5.2.3	Efeitos da espessura do enchimento da borracha na parede composta – S7 a S10.....	137
5.2.4	Efeitos da cor do acabamento da parede externa – S11 a S14.....	139
5.2.5	Efeitos dos materiais de construção na parede composta – S15 a S17.....	142
5.2.6	Efeitos da adição de biomassa em revestimento - S18 a S22.....	145
5.2.7	Comparação entre arranjos de paredes investigadas - S1; S6 e S23.....	147
5.2.8	Teto - Laje Maciça com Borracha, Efeitos da variação de espessura - S24 a S28.....	150
6	CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	155
6.1	Conclusões.....	155
6.2	Sugestões para trabalhos futuros.....	156
	REFERÊNCIAS.....	157
	APÊNDICES.....	165
	APÊNDICE A – ENSAIOS GRANULOMÉTRICOS DOS PNEUS.....	166
	A1- Caracterização granulométrica dos grãos de pneus-1,80 cm ³	166
	A2- Caracterização granulométrica dos grãos de pneus-0,90 cm ³	169
	A3- Caracterização granulométrica dos grãos de pneus-0,45 CM ³	172
	APÊNDICE B – CURVAS DE CALIBRAÇÃO DOS TERMOPARES.....	175
	B1- Calibração do termopar – T2.....	175
	B2- Calibração do termopar – T3.....	175
	B3- Calibração do termopar – T4.....	176
	B4- Calibração do termopar – T5.....	176
	B5- Calibração do termopar – T6.....	177
	B6- Calibração do termopar – T7.....	177
	APÊNDICE C – RESUMO DE DADOS E RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES...	178
	C1 – RESUMO DE DADOS PARA AS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS DAS PAREDES E TETO.....	178

1 INTRODUÇÃO

O conforto térmico em edifícios residenciais e comerciais é uma questão essencial para as boas condições de vida dos seres humanos. Durante décadas e devido à disponibilidade de energia elétrica, o conforto térmico foi alcançado por meios ativos, tanto para aquecimento quanto para arrefecimento. Com o aumento da população mundial, a industrialização e a melhoria do nível de vida, o consumo dos serviços públicos aumentou o consumo de eletricidade residencial e comercial para satisfazer estas exigências cada vez maiores. Esta e muitas outras atividades, causam uma utilização ineficiente, um possível esgotamento das fontes fósseis de combustíveis num futuro próximo, juntamente com os impactos ambientais negativos associados, alertaram as comunidades mundiais para os riscos eminentes de permanência nestas rotas e para a necessidade urgente de mudanças drásticas no sector energético, procurando novas alternativas, utilizando eficientemente as fontes disponíveis e novas fontes que sejam sustentáveis.

O conforto térmico considerado como vilão do consumo de energia recebeu nova orientação para o conforto térmico passivo em todos os aspectos, incluindo a construção de edifícios, material, e introdução de novos conceitos para a geração, acumulação e utilização eficiente da energia. Os edifícios residenciais e comerciais receberam uma atenção especial para melhorar o desempenho térmico durante todo o ano, utilização de técnicas passivas para garantir a qualidade, viabilidade e eficácia destas medidas.

No que se refere à conservação de energia, a maior parte dos países europeus criou normas e regulamentos com a finalidade de reduzir os consumos energéticos no setor residencial, notadamente para tentar impedir a construção de edificações em que o conforto fosse atingido artificialmente através de sistemas de climatização altamente consumidores de energia. Estas normas e regulamentos definem parâmetros relacionados com trocas térmicas das edificações e em função das diversas zonas climáticas (ALMEIDA, 1994).

Especificamente no caso do nosso estudo, na região Nordeste, devido a elevada intensidade da radiação solar, o fluxo de calor, pode chegar a 700 W/m^2 , representando portanto, uma importante parcela de carga térmica nas edificações, que provocam desconforto térmico em seus ocupantes. As alternativas para enfrentar o problema constam de modificações que vão desde a concepção do projeto até a substituição dos materiais convencionais utilizados na construção civil (LIMA, 2005).

O conhecimento das propriedades térmicas dos materiais de construção constitui o ponto de partida para abordagem do problema da transferência de calor através das paredes das edificações. Assim, escolhendo-se corretamente o tipo de material a ser utilizado nas construções, pode-se chegar à concepção de sistemas alternativos capazes de reduzir a parcela da incidência solar que é transmitida para o interior das habitações. Propriedades como: condutividade térmica, massa específica, calor específico, entre outras, são determinantes na transferência de calor entre ambientes, assim como o uso desses materiais em diferentes formas: como fechamento, revestimento ou como elemento de efeito estético nas paredes de fachadas.

1.1 Contextualização do Estudo

Os pneus usados apresentam graves problemas de descarte e perigo iminente para proliferação de mosquitos e outros insetos ofensivos para o ser humano. Não existe ainda uma tecnologia aceita globalmente para tratar os pneus e reaproveitamento de resíduo de forma viável economicamente. Na maioria dos casos, mesmo em nível internacional, os pneus são descartados nas costas dos países de terceiro mundo (África, América Latina e Ásia), o que apenas troca a posição do problema além de ser ilegal e não ético. No presente trabalho pretende-se desenvolver um projeto que consuma parte destes pneus em uso altamente passivo convertendo os impactos desagradáveis em benefícios ambientais e energéticos.

1.2 Justificativa

Pretende-se usar os pneus inservíveis como elemento de isolamento térmico em prédios residências, comerciais e industriais para reduzir o uso de sistema de condicionamento ambiental, conseqüentemente reduzir o consumo de energia e, com isso, contribuir na diminuição dos gases de efeito estufa. O estudo possibilita fazer uma contribuição original para aliviar o impacto ambiental produzido pelo resíduo que são os pneus inservíveis. Existem várias tentativas de soluções em diversos níveis com diferentes graus de êxito e aqui será apresentada uma solução que agrega redução do impacto ambiental com impacto energético reduzindo as emissões e aumentando o conforto térmico no interior dos ambientes residenciais.

1.3 Objetivo Geral

Constitui, portanto, o objetivo principal deste trabalho, avaliar o uso da borracha de pneus de forma experimental e numérica no desempenho de paredes e tetos dando-se ênfase ao aspecto térmico. Adota-se como hipótese que a introdução de borracha de pneus em paredes de alvenaria de tijolos cerâmicos, ocasionará uma redução significativa dos efeitos térmicos provenientes do fluxo de calor no sentido externo-interno.

1.3.1 Objetivos Específicos

Para o alcance eficiente desse objetivo, foram desenvolvidas as seguintes tarefas:

- 1- Apresentar através de Revisão Bibliográfica em artigos e trabalhos já publicados, uma avaliação crítica das principais técnicas e resultados numéricos e experimentais sobre uso da borracha de pneus, sua destinação em nível mundial, nacional e local;
- 2- Construir uma montagem experimental para determinar o coeficiente de condutividade térmica efetiva e da borracha de pneus de uma parede composta com alvenaria;
- 3- Modelar e simular numericamente uma parede composta;
- 4- Avaliar o comportamento térmico de vários grupos de paredes, sempre relacionando com a parede proposta e comparar com paredes de alvenaria convencional;
- 5- Estimar a quantidades de pneus envolvidos na parede proposta e teto de uma residência de 100m².

1.4 Descrição do Trabalho

A Tese está estruturada em 06 (Seis) capítulos:

O Capítulo 02, foi dedicado a Revisão de Literatura abordando, além dos aspectos já citados na tarefa 01, uma análise de trabalhos publicados na área de paredes térmicas e uso de pneus.

No Capítulo 03, foi descrito detalhadamente a construção e implementação de uma bancada experimental que foi usada para avaliação de medidas realizadas em laboratório. Os pneus foram cortados em pequenos pedaços com variações diferentes de granulometria e colocados em uma estrutura de aço revestidas em suas paredes laterais por material isolante

adequado e posicionado entre as paredes de alvenaria, que foi ensaiada. Eles aumentam a resistência térmica e a massa de inércia do conjunto, atrasando a passagem do calor para o interior do envelope do prédio além de reduzir a taxa de calor transmitida. Os conjuntos foram testados termicamente para verificar a condutividade térmica efetiva do mesmo. A bancada experimental foi usada para simular o resultado também da parede convencional de alvenaria com tijolo furado rebocada usada na construção de residências na cidade de São Luís, onde se avaliou também a sua condutividade térmica e conseqüentemente o comportamento térmico de todas elas durante dias seguidos, entre os meses de junho a dezembro de 2019.

A modelagem do problema é apresentada no Capítulo 04, como parte do objetivo principal deste trabalho, onde será usada um código discretizado, por meio do MDF que poderá prever o comportamento térmico das paredes com simulação computacional. Os resultados obtidos para a condutividade térmica da borracha de pneus no experimento, foram usados nas simulações que envolveram a parede proposta, assim como o obtido para a parede convencional de alvenaria rebocada. Para validar o código, os resultados foram comparados com outros dois autores.

No Capítulo 05, consta aos resultados e discussões, onde se apresentou os resultados obtidos nos experimentos e os simulados com o modelo numérico. Os resultados encontrados, tanto no experimento, quanto nas simulações, foram usados para elaboração de estimativas e servirão como demonstração dos conceitos investigados e suas viabilidades técnicas científicas.

Finalmente no Capítulo 06, apresentamos a conclusão e sugestões deste projeto, mostrando a sua importância e sua abrangência, tendo em vista que ele trata de um problema ambiental da atualidade e resolve a melhoria de conforto térmico em ambiente de forma sustentável, economizando energia e reduzindo impactos ambientais.

Por fim, podemos inferir que este projeto pode abrir novas possibilidades de emprego e renda além de criação de “*knowhow*” nacional nesta área.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Pneus usados – caracterização, gerenciamento e destinação.

É de uma compreensão lógica que, o aumento da população mundial tem como consequência imediata o crescimento do acúmulo dos resíduos dispostos inadequadamente resultante do consumo da sociedade, tornando-se um grave problema ambiental que, embora haja encaminhamentos na tentativa de minimizar os impactos gerados, não foi ainda resolvido. Assim, o descuido com o meio ambiente gerou a poluição das águas, solo e ar, degradação da natureza, perda de biodiversidade, danos à saúde e qualidade de vida e geração de impactos sociais e culturais, podendo tornar-se uma situação irreversível. Devido à constatação, conscientização e aumento dos resultados negativos das agressões ao meio ambiente, os países passaram a regulamentar e a adotar imposições mais rígidas aos diversos agentes envolvidos, sejam consumidores, empresas, poder público ou outras instituições.

O conceito de passivo ambiental é decorrente desta situação, e refere-se à obrigação ambiental contraída por um agente - seja empresa, sociedade, ou qualquer outra instituição - devido a ações passadas que geraram degradação, e que envolvem investimento de recursos para amenização ou extinção dos danos causados. O reconhecimento de um passivo ambiental decorre da responsabilização do agente causador que é obrigado a reparar o dano, impactando diretamente em seu resultado econômico. Desta forma, a sociedade responsabiliza quem degrada o ambiente, e impõe penalidades por estas ações (MOTTA, 2008).

A disposição final dos resíduos sólidos no mundo é uma questão preocupante, pois ela depende de um empenho muito grande por parte da sociedade para tentar solucioná-la, não deve ser considerada uma tarefa a ser resolvida apenas pelo poder público, deve haver uma conscientização com o engajamento de toda população.

Um dos principais problemas causadores de impactos ao meio ambiente são os chamados resíduos sólidos que segundo ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004), são aqueles que se encontram nos estados sólido e semissólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Dentro deste contexto é importante destacar os pneus inservíveis que quando abandonados ou dispostos inadequadamente, além de se tornarem um passivo ambiental, causam sérios problemas ao meio ambiente e a saúde da população, pois são depósitos de águas de chuvas e proliferação de doenças. Segundo AREBOP - Associação Nacional das Empresas

de Reciclagem de Pneus e Artefatos de Borrachas (2016), pneu inservível é todo pneu que não se presta ao processo de reforma que permita condição de reforma adicional.

A industrialização e o desenvolvimento dos países também promovem o aumento do número de veículos nas estradas, por uma necessidade logística ou por um poder econômico maior, gerando milhões de pneus. Sendo o único elo entre o veículo e o solo, o pneu exerce papel fundamental no cotidiano, porém os resíduos de pneus constituem um encargo financeiro e ecológico, em muitas regiões do mundo. Segundo Shalaby & Khan (2005), no Canadá e Estados Unidos, presume-se que é gerado um resíduo equivalente a um pneu por habitante/ano, de acordo com a ANIP - Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos, em todo o mundo a estimativa de pneus descartados por ano é superior a 2 bilhões de unidades. Deste volume menos de 20% são reciclados. Na Europa, estima-se que 300 milhões de pneus, que resulta em mais de 2 milhões de toneladas de pneus chegam ao fim de sua vida a cada ano. No Japão, estima-se que 102 milhões de pneus foram descartados (ANIP, 2017).

Segundo a ANIP o Brasil produziu 67,3 milhões de pneus, em contrapartida a esta informação, pode-se considerar que o Brasil também se colocou em posição avançada nessa questão de disposição final dos pneus descartados, com a introdução das diretrizes contidas na Resolução nº. 416/2009, apresentada pelo Conselho Nacional de Meio Ambiente – CONAMA, que revoga a resolução anterior de 258/1999. Essa resolução tem como determinação primordial colocar as empresas fabricantes de pneus e as importadoras como as responsáveis pela destinação final, dispondo sobre a prevenção à degradação ambiental causada por pneus inservíveis e sua destinação ambientalmente adequada (MMA, 2010). Segundo Planeta Sustentável (2012), os importadores de pneus novos cumpriram 97,03% das metas, os fabricantes, 47,3% e, os importadores de usados, 12,92%.

No Estado do Maranhão, existem postos de coletas de pneus nas cidades de Açailândia, Caxias, Codó, Imperatriz, Paço do Lumiar, São José de Ribamar, São Luis e Timon. Na capital São Luís são mantidos 326 pontos estratégicos para recolhimento de pneus sem utilidade. O material recolhido é entregue a Reciclanip, uma empresa criada pelos fabricantes de pneus Bridgestone, Goodyear, Michelin e Pirelli, que realiza a logística reversa dos pneus inservíveis.

Segundo a Reciclanip, 70% dos pneus inservíveis são utilizados como combustível alternativo em fornos de cimenteiras, graças ao seu alto poder calorífico, substituindo o coque de petróleo. A outra parte é utilizada na fabricação de manta asfáltica, asfalto-borracha, solados de sapatos, borrachas de vedação, dutos pluviais, pisos industriais e quadras poliesportivas, além de tapetes para automóveis.



Figura 2.1 – Trabalhadores da coleta seletiva de São Luís.
Fonte: Jornal O Imparcial.

O descarte irregular de pneus tem causado um grave problema ambiental em São Luís. Além da poluição gerada ao meio ambiente, o objeto é um dos principais criadouros do mosquito *Aedes Aegypti*, transmissor das doenças Dengue, Febre Chikungunya e Zika vírus. Segundo a prefeitura da capital, em 2015, foram recolhidos 78.927 pneus. Uma média de 450 por dia. Os pneus retirados pela Secretaria Municipal de Obras e Serviços Público (SEMOSP) são encaminhados para a reciclagem. No processo, a matéria-prima é separada: o aço é retirado e a borracha triturada. O resíduo triturado é encaminhado aos fornos das fábricas de cal e cimento em Feira de Santana (BA), João Pessoa (PB) e Sobral (CE). O recolhimento dos pneus é feito em estabelecimento considerados pequenos geradores como borracharias, oficinas de lanternagem e empresas do ramo. Mais de 85 mil pneus (9 mil toneladas) foram recolhidos pela Prefeitura Municipal de São Luís em 2017 e em 2018 até fevereiro. Outro dado importante é que cada pneu de automóvel pesa entre 5,5 a 7,0 kg e de caminhão pesa de 55 a 80 kg. Essa pesquisa foi realizada em 270 mil residências em maio de 2018 (SEMOSP, 2018).

Na capital Maranhense, apesar de ainda não existir o PMRS - Programa Municipal de Resíduos Sólidos, algumas ações desenvolvidas pela Prefeitura veem sendo realizadas para atendimento do que dispões a legislação vigente.

O projeto de reciclagem é desenvolvido através da Secretaria Municipal de Obras e Serviços Públicos (SEMOSP) e da Secretaria Municipal de Saúde (SEMUS). O recolhimento dos pneus é feito diariamente e, após o recolhimento, são levados para um galpão, onde ficam acondicionados até que seja feito o carregamento do material para a reciclagem.

Gonçalves Neto & Rebêlo, 2004, destaca que o projeto de reciclagem foi implantado pela Prefeitura como forma de incentivar a sustentabilidade por meio da coleta seletiva de pneus que não têm mais utilidade. A medida aliou tanto os benefícios para a limpeza pública quanto os cuidados necessários ao meio ambiente e à saúde, uma vez que os materiais podem se transformar em criadouros do mosquito transmissor da dengue, o *Aedes Aegypti*, se descartados inadequadamente.

Lima & Carvalho, 2012, apresentaram trabalho na 64 SBPC, que estuda o uso e descarte de Pneus em São Luís, Maranhão, onde conclui que foi possível observar a grande possibilidade de reuso dos pneus pós-consumo, tendo resultados satisfatórios quanto aos objetivos propostos, na medida em que a pesquisa mostrou formas de utilização viáveis para este resíduo, ressaltando a importância desta prática para a harmonia do meio ambiente em que estamos inseridos e para as empresas, que podem investir no ramo das formas alternativas de reutilização de pneus e assim crescerem economicamente sem alterar a qualidade ambiental. Entende-se ainda que o uso de pneus é elevado, o reuso ainda pouco realizado e a reciclagem ainda não foi posta em prática.

Araújo *et al.* (2015) demonstraram que foi realizado uma pesquisa com levantamento de informações acerca do programa de Logística Reversa de pneus na cidade de São Luís - MA na Secretaria Municipal de Obras e Serviços Públicos através de entrevistas e registro fotográfico. O responsável pela coordenação do programa respondeu os questionamentos sobre o programa e seu funcionamento. Foi constatado que o programa de recolhimento de pneus existe desde 2005, entretanto a partir da Resolução CONAMA 416/2009, o programa foi realmente colocado em prática e passou não só a recolher, como a dar uma destinação apropriada para os resíduos sólidos do tipo pneus. Segundo informações da própria SEMOSP.

A lei Municipal Nº 4996 DE 17 DE JULHO DE 2008, DISPÕE SOBRE SANEAMENTO E GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS DO MUNICÍPIO DE SÃO LUÍS, E DÁ OUTRAS PROVIDÊNCIAS, no seu capítulo IV- Dos Procedimentos Diferenciados em sua seção IV, nos seus IV artigos, tratam especificamente de Pneus Inservíveis.

2.1.1. Características dos Pneus e Borracha

O interesse pelo estudo dos pneus, pode ser notado, através de inúmeros trabalhos publicados no Brasil e no Mundo, por profissionais de diversas áreas do conhecimento, por se tratar de tema que envolve a sustentabilidade do nosso planeta. Podemos citar trabalhos

realizados no âmbito de: Teses, Dissertações, Especializações, Monografias e Artigos publicados em várias revistas, onde podemos notar profissionais da Engenharia: Mecânica, Civil, Produção, Ambiental, além de Médicos, Advogados e até Economistas, todos demonstrando comprometimento e preocupação com as questões ambientais, ações consideradas dignas e valiosas na contribuição de proteger nossa casa comum, que é o planeta Terra.

Em 1839, Charles Goodyear descobriu casualmente o processo de vulcanização da borracha, com isso em 1845 aproveitando-se desta descoberta, R. W. Thomson criou o pneu de borracha. Durante décadas muitas experiências foram sendo realizadas para o melhoramento das propriedades da borracha natural. A partir da Primeira Guerra Mundial, na Alemanha, foi criada uma tecnologia nova para a fabricação da borracha sintética, uma vez que até este período os pneus dependiam em sua totalidade da matéria-prima borracha natural para sua confecção. (RAMOS, 2005).

A partir desta inovação e descoberta dos pneus de borracha, em virtude da resistência, durabilidade e conforto para transporte de cargas e pessoas, a fabricação e venda de pneus no mundo foram crescendo vertiginosamente, uma vez que o novoprocessos incorporou qualidades e propriedades mais atrativas à borracha, tais como –resistência à abrasão, elasticidade, durabilidade, entre outras (RAMOS, 2005).

Um pneu é composto por diferentes materiais tais como: estrutura em aço, náilon, fibra de aramida, rayon, fibra de vidro/poliéster; borracha natural e sintética, além de diversos tipos de polímeros; reforçados químicos como carbono preto, sílica e resinas; antioxidantes (ceras de parafina antioxidantes e inibidoras da ação do gás ozônio); promotores de adesão (sais de cobalto, banhos metálicos nos arames e resinas); agentes de cura (aceleradores de cura, ativadores, enxofre) e produtos auxiliares (PIRELLI BRASIL, 2007).

Eles ainda podem ser classificados de acordo com sua carcaça em dois grupos: radiais e convencionais (ou diagonais). Grandes partes dos pneus utilizados em carros e caminhões são os radiais porque “aliado aos reforços estruturais e novos desenhos da banda de rodagem oferecem maior resistência, durabilidade, aderência e estabilidade que os convencionais”. Em função disso, mesmo com um custo superior ao tradicional, os pneus radiais representam 71% da produção mundial de pneus de passeio, e 84% de participação na produção de pneus de caminhões e ônibus. (BNDES, 2007).

Segundo dados da pesquisa publicada pelo BNDES, os percentuais de materiais utilizados na composição de um pneu são apresentados abaixo:

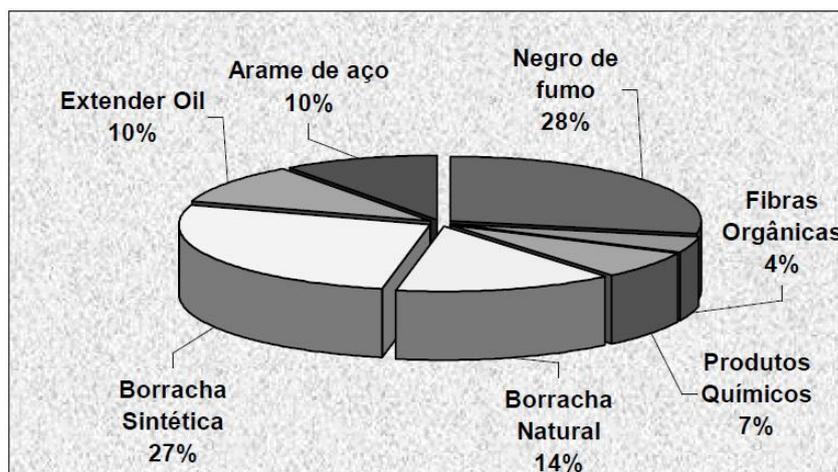


Figura 2.2 – Composição de pneus radiais para automóveis
Fonte: BNDES (2007).

Na Figura 2.2, estão apresentadas as matérias-primas utilizadas para fabricação de um pneu radial, percebe-se a grande quantidade de materiais misturados neste processo, mas a borracha predomina com mais de 40% de participação, um pneu de passeio pesa em média 9,2 kg. Outro dado interessante nesta pesquisa feita pelo BNDES, é que dos 15 milhões de toneladas de borracha (natural e sintética) consumidas anualmente no mundo, em torno de 9 milhões se destinam à fabricação de pneumáticos.

No caso do Brasil, do total da borracha consumida, mais de 50% destina-se a fabricação de pneus e o consumo total é de aproximadamente 465 mil toneladas de borracha, sendo que deste total 25% era natural e 75% sintética. Outro dado importante, é que as principais borrachas utilizadas no processo são Borracha Natural (NR), Borracha de Estireno-Butadieno (SBR) e Borracha Polibutadieno (BR).

Ainda conforme a figura acima convém se observar a participação considerável de 28% do componente – negro de fumo. Ele é incorporado à borracha para aumentar a resistência mecânica dos pneus, e é considerado o grande problema para a indústria de pneus, uma vez que dificulta imensamente a reciclagem deles, e está presente em percentuais semelhantes tanto em pneus de automóveis como os de caminhão.

Por sua vez a borracha tem maior participação nos pneus automotivos 48% contra os 45% dos pneus de caminhão, no caso do aço sua proporção fica em 15% nos automóveis, contra 25% em caminhões; outro dado interessante é que no pneu automotivo encontra-se (5%) de material têxtil, no pneu de caminhão não temos a incorporação deste material (KAMIMURA, 2004).

A adição de negro de fumo confere à borracha propriedades de resistência (mecânica e à ação dos raios ultravioleta), durabilidade e desempenho. A mistura é espalmada em um molde e, para a vulcanização (feita a uma temperatura entre 120°C e 160°C) utiliza-se: o enxofre, compostos de zinco como aceleradores e outros compostos ativadores e antioxidantes. Um fio de aço é embutido no talão, que se ajusta ao aro da roda e, nos pneus de automóveis do tipo radial, uma manta de tecido de nylon reforça a carcaça e a mistura de Borracha/elastômeros é espalmada, com uma malha de arame de aço entrelaçada nas camadas superiores. A Figura 2.3, mostra as partes de um pneu (ALMEIDA JÚNIOR, 2012).

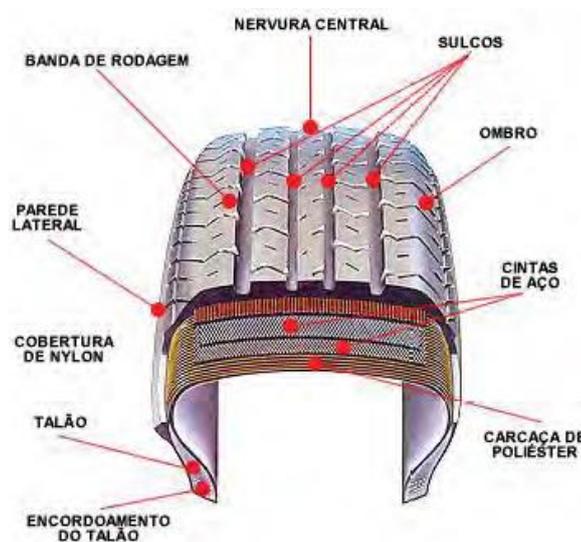


Figura 2.3 – Partes de um pneu radial, com a nomenclatura usada.
Fonte: (ALMEIDA JR,2012).

Ao analisar a Figura 2.4, pode-se definir os índices numéricos:

- 1 Banda de rodagem – é a parte do pneu que entra em contato com o solo;
- 2 Sulcos – são as cavidades que recortam a superfície da banda de rodagem;
- 3 Ombros – são partes do pneu entre a banda de rodagem e os flancos.
Lona (s) ou cinta(s) de proteção;
- 4 Parte exterior da estrutura resistente do pneu – tem a finalidade de proteger as lonas/cintas de trabalho;
- 5 Lonas ou cintas de trabalho – são as partes do exterior da estrutura resistente do pneu radial que tem a finalidade de estabilizar o pneu;
- 6 Revestimento interno – é toda a superfície interna do pneu, constituída de componentes de borracha que tem a função de proteção;

- 7 Interior da estrutura – é a parte resistente do pneu cujos cordonéis estendem-se de um talão a outro;
- 8 Flancos ou laterais – são as partes do pneu compreendidas entre os limites da banda de rodagem e os talões, também conhecido como flanco costado;
- 9 Cordão ou filete de centragem – é a linha em relevo próxima da área dos talões que tem a finalidade de indicar visualmente a correta centralização do pneu no aro;
- 10 Talões - são partes do pneu que entram em contato com o aro, garantindo a sua fixação ao mesmo na Figura 2 o talão da direita é de um pneu sem câmara;
- 11 Aro do talão – é o elemento metálico interno (carcaça), estrutura resistente formada por um conjunto de lonas e eventuais cintas de proteção ou de trabalho (BRIDGESTONE, 2010).

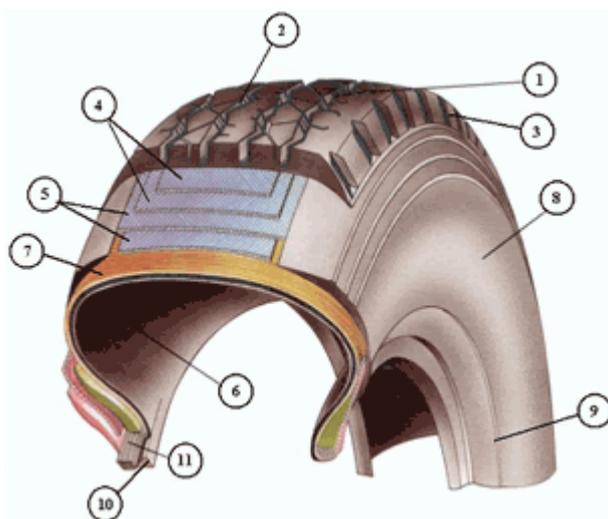


Figura 2.4 – Apresentação das partes que compõem o pneu.
Fonte: Fabricante Bridgestone (2010).

2.1.2. Gerenciamento de Pneus Usados

O conceito de gestão de resíduos, utilizado na legislação vigente, enfatiza o descarte do material e, de certa forma, a regulamentação como um todo está adequada com a falta de desenvolvimento tecnológico para reinserção do pneu como matéria-prima para produzir pneus novos. Porém, nenhum estímulo foi adotado para incentivar as empresas a investirem no desenvolvimento tecnológico para este fim.

Devido à legislação, surgiram alguns programas voltados para o descarte ambientalmente adequado dos pneus, com a utilização das tecnologias existentes.

As alternativas economicamente viáveis para a destinação correta dos pneus inservíveis são: reutilização dos pneus inteiros, regeneração da borracha e geração de energia pela queima controlada.

De acordo com o modelo de gestão de resíduos integrada e sustentável, adotado atualmente nos países desenvolvidos, e exposta e discutida no item que trata do panorama internacional do relatório de reciclagem de resíduos sólidos, os estímulos para a indústria têm como principal objetivo a minimização da geração dos resíduos na fonte. Em segundo lugar, estimula-se a reutilização dos bens já produzidos. Em terceiro lugar, os estímulos são para a reciclagem do material, e as duas últimas opções são reaproveitamento de energia e incineração dos rejeitos.

Porém, a alternativa mais utilizada no Brasil para obter o certificado de destinação ambientalmente correta dos pneus é a queima controlada para geração de energia.

Alguns dados quantitativos sobre o destino dos pneus inservíveis são disponibilizados pelo Compromisso Empresarial para Reciclagem (CEMPRE, 2002), e indicam que, no Brasil, 39% das 386.000 toneladas de pneus inservíveis geradas pelo país foram destinadas a fornos de clínquer das empresas produtoras de cimento no período de 1999 a 2004, média anual de 25.000 toneladas.

Em 2004, das 146.000 toneladas de pneus inservíveis, 56,06% foram destinados para a produção de combustível alternativo, 17,65% para laminação, 19,65% para artefatos/matéria – prima e 6,64% para exportação (MOTTA, 2008).

PGIRPN- Plano de Gerenciamento Integrado de Resíduos Pneumáticos

Dada a necessidade de reduzir o passivo ambiental, representado pelo estoque de pneus descartados, faz-se necessária a criação de soluções de coleta, transporte, armazenamento, reciclagem e destinação final desses materiais. Nesse sentido, alguns Municípios do País, já desenvolveram seus PGIRPN- Plano de Gerenciamento Integrado de Resíduos Pneumáticos, mas na sua grande maioria ainda não possui esse plano de gerenciamento, deve conter:

1ª etapa: Programa Municipal de Gerenciamento de Resíduos Pneumáticos, elaborado, implementado e coordenado pelo município.

2ª etapa: Projetos de Gerenciamento de Resíduos Pneumáticos, elaborados e implementados pelos geradores.

Esse documento é elaborado, implementado e coordenado pelos municípios e deve estabelecer diretrizes técnicas e procedimentos para o exercício das responsabilidades dos pequenos geradores, em conformidade com os critérios do sistema de limpeza urbana local.

Para elaboração desse programa que compõe o PGIRPN, o município poderá seguir as seguintes etapas básicas:

a) formação de equipe técnica

A formação da equipe para elaboração, implantação e coordenação do programa deve ser preferencialmente multidisciplinar. A comissão deve desenvolver:

- treinamento e capacitação dos agentes responsáveis diretamente pela operacionalização do programa, como funcionários da prefeitura, associação de catadores e/ou carroceiros.

- proposição de ações que visem ao monitoramento, fiscalização e manutenção do programa.

b) elaboração do diagnóstico da situação atual dos resíduos pneumáticos

São obtidas informações como:

- caracterização dos resíduos (levantamento qualitativo e quantitativo);
- análise das possíveis condições de deposições dos resíduos.

Para a elaboração do PGIRPN, existe uma Metodologia proposta por (MATTIOLI; MONTEIRO; FERREIRA, 2009)., onde são sugeridas: Etapas, objetivos e ações a serem seguidas.

Legislação aplicada a Gestão de Resíduos Sólidos – Pneus

Atualmente, existe uma farta legislação de proteção ambiental e de gestão de recursos ambientais, incluída a normatização necessária a disposição final dos pneus usados e inservíveis propostas pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). A resolução 258/99 determina que as empresas fabricantes e as importadoras de pneumáticos ficam obrigadas a coletar e dar destinação final ambientalmente adequada aos pneus inservíveis e a resolução 301/02 que altera dispositivos da Resolução no 258/99 (FORTES *et al.*, 2009).

Segundo a legislação vigente, as empresas fabricantes e as importadoras de pneumáticos para uso em veículos automotores ficam obrigadas a coletar e dar destinação final, ambientalmente adequada, aos pneus inservíveis existentes no território nacional. Atualmente, para cada quatro pneus novos fabricados no País ou pneus novos importados, as empresas fabricantes e as importadoras deverão dar destinação final a cinco pneus inservíveis. Ademais,

para cada três pneus reformados importados, de qualquer tipo, as empresas importadoras deverão dar destinação final a quatro pneus inservíveis.

Um aspecto a ser ressaltado pela resolução 301/02, é que os distribuidores, os revendedores, os reformadores, os consertadores, e os consumidores finais de pneus, em articulação com os fabricantes, importadores e Poder Público, deverão colaborar na adoção de procedimentos, visando implementar a coleta dos pneus inservíveis existentes no País.

A Lei de número 12.305/10, foi aprovada em 02 de agosto de 2010, fruto do projeto de lei (PL 203/91), pelo Congresso Nacional (Câmara dos Deputados) para tratar da Política Nacional de Resíduos Sólidos, cujo um dos principais avanços versa sobre as responsabilidades quanto à geração dos resíduos sólidos. Segundo esta Lei (Seção III, Art. 17), compete ao gerador de resíduos sólidos a responsabilidade pelos resíduos sólidos gerados, compreendendo as etapas de acondicionamento, disponibilização para coleta, coleta, tratamento e disposição final ambientalmente adequada de rejeitos. No entanto no Art. 18 fica estipulada a responsabilidade do gerador de resíduos sólidos urbanos, cujo gerador terá cessada sua responsabilidade com a disponibilização adequada de seus resíduos sólidos para a coleta.

2.1.3 Destinação de Pneus Inservíveis

Muitos trabalhos têm sido feitos, com o enfoque dado aos aspectos ligados a problemática, reaproveitamento, reciclagem, reuso e destino dos pneus inservíveis. Esse fato está intrinsecamente ligado a aspectos de sustentabilidade e preservação do meio ambiente.

Apenas no ano de 2005, registrou-se a entrada, no Brasil, de 10,5 milhões de pneus previamente utilizados. A importação de pneus usados está proibida desde 1991 pela Portaria 08 do Departamento de Comércio Exterior (DECEX) do Ministério da Economia, Fazenda e Planejamento. Apesar da vedação, o Poder Judiciário tem liberado a importação de pneus usados e reformados sob a alegação de que o Brasil ainda não dispõe de lei que impeça a entrada desse tipo de bem.

Segundo o Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior brasileiro (MDIC), entre 1990 e 2004, mais de 34 milhões de unidades de pneus reformados e usados entraram no país através de medidas liminares concedidas pelo Poder Judiciário. Apenas em 2004, 7,5 milhões desses pneus foram importados para a indústria de reforma.

Sabe-se que o acúmulo de pneumáticos, por si só, tem efeitos negativos sobre o meio ambiente e que os pneus que armazenam água das chuvas servem como habitat ideal para a procriação de mosquitos transmissores de doenças. Aliado a isso, os pneus previamente

utilizados enfrentam limitações quanto à sua destinação final, pois não podem ser compactados em aterros, e a sua queima libera substâncias tóxicas e cancerígenas, como as dioxinas e os furanos (MOROSINI, 2006).

Oliveira & Castro, (2007), apresentam um artigo que tem como objetivo discutir a temática da destinação de pneus usados no Brasil e verifica o grau de conscientização de uma parcela da população com relação às alternativas sustentáveis para seu reaproveitamento. Sustentando que, por apresentarem difícil compactação, coleta e eliminação, os pneus ocupam muito espaço físico. Os grandes depósitos ocupam áreas extensas e ficam sujeitos à queima acidental ou provocada, causando prejuízos na qualidade do ar devido à liberação de fumaça contendo alto teor de dióxido de enxofre entre outras substâncias tóxicas. Afirmam que, apesar dos vários estudos realizados sobre sua reciclagem, as questões que envolvem a destinação dos pneus usados, pode causar à natureza e as pessoas, ainda não são amplamente divulgadas à população.

2.1.3.1 Reciclagem de Pneus

Hoje, devido ao grande problema que se tornou à disposição final dos pneus inservíveis, algumas alternativas foram sendo criadas para que este resíduo possa ser utilizado como matéria prima para um novo produto, ou que fosse utilizado em outras funções que não mais a do transporte. Sendo assim, várias tecnologias vêm sendo desenvolvidas para dar suporte a essas novas opções de uso dos pneus automotivos descartados.

No tópico a seguir abordaremos o funcionamento dos processos de reformas de pneus, antes de apresentarmos questões relativas à reciclagem dos pneumáticos inservíveis.

Os processos industriais existentes para a reforma de pneus são: recapagem, recauchutagem e remoldagem. Abaixo segue maiores detalhes sobre estes processos:

Recapagem – é a reconstrução de um pneu através da substituição de sua banda de rodagem.

Recauchutagem – é a reconstrução do pneu através da substituição da banda de rodagem e dos ombros.

Remoldagem - é outro processo de reutilização dos pneus classificados como reformáveis, sendo reconstruído o pneu através da substituição da banda de rodagem e, dos ombros e de toda a superfície dos seus flancos.

Andrade (2007) em seu trabalho de título” Pneus inservíveis: Alternativas Possíveis de Reutilização” afirma que, quando nos defrontamos com o número de pneus inservíveis

gerados anualmente em todo o mundo, percebemos a importância de se buscar novas alternativas para utilização deste material em outros processos de reaproveitamento e reciclagem. Apresentamos de forma didática alguns possíveis processos e alternativas de reciclagem, citada por ele, sendo apresentadas de forma sintetizada, abaixo:

2.1.3.2 Alternativas de Reciclagem do Pneu Inservível

A seguir apresentamos alguns processos de reciclagem de pneus inservíveis como alternativas em diversos usos inclusive com o foco em conservação de energia.

Desvulcanização ou regeneração da borracha de pneus

O processo de recuperação e regeneração dos pneus exige a separação da borracha vulcanizada de outros componentes (como metais e tecidos, por exemplo). O arame e a malha de aço são recuperados como sucata de ferro qualificada, o tecido de nylon é recuperado e utilizado como reforço em embalagens de papelão.

Borracha de pneus e pavimentação asfáltica

Nas obras de pavimentação, a borracha de pneus pode ser inserida nos materiais asfálticos através de dois processos: úmido (*wetprocess*) e seco (*dryprocess*) (KAMIMURA, 2004).

Almeida Júnior (2012) determinou em laboratório das características do asfalto modificado SBS comparadas às do asfalto com pó de borracha. As características e os comportamentos foram avaliados de acordo com os ensaios de penetração, ponto de amolecimento e fulgor, viscosidade, recuperação elástica e separação de fases. Através dos ensaios, conclui-se que os dois materiais possuem características distintas, como por exemplo, no que diz respeito à penetração e ao ponto de amolecimento, com comportamento inversamente proporcional, quanto maior o ponto de amolecimento menor a penetração, quanto à viscosidade essa conclusão também pode ser aplicada, isto é, quanto maior o teor de borracha maior a consistência, nos ensaios de separação de fases, nota-se que quanto maior o teor de borracha maior é a separação, já nos ensaios de recuperação elástica os valores foram próximo dos 50%.

Orsi & Simon (2016) em seu artigo Asfalto Borracha Uma Alternativa Ambiental para Pneus em Desuso, concluiu que a adição de polímeros provenientes da borracha de pneus reciclados ao asfalto diminui a suscetibilidade térmica, aumentando a estabilidade do pavimento em altas temperaturas e diminuindo o risco de fraturas e trincamentos em baixas temperaturas.

Além disso, confere maior resistência às ações da chuva e proporcionam melhor adesão ao agregado asfáltico. Segundo Jorge A.P. Ceratti, coordenador do Laboratório de Pavimentação da escola de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), o asfalto borracha torna-se viável economicamente, se levarmos em conta que com uma durabilidade maior, a estrada que possuir asfalto borracha precisará de reparos em um intervalo de tempo maior do que a que não possui. Além disso, a incorporação da borracha à construção do asfalto implica uma redução da demanda do petróleo para esse fim. Não podemos esquecer que o petróleo é uma fonte não-renovável de energia.

O pneu como fonte de energia (co-processamento)

A prática do uso do pneu como fonte de energia vem sendo utilizada desde 1975, tem sua origem na *DickerhoffCement*, em Frankfurt – Alemanha, é conhecida como TDF – *Tire DerivedFuel*. Nos EUA, o TDF é o maior mercado para os pneus inservíveis, consumindo em torno de 115 milhões de pneus por ano. A utilização do pneu em sua forma inteira é muito melhor, pois há a economia de energia que seria necessária para sua trituração (KAMIMURA, 2004).

Trituração da borracha de pneus: processo mecânico e criogênico

A trituração da borracha de pneus através do **processo mecânico** ou **processo criogênico** são alternativas a mais para a reciclagem de pneus descartados. No processo mecânico a trituração ocorre em temperatura ambiente, já no processo criogênico ocorre um congelamento seguido de tratamento mecânico, o tamanho das partículas geradas depende do processo utilizado, equipamento e temperatura (KAMIMURA, 2004).

2.1.3.3 Reaproveitamento do Pneu Inservível em sua Forma Inteira, outras alternativas de Reciclagem

Muitos dos processos para a reciclagem da borracha dos pneus descartados requerem a separação dos componentes do pneu ou a própria trituração antes de sua utilização. No entanto, existem outros exemplos de reutilização dos pneus inservíveis em sua forma inteira contribuindo para a questão da destinação final deste resíduo.

Na Engenharia Civil, os pneus podem ser usados em sua forma inteira ou em partes, as aplicações mais usuais dos pneus inservíveis são em materiais de enchimento de peso leve; drenagem em campo séptico; aterro em estradas; suporte de base de estrada; sistema de drenagem de gases em aterros sanitários; material para compostagem; estabilizadores de

encostas; controle de erosão; diques; barragens; isolante térmico e acústico; drenagem em aterro sanitário; aditivos para pavimentos asfálticos e pistas esportivas; cobertura de parques infantis; concretos leves, entre outros (KAMIMURA, 2004).

Por sua vez, a prática da reciclagem de pneus inservíveis em sua forma inteira está relacionada à sua utilização em projetos de:

- **Obras de drenagem:** os pneus unidos em módulos de aproximadamente 15 pneus formam um tubo em substituição aos bueiros; nos EUA “esta prática tem sido adotada e apresentou desempenho aceitável” (KAMIMURA, 2004);

- **Muros de arrimo/contenção:** camadas horizontais de pneus espaçadas verticalmente e interligada com alças de metal, formando camadas de pneus que são preenchidas com solo. No Brasil a PUC-Rio em parceria com Universidade de Ottawa (Canadá) e a Fundação Geo-Rio, vem desenvolvendo projeto de pesquisa de estabilização de taludes com muros de contenção (KAMIMURA, 2004);

- **Limitação Território Esportivo:** os pneus podem formar muros de limitação de territórios para prática de esportes automotivos de alta velocidade, também em pistas de corridas de cavalos (RAMOS, 2005);

- **Construção de barragens:** os pneus inteiros podem ser utilizados na construção de barragens para contenção. Existe um projeto do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Texas com esta finalidade (SALINI, 2000);

- **Recifes artificiais:** pneus de carros e caminhões empilhados em um número de 15 a 25 unidades são comprimidos, “aglomerados com uma mistura de cimento e então lançados sobre o leito do mar para formar recifes artificiais”, auxiliando na criação e reprodução de animais marinhos, pois se transformam em um ambiente propício para a fauna e a flora (RAMOS, 2005); (KAMIMURA, 2004);

- **Quebra-mares:** a construção de quebra-mares com pneus descartados pode ser um recurso facilmente aplicável, “os pneus protegem os portos e marinas dos efeitos das marés, geram estabilidade para o solo marinho e para a praia, [...] além de possibilitarem a estabilização de dunas existentes” (SANDRONI & PACHECO, 2005);

- **Contenção de erosão do solo** – Pneus inteiros associados a plantas de raízes grandes, podem ser utilizados para ajudar na contenção da erosão do solo (MARTINS, 2004);

- **Enchimento de Aterros:** pneus picados ou inteiros podem substituir parte do agregado com baixo custo e mantêm o solo com boa drenagem (RAMOS, 2005);

- **Armazenagem de água para gramados:** os pneus são cortados ao meio, e dispostos em camadas sob gramados de campos de golfe, futebol, entre outros. Auxilia na redução de gastos com irrigação artificial e fertilização do gramado, pois este sistema armazena a água da chuva (KAMIMURA, 2004);
- **Reforço de aterros** – Pneus radiais amarrados com fitas de poliéster é uma matéria-prima barata e eficiente para a construção de aterros sem comprometer a qualidade da obra (MARTINS, 2004);
- **Compostagem** – O pneu não pode ser transformado em adubo, mas sua borracha cortada em pedaços de 5 cm pode servir para aeração de compostos orgânicos (CEMPRE, 2016);
- **Construção de casas com pneus inteiros “*Earthship*”:** “técnica de construção natural, utilizando pneus e solos prensados na confecção de paredes que são assentados diretamente no solo (sem vegetação)”, uma casa no Japão já foi construída através deste método; e no Brasil o Instituto de Permacultura já construiu uma parede através deste método (KAMIMURA, 2004);
- **Projeto João de Barro Bom-Plac:** no Brasil, um projeto semelhante vem sendo desenvolvido na construção de casas populares em Santa Cruz do Sul (RS), onde o engenheiro Leandro Agostinho Kroth, da Secretaria Municipal de Habitação, lançou o Programa João de Barro Bom – Plac. Ele descobriu um jeito de reaproveitar os pneus, “a idéia é misturar a borracha dos pneus à argamassa feita com cimento, areia e água. A argamassa serve para moldar pilares armados com barras de aço e placas retangulares, fixadas nos pilares por meio de uma peça de madeira que recobre a face interna do pilar”; (www.cidadesdobrasil.com.br, www.pmscs.rs.gov.br);
- **Parques infantis e playground:** os pneus inteiros podem ser utilizados como amortecedores de impacto de brinquedos, ou mesmo como brinquedos balanços, obstáculos, etc...(MARTINS, 2004);
- **Galerias de águas pluviais:** “os pneus descartados estão sendo utilizados para a construção de galerias pluviais em substituição às manilhas de cimento, esta experiência está sendo utilizada pela prefeitura da cidade Araçoiaba da Serra (SP), e prefeitura de Cascavel (PR), ambas utilizaram esta experiência e se beneficiaram com a redução do custo do material empregado na obra (www.arebop.org.br);
- **Vasos e móveis feitos com pneus:** os pneus inteiros são utilizados como material na confecção de vasos e móveis. Na cidade de Canarana em Mato Grosso há o exemplo do artesão Rubem Machry que transforma pneus velhos em objetos e utensílios.

Entre as alternativas acima descritas, é importante frisar que estas funcionam como paliativo na destinação final dos pneus inservíveis, pois não utilizam em larga escala o estoque de pneus descartados que existem, os processos com aplicação de tecnologias mais complexas são os que incorporam a maior quantidade de pneumáticos inservíveis.

2.1.3.4 Iniciativas de Empresas Privadas

Muitas empresas revendedoras de pneus criaram ações isoladas com relação à coleta e destinação final dos pneus inservíveis, entre estas se pode destacar iniciativas da Rede DPaschoal (Goodyear), a Bridgestone Firestone e Pirelli Brasil.

DPASCHOAL

A rede DPaschoal em parceria com a fabricante Goodyear mantém um processo de coleta e destinação dos pneus usados deixados em mais de 180 de suas lojas espalhadas pelo Brasil. Este projeto chamado de SGR- Sistema de Gestão de Resíduos, foi iniciado experimentalmente no estado de São Paulo e Minas Gerais, e depois ampliado a todo território nacional, “visando operacionalizar, incentivar e mobilizar, funcionários, consumidores e população, com relação ao destino ambientalmente correto dos pneus inservíveis e de outros produtos” (CIMINO, 2004).

BRIDGESTONE FIRESTONE

A ação desta empresa envolve a picotagem dos pneus refugados pelo seu processo produtivo e os inservíveis na própria fábrica, que posteriormente são encaminhados para o processo de reciclagem (CIMINO, 2004).

PIRELLI

Através de sua revista eletrônica Pirelli Club Truck, a empresa divulga a importância da correta destinação final dos pneus inservíveis. Pelas notícias veiculadas nesta revista a empresa demonstra sua preocupação dando ênfase na importância da correta destinação final destes pneumáticos. Além disso, publica dados a respeito de empresas reconhecidas e cadastradas junto a ANIP para a coleta, transporte e trituração dos inservíveis, alertando para a possibilidade deste material ser depositado nos ecopontos mantidos pela ANIP em várias cidades do país.

A empresa também se dispõe a coletar pneus inservíveis através de seus pontos de coletas chamados *Truck Center* Pirelli, se por acaso, o número de pneus usados existentes não chegue a formar uma carga. Alerta também para os cuidados que devem existir no armazenamento temporário destes pneumáticos. Por fim, dispõe um *linck* com a relação dos endereços de seus *Truck Centers* (www.pirelliclubtruck.com.br).

2.1.3.5 Iniciativas de Prefeituras

Algumas ações individuais também foram tomadas por diversas prefeituras no Brasil quanto à questão dos pneus inservíveis, algumas serão destacadas a seguir.

Prefeitura Municipal de Canoas (RS)

A Secretária de Saúde da Prefeitura Municipal de Canoas (RS), no ano de 2000, preocupada com atenção necessária que deveria ser dispensada a questão ambiental dos pneumáticos inservíveis descartados e queimados no município, realizou na Região Metropolitana de Porto Alegre uma fiscalização que tinha como finalidade identificar a origem deste resíduo. O resultado deste trabalho diagnosticou que a maior parte do problema era proveniente das pequenas borracharias da região e da prática da atividade clandestina de descarte nas margens das rodovias e nos lixões feita por carroceiros (CIMINO, 2004).

Prefeitura Municipal de Foz do Iguaçu (PR)

Uma parceria entre a Prefeitura, a Secretaria de Meio Ambiente e a empresa *BS COLWAY*, é a iniciativa desenvolvida por esta prefeitura. A prefeitura disponibiliza uma coleta seletiva especial para pneus inservíveis, levando-os até um depósito temporário no bairro Campos em Foz do Iguaçu. “Posteriormente a carga é enviada para trituração na empresa *BS Colway*, que encaminha o material triturado para a *PETROSIX* em São Mateus (PR)”

Prefeitura Municipal de São Paulo (SP)

A iniciativa da Prefeitura de São Paulo se deu através do Projeto de Limpeza do Rio Tietê, que desde a implantação do projeto já retirou do rio mais de onze mil toneladas de lixo. “A sujeira, acumulada somente no trecho paulistano chegou ao rio principalmente por meio dos 220 córregos que deságuam no Tietê. Nesses três anos, o custo para retirar esse monte de lixo foi de R\$ 1 milhão” (BETINI, 2002). Desta coleta feita no Rio Tietê foram retirados do Rio mais de 80 mil pneumáticos inservíveis, resíduo que foi levado para um ecoponto da região

de São Paulo, onde a ANIP fez o transporte da carga até seu Centro de Armazenamento e Trituração em Jundiaí (SP). (CIMINO, 2004).

Prefeitura Municipal de Teresina (PI)

A prefeitura de Teresina disponibilizou um galpão para o armazenamento dos pneus inservíveis próximo ao aterro sanitário, localizado na BR 316, km 7. Quando o acúmulo de pneus corresponde à carga de uma carreta, ou seja, a um volume mínimo de 2.000 pneus de carros de passeio ou 250 pneus de carga, a prefeitura comunica à Reciclanip, que num prazo máximo de 72 horas, terá que dar destinação final adequada aos pneus, conforme a Resolução Conama 258/99 (GALDINO & MONTEIRO, 2013).

2.2 Conforto térmico

Conforme define a NBR 15220-1/2005 (ABNT, 2005), conforto térmico está ligado à satisfação psicofisiológica do indivíduo, às condições térmicas do ambiente. Pois as habitações, além de terem a função de abrigar o homem e proteger do sol, dos ventos, das chuvas e outros perigos, também lhe devem propiciar conforto.

O conforto térmico de um ambiente é essencial para a sensação de bem-estar, humor e dependem de variáveis físicas ou ambientais no desenvolvimento das atividades dos usuários. Situações de desconforto causadas por temperaturas extremas, falta de ventilação adequada, umidade excessiva combinada com temperaturas elevadas ou radiação térmica devida a superfícies aquecidas, podem ser bastante prejudiciais. Psicologicamente, observam-se alguns efeitos como a apatia e desinteresse pelo trabalho. As principais variáveis físicas que influenciam no conforto térmico são: temperatura do ar, temperatura radiante térmica, umidade relativa e velocidade do ar. As variáveis pessoais são: atividade desempenhada, vestimenta utilizada e taxa de metabolismo da pessoa. Ainda, há as variáveis características individuais, aspectos psicológicos e hábitos (FANGER, 1970).

Alguns estudos foram realizados recentemente com objetivos de avaliar o conforto térmico em interior de edifícios, através de metodologias de medições da radiação solar e fluxo de calor em diferentes materiais de construções.

Zhang *et al.* (2018) em seu artigo, defenderam que o Voto Médio Previsto (PMV) desenvolvido pela **Fanger** é o índice de conforto térmico mais amplamente utilizado para avaliar ambientes térmicos interiores. Como a utilização extensiva do envelope de vidro na concepção de edifícios, o conforto térmico interior é cada vez mais afetado pela radiação solar.

Contudo, o PMV original tem um desvio na avaliação do conforto térmico das condições de radiação solar, devido à sua negligência em relação à esta. Com base neste defeito, o índice de Voto Médio Previsto Corrigido (CPMV) é proposto no seu trabalho para avaliar o conforto térmico interior em condições solares. Para validar a precisão da CPMV, eles realizaram estudos experimentais em três tipos diferentes de edifícios de envelope transparente em Tianjin, no norte da China. Foi obtido um total de 998 respostas térmicas de temas no Verão e no início do Outono de 2017. O Voto de Sensação Térmica (TSV) obtido a partir dos sujeitos foi utilizado como o verdadeiro valor da sensação térmica. A análise dos dados revela que o acordo entre o PMV e o TSV é fraco, enquanto os valores previstos da CPMV concordam bastante bem com o TSV. Em comparação com o PMV, o desvio máximo pode ser diminuído em 79,5% com o método CPMV na avaliação do conforto térmico das condições solares. Dessa forma concluem que, a CPMV é validada para ser aplicável na avaliação do conforto térmico interior em edifícios com radiação solar.

Em estudo realizado sob o título de “Modelo para avaliar o fator de conforto térmico: Medição dinâmica do fluxo de calor nos materiais de construção”, O conforto térmico nos edifícios é perseguido através da melhoria da eficiência no consumo de energia e do desenvolvimento de materiais mais quentes. Contudo, o conceito de conforto térmico não está claramente definido e os parâmetros subjetivos entram em jogo, o que dificulta a tradução para parâmetros físicos. Neste trabalho, é desenvolvido um método para medir o conforto térmico dinâmico dos materiais com base nas leis termodinâmicas e na transferência de calor, deixando de lado os parâmetros subjetivos, e propondo uma escala do fator de conforto térmico para os diferentes materiais. Para isso, foi concebido um dispositivo para determinar o regime transitório do fluxo de calor fornecido por um material quando este entra em contato com um dedo humano simulado, a fim de imitar a sensação humana ao pisar um material de pavimento. Esta configuração experimental mede as curvas de arrefecimento de um material tendo em conta os principais parâmetros que podem afetar o fluxo dinâmico de calor. Os resultados obtidos com este procedimento permitem estabelecer uma escala de conforto térmico onde os diferentes materiais podem ser categorizados. Além disso, a condutividade térmica e a capacidade térmica foram medidas a fim de correlacionar as propriedades térmicas com os resultados obtidos, e foi realizado um estudo de simulação para as suas confirmações (ENRIQUEZ *et al.*, 2018).

Dois estudos recentes realizados por Wang *et al.* (2020), abordam variáveis pessoais e subjetivas nas medidas do conforto térmico. O primeiro trata da “Análise dimensional da métrica de conforto térmico subjetivo baseada na base de dados ASHRAE

Global Thermal Comfort Database utilizando a aprendizagem mecânica”, onde foram motivados pelo questionamento: Quantos e que métricas subjetivas devem ser utilizadas para a avaliação da experiência térmica dos ocupantes de um ambiente? Verificaram que a sensação térmica é a métrica mais frequentemente utilizada na Base de Dados de Conforto Térmico II, seguida de preferência térmica, conforto e aceitabilidade. A sensação térmica-preferência térmica, conforto térmico-aceitabilidade do movimento do ar e conforto térmico-preferência térmica, são os três principais pares de métricas mais dependentes. Uma análise dos componentes principais confirmou que a experiência pessoal das condições térmicas em ambiente construído não é um problema unidimensional, mas pelo menos um problema bidimensional, e a sensação térmica e o conforto térmico sugeridos devem ser perguntados em levantamentos de neve à direita, uma vez que os dois primeiros componentes principais são majoritariamente construídos pela sensação térmica e pelo conforto térmico. Para confirmar ainda mais o poder de previsão da sensação térmica e do conforto, utilizaram a regressão logística e a máquina vetorial de apoio para prever a aceitabilidade térmica e a preferência térmica com sensação térmica e conforto. A precisão da previsão é de 87% para a aceitabilidade térmica e de 64% para a preferência térmica. O erro de previsão pode ser devido à diferença individual dos ocupantes e a erros das pessoas na resposta ao inquérito. Afirmam ainda que estes resultados poderiam ajudar na concepção de experiências em câmara, estudos de campo, e interfaces de interação entre edifícios humanos, ao lançar luz sobre a escolha de métricas térmicas subjetivas para recolher informação eficaz e precisa sobre a experiência térmica dos ocupantes de um ambiente.

O segundo estudo enfatiza que, as diferentes exigências e preferências térmicas entre indivíduos levam a uma baixa taxa de satisfação dos ocupantes, apesar do elevado consumo de energia pelo sistema HVAC. Neste estudo visam quantificar a diferença nas exigências térmicas, e comparar os fatores influentes que podem levar a essas diferenças. Com a recém-lançada base de dados ASHRAE, responderam quantitativamente às duas seguintes questões de investigação: quais os fatores que levariam a diferenças individuais marcantes, e qual a magnitude dessa diferença. A regressão linear foi aplicada para descrever a macrotendência da forma como as pessoas se sentem termicamente sob diferentes temperaturas. Foram estudados e comparados neste estudo três tipos de fatores que podem levar a diferentes exigências térmicas, ou seja, fatores individuais, características de construção e fatores geográficos. Verificou-se que o clima local tem o impacto mais acentuado na temperatura neutra, com uma dimensão de efeito de 3,5 °C; seguido pelo país, modo de funcionamento HVAC e corpo construído, o que leva a uma diferença de mais de 1 °C. Em termos de

sensibilidade térmica, o tipo de edifício e o clima local são os fatores mais influentes. Os sujeitos em edifícios residenciais ou provenientes da zona de clima seco poderiam aceitar uma amplitude térmica $2,5^{\circ}\text{C}$ superior à dos edifícios de escritórios, de educação ou da zona de clima continental. Os resultados desta investigação poderiam ajudar os investigadores e designers de conforto térmico a identificar fatores influentes que poderiam levar a diferenças individuais, e poderiam lançar luz sobre a seleção de características para o desenvolvimento de modelos de conforto pessoal (WANG *et al.*, 2020).

2.2.1. Processos de Transferência de Calor

Na análise do desempenho de paredes térmicas, é necessário conhecer os mecanismos da transferência de calor envolvidos no problema. Para uma parede com superfície plana, deve-se considerar radiação solar incidente, convecção nas superfícies externa e interna e condução através da parede, (Figura 2.5).

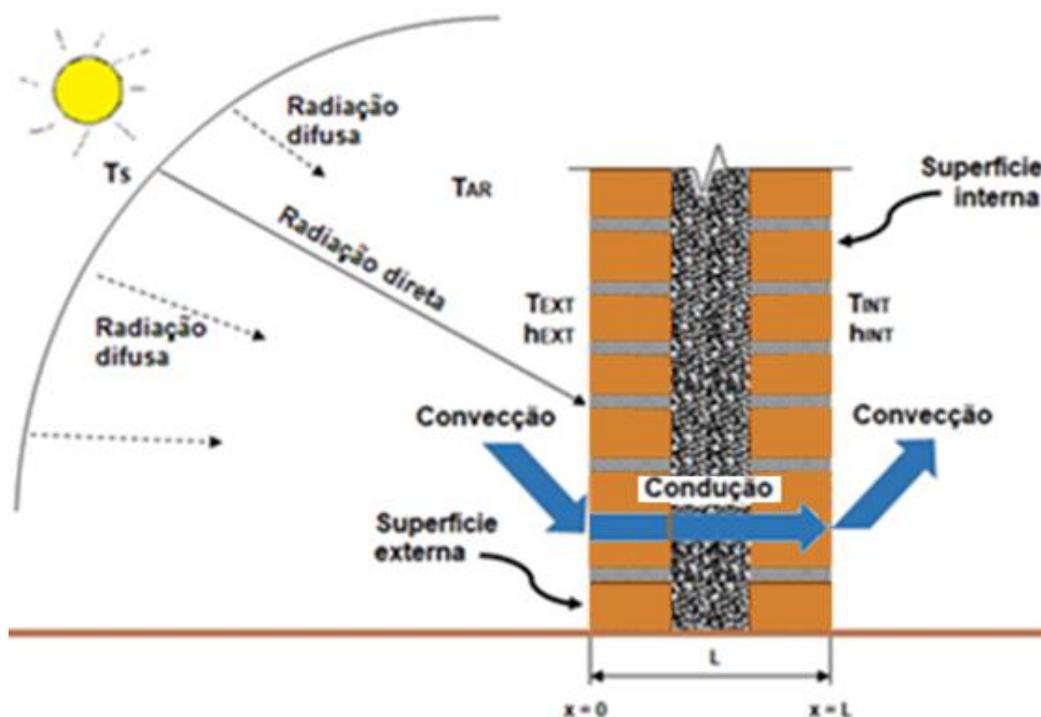


Figura 2.5 – Esquema dos fenômenos de transferência de calor na parede.
Fonte: Autoria própria

A transferência de calor ocorre do meio de maior temperatura, para o meio de menor temperatura e pode ser transferida de três modos diferentes: Condução, Convecção e Radiação.

Condução é dada pela interação de partículas de maior energia de uma dada substância com partículas adjacentes de menor energia e pode ocorrer em líquidos, sólidos ou gases; Convecção é o modo de transferência de calor entre uma superfície sólida e o líquido ou gás adjacente que está em movimento e que envolve os efeitos combinados de condução e movimento do fluido e a Radiação é a energia emitida pela matéria na forma de ondas eletromagnéticas (ou fótons) resultante das mudanças nas configurações eletrônicas dos átomos ou moléculas.

Em qualquer um dos processos de transmissão citados, a quantidade de calor trocada na unidade de tempo é denominada fluxo térmico. O fluxo térmico é chamado permanente quando não varia com o tempo, ou seja, o calor que penetra no corpo é igual ao que abandona o mesmo. Neste regime, também denominado estacionário, a distribuição das temperaturas no interior do corpo no qual se verifica a passagem de calor também não varia com o tempo (COSTA, 1982).

Quando o fluxo térmico varia com o tempo, é denominado não-permanente ou transiente. Isto acontece no aquecimento ou resfriamento dos corpos no qual o fluxo térmico entrante é diferente do fluxo térmico nascente, de modo que as temperaturas no interior do corpo dependem não só do ponto considerado como do tempo.

2.2.1.1 Transferência de Calor por Condução

Segundo Dewitt & Incropera (2003) “A condução pode ser vista como a transferência de energia das partículas mais energéticas para as partículas de menor energia, em um meio, devido às interações entre elas”.

A teoria mecânica do calor considera que as moléculas dos corpos se acham animadas de movimento vibratório e, quanto mais elevada for a sua temperatura, maior será a velocidade de vibração das moléculas. Este movimento de vibração permite um intercâmbio de energia cinética entre as moléculas, das quais as de maior temperatura cedem, por choque, energia às de menor temperatura, originando-se, assim, a transmissão de calor por meio de condução.

A diferença de temperatura, tipo de material, espessura e geometria determinam a taxa de condução por um meio. Para as paredes, a taxa de condução de calor Q é proporcional à diferença de temperatura (T) entre as superfícies e à área (A) de transferência de calor, mas inversamente proporcional à espessura (x). Essa relação foi expressa na forma diferencial pela lei de Fourier para condução de calor, conforme Eq. 2.1:

$$Q = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.1)$$

Sendo que a condutividade térmica k do material representa a medida da capacidade do material de conduzir calor. Um valor alto desta propriedade significa que o material é um bom condutor de calor, um valor baixo representa um material mal condutor ou isolante.

A velocidade com que o calor se difunde através do material é conhecida como difusividade térmica, e é definida pela razão entre o calor conduzido através do material (k) e calor armazenado por unidade de volume ($\rho \cdot c_p$). Quanto maior for a difusividade térmica, mais rapidamente será a propagação de calor no meio. Um pequeno valor de difusividade térmica (ex.: água) significa que a maior parte do calor é absorvida pelo material e uma pequena quantidade é conduzida adiante. Sendo assim, é possível citar que a água é um pobre condutor de calor em relação ao ferro, entretanto é um excelente meio para armazenar energia térmica.

2.2.1.2 Transferência de Calor por Convecção Natural

Dewitt & Incropera (2003), afirma que o modo de transferência de calor por convecção é composto por dois mecanismos: movimento aleatório molecular (difusão) e movimento global do fluido. A transferência de calor por convecção ocorre quando um fluido, como o ar ou a água, está em contato com um objeto em que a temperatura é maior do que a de sua vizinhança. O fluido que está em contato com o objeto quente tem a sua temperatura aumentada e, na maioria dos casos, o fluido se expande. Por ser menos denso que o fluido mais frio que o envolve, ele sobe devido ao empuxo. O fluido que o circunda, mais frio, cai para tomar o lugar do mais quente que se elevou, assim estabelece-se uma circulação convectiva.

A transferência de calor por convecção na parede térmica acontece de forma natural através do movimento do fluido próximo a ela. A taxa de transferência de calor é expressa pela lei de Newton do resfriamento, e é proporcional à diferença de temperatura entre o fluido e a parede, conforme Eq. 2.2:

$$Q = hA_S (T_S - T_\infty) \quad (2.2)$$

Sendo que, h é o coeficiente de transferência de calor por convecção estimado, A é a área da parede, T_S é a temperatura da parede e T_∞ é a temperatura do fluido.

2.2.1.3 Transferência de Calor por Radiação

De acordo com Duffier & Beckman (1996), a energia emitida pelo Sol que chega até a terra é transportada por ondas eletromagnéticas. Essas ondas se propagam livremente através do quase vácuo do espaço. Além disso, todos os demais objetos emitem radiação eletromagnética devido a sua temperatura, onde absorvem parte da radiação que chega até eles vinda de outros objetos. Quanto maior a temperatura do objeto, mais ele irradia.

A radiação térmica nada mais é, do que transmissão de calor entre dois corpos de diferentes temperaturas, imersos em um mesmo meio mais ou menos transparente a essa espécie de radiação (COSTA, 1982).

Para que ocorra a transferência de calor por radiação não é necessária presença de um meio interveniente, já que a radiação é a energia emitida pela matéria sob a forma de ondas eletromagnéticas ou fótons.

A taxa de radiação emitida pela parede é menor que a emitida pelo um corpo negro dado pela lei de Stefan-Boltzmann, e é expressa conforme Eq. 2.3.

$$Q = \varepsilon \sigma A_s T_s^4 \quad (2.3)$$

Sendo que, T_s é a temperatura da superfície na temperatura termodinâmica, $\sigma = 5,670 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ é a constante de Stefan-Boltzmann e ε é a emissividade da superfície.

2.2.2. Propriedades Térmicas dos Materiais

2.2.2.1 Condutividade Térmica

A condutividade térmica é uma propriedade importante para o entendimento da transferência de calor nos materiais. Ela é classificada como uma propriedade de transporte, indicando a taxa pela qual a energia é transferida pelo processo de difusão. Ela depende da estrutura física, atômica e molecular da matéria (DEWITT & INCROPERA, 2003).

Conforme Lamberts; Dutra e Pereira (1997) quanto maior for o valor da condutividade térmica, maior será a quantidade de calor transferida entre as superfícies dos materiais.

Segundo Costa (1982) a condutividade térmica obedece a denominada lei de Fourier, conforme a qual o fluxo térmico é diretamente proporcional à superfície através da qual se verifica a passagem de calor e ao gradiente de temperatura. Portanto, analisando a propagação de calor unidirecional e permanente, através de uma parede de faces planas (caso mais comum na prática), teríamos da dedução da Equação Fourier, a Eq. 2.4.

$$K = \dot{Q} \cdot e / S \cdot \Delta t \quad (2.4)$$

Onde:

S = superfície através da qual se dá a passagem de calor, dada em m^2 ;

Δt = diferença de temperatura entre as faces extremas da parede, dada em $^{\circ}C$ ou K ;

e = espessura da parede, dada em m ;

\dot{Q} = fluxo de calor, dada em Watts.

O valor de k varia conforme a natureza do corpo, composição, temperatura, pureza, densidade aparente, umidade, homogeneidade, entre outros fatores. Os valores de k para os principais materiais de construção e isolantes, em função de sua temperatura de utilização são dados pela Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Apresenta os valores de k para alguns materiais usados na construção

MATERIAL	t(°C)	k (W/m.K)
Areia seca	20	0,28
Cimento em pó (Portland)	90	0,25
Concreto armado	20	0,7-1,21
Gesso	20	0,40
Madeira (Pinho)	20	0,14
Vidro	0-100	0,65
Parede de tijolos (nova)	10	1,20
Parede de tijolos (velha)	10	0,84
Tijolo de argila (seco à máquina)	0-100	0,42
Papelão laminado	20	0,07
Poliestireno expandido	25	0,027

Fonte: Costa (1982)

2.2.2.2 Resistência e Transmitância Térmicas

Para Lamberts; Dutra e Pereira (1997) a resistência térmica é a propriedade dos materiais de resistir à passagem de calor.

Conforme Costa (1982) em qualquer tipo de transmissão de calor em regime permanente, o fluxo de calor (\dot{Q}) é diretamente proporcional à diferença de temperatura (ΔT), sendo assim, por analogia a lei de Ohm, temos Eq. 2.5.

$$R = \frac{U}{I} \quad (2.5)$$

da eletricidade, podemos chamar o quociente da diferença de potencial térmico pela intensidade do fluxo térmico é resistência térmica, ou seja Eq. 2.6.

$$Rt = \frac{\Delta T}{\dot{Q}} \quad (2.6)$$

onde: \dot{Q} = fluxo térmico, em kcal/h; e ΔT = diferença de temperatura, em K.

Em relação a uma parede composta por n camadas de materiais a relação entre a resistência térmica e a transmitância térmica pode ser expressa pela Eq.2.7.

$$Rt = \frac{1}{U} = Rse + \sum_{i=1}^n \frac{ei}{ki} + Rsi \quad (2.7)$$

Onde:

Rt = resistência térmica total (m^2C/W);

U = transmitância térmica (W/m^2C);

Rse = resistência superficial interna (m^2C/W);

Rsi = resistência superficial externa (m^2C/W);

e = espessura de camada do material (m);

k = condutividade térmica de cada camada de material (W/mC).

Segundo Costa (1982), em casos complexos, o conceito de resistência térmica facilita o entendimento da transmissão de calor e o cálculo das temperaturas superficiais e intermediárias quando a transmissão de calor é verificada entre dois fluidos separados por paredes compostas.

Conforme Lamberts; Dutra e Pereira (1997) a transmitância térmica (U) é o inverso da resistência térmica, ou seja, quanto maior a resistência térmica de uma parede menor será a quantidade de energia transferida.

O cálculo da transmitância térmica é de fundamental importância para a avaliação do comportamento de um fechamento opaco frente à transmissão de calor. Esse cálculo ainda fornece subsídios para comparação de diversos tipos de fechamentos opacos. A Figura 2.6 representa uma parede simples de tijolos maciços com reboco em ambas as faces, demonstrando o procedimento de cálculo.

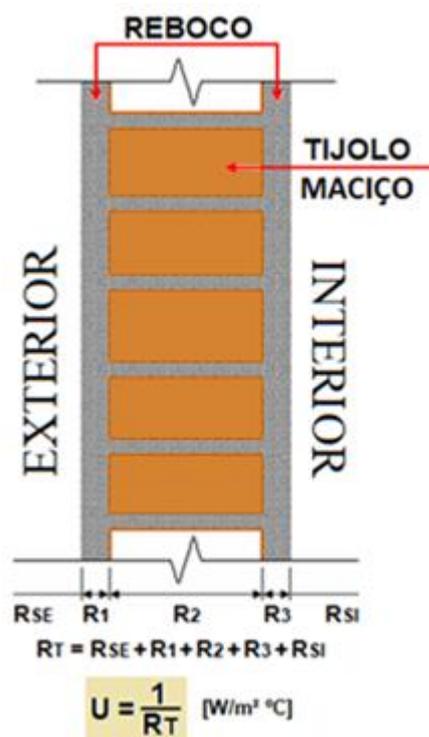


Figura 2.6 - Transmitância térmica em uma parede

2.2.2.3 Difusividade Térmica

Conforme Dewitt & Incropera (2003) a difusividade térmica depende de três propriedades. Essas propriedades são conhecidas como termofísicas e incluem duas categorias distintas, propriedades de transporte: que incluem os coeficientes de taxa de difusão, como a condutividade térmica k (para transferência de calor) e a viscosidade cinemática ν (para

transferência de momento) em escoamento de flúidos. Já as propriedades termodinâmicas se referem ao estado de equilíbrio do sistema. Massa específica (ρ) e calor específico (c_p) são duas propriedades muito utilizadas em análise termodinâmica. O produto $\rho \cdot c_p$ ($J/m^3 \cdot K$), denominado capacidade calorífica volumétrica, representa a capacidade de um material de armazenar energia térmica.

A maneira como o calor se difunde através de determinado material é denominada difusividade térmica. Ela depende da condutividade e da velocidade de condução da energia térmica no interior do material. A difusividade térmica é uma variável mais importante do que a condutividade, pois expressa a rapidez com que um corpo se ajusta por inteiro à temperatura que o cerca.

A difusividade térmica α é a razão entre a condutividade térmica e a capacidade calorífica volumétrica e é expressa pela seguinte Eq. 2.8.

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot c_p} \quad (2.8)$$

Onde:

α = difusividade térmica (m^2/s);

k = condutividade térmica ($W/m \cdot K$);

ρ = densidade ou massa específica (kg/m^3);

c_p = calor específico ($J/kg \cdot K$).

A difusividade térmica mede a capacidade do material de conduzir energia térmica em relação à sua capacidade de armazená-la. Quanto maiores os valores da difusividade térmica de um material, maior será a velocidade de com que ele se adaptara as mudanças nas condições térmicas (DEWITT & INCROPERA, 2003).

2.2.3. Índice de Conforto Térmico

O processo de avaliação do ambiente térmico requer a existência de critérios e valores baseados nos índices e escalas de conforto térmico. No intuito de quantificar o comportamento humano ante as variações térmicas do ambiente, são definidos índices que expressam a relação entre causa e efeito, com a utilização de valores numéricos representativos do fenômeno.

As escalas de conforto térmico podem ser semânticas ou numéricas, sendo montadas em termos de sensações subjetivas graduadas por conforto e desconforto térmico, relacionando-se tais graduações com os parâmetros físicos de estímulo. Atualmente, os índices evoluíram e os modelos de conforto estão sendo desenvolvidos com o apoio da informática. As condições de conforto térmico dependem da atividade desenvolvida pelo indivíduo, da sua vestimenta e das variáveis do ambiente que proporcionam as trocas de calor entre o corpo e o ambiente. Além disso, devem ser consideradas outras variáveis como sexo, idade, biótipo, hábitos alimentares etc., ou seja, o conforto térmico possui ampla conotação, incluindo também aspectos fisiológicos e psicológicos, além das características ambientais (ENESCU, 2017).

Os índices de conforto térmico procuram englobar, num parâmetro, o efeito conjunto dessas variáveis. E, em geral, esses índices são desenvolvidos fixando um tipo de atividade e a vestimenta utilizada pelo indivíduo para, a partir daí, relacionar as variáveis do ambiente e reunir, sob a forma de cartas nomogramas, as diversas condições ambientais que proporcionam respostas iguais por parte dos indivíduos.

Os fatores principais que influenciam o conforto térmico consiste em 3 elementos essenciais, um de natureza humana (metabolismo, vestuário, tamanho do corpo, fator de gordura e atividades realizadas), outro por fatores internos da construção (material de construção, temperatura do piso, layout dos móveis, posição de abertura das portas e janelas) e finalmente, fatores naturais de (bloqueios, topografia, vento e outros) (NORAIN & KASSIM, 2018).

Os índices de conforto térmico foram desenvolvidos com base em diferentes aspectos do conforto e podem ser classificados como a seguir:

- índices biofísicos — que se baseiam nas trocas de calor entre o corpo e o ambiente, correlacionando os elementos do conforto com as trocas de calor que dão origem a esses elementos;
- índices fisiológicos — que se baseiam nas reações fisiológicas originadas por condições conhecidas de temperatura seca do ar, temperatura radiante média, umidade do ar e velocidade do ar;
- índices subjetivos — que se baseiam nas sensações subjetivas de conforto experimentadas em condições em que os elementos de conforto térmico variam.

2.3 Parede térmica

A definição de parede térmica pode ser entendida como sendo aquela parede que tem a capacidade de impedir (bloquear) os raios solares, não deixando o ambiente se aquecer. Toda parede tem alguma resistência, mas é possível fazer alguns tratamentos especiais para torná-la mais eficiente no trabalho de bloqueio dos raios do sol.

A transferência de calor não depende de vizinhos e nem de você, é natural. Desta forma a vantagem em ter paredes térmicas atinge diretamente o conforto da sua casa, especialmente para dormir. Ao fazer um tratamento térmico em paredes que recebem incidência do sol, você está reduzindo o aquecimento interno, já que as paredes, assim como o telhado absorve o calor e depois transfere para dentro do ambiente.

Muitos estudos, veem sendo desenvolvidos sobre a utilização de materiais com a finalidade de minimizar os efeitos térmicos em paredes e elementos construtivos, entre eles, podemos destacar os que incluem a introdução de materiais de mudança de fase-PCM, que de forma encapsulada, provoca o aumento da capacidade térmicas em paredes, tetos e pisos residenciais.

Em trabalho de Tese, sob a orientação do prof. Kamal Ismail da UNICAMP, Castro (1991) realizou um estudo numérico e experimental de armazenamento térmico por calor latente em paredes e tetos utilizando material de mudança de fase com propriedades fornecidas pela literatura e levantadas no laboratório com comprovação experimental. A utilização de material de mudança de fase em tetos e paredes não altera as propriedades estruturais dos elementos construtivos e funciona como uma barreira térmica à penetração de calor, suavizando o impacto da variação da carga térmica externa transmitida para o ambiente interno.

Carbonari *et al.* (2006) relataram num estudo numérico e experimental o uso de PCM em painéis sanduíche de paredes pré-fabricadas, onde um algoritmo numérico em elementos finitos para a simulação de problemas bidimensionais de transferência de calor com a mudança de fase é validado. Compararam os resultados numéricos com os experimentais provenientes de ensaios realizados em dois tipos diferentes de PCM que continham painéis sanduíche. A aproximação muito boa dos resultados, sugere que este pode ser uma ferramenta de projeto poderosa para todos os tipos de elementos de construção contendo PCM. Além disso, protótipos de PCM contendo painéis sanduíche para paredes pré-fabricadas foram testadas capaz de simular vários tipos de condições ambientais exteriores e interiores, destina-se a avaliar os desempenhos energéticos de tais painéis, que os tornam adequados para utilização em diferentes contextos climáticas ou em diferentes elementos de edifícios, onde os mesmos

também demonstraram uma aproximação razoável dos valores simulados numericamente com os valores encontrados experimentalmente em relação ao desempenho térmico dos painéis para várias situações climáticas de projetos.

Em estudo utilizando PCM em tijolos, Castell *et al.* (2010) apresentam os resultados de uma montagem experimental para testar materiais de mudança de fase com dois típicos materiais de construção (tijolos convencionais e alveolares) para a construção na região do mediterrâneo. Vários cubículos foram construídos e seu desempenho térmico ao longo do tempo foi medido. Para cada material de construção, PCM micro encapsulado é adicionado em cabines. As celas têm uma bomba de calor doméstica como um sistema de refrigeração e o consumo de energia é registrado para determinar as economias de energia realizadas. As experiências de livre flutuação mostram que o PCM pode reduzir os picos de temperatura até 1°C e suavizar as flutuações diárias. Concluíram ainda que, o consumo de energia elétrica em ambientes refrigerados, reduziu em 15% e que conseguiram a redução das emissões de CO₂ em cerca de 1 a 1,5 kg/ano/m².

Outro estudo experimental e numérico da aplicação de materiais de mudança de fase (PCMs) em componentes de construção foi apresentado para gerenciamento térmico de um teste de quarto-solar passivo. Uma parede específica feita de tijolos de vidro ocas cheias de PCM foi estudada. Três PCMs foram testados: ácido, parafina, e hidrato de sal gordo cujas temperaturas de fusão são 21°C, 25°C e 27,5°C, respectivamente. Os estudos demonstraram que o uso do PCM regulou a temperatura interna e limitou o uso de sistemas de ar-condicionado ativos (BONTEMPS *et al.*, 2011).

Navarro *et al.* (2015) incorporaram PCM em uma laje de núcleo de concreto para fins de armazenamento térmico. A laje ativa foi testada sob condições de inverno ameno e um potencial interessante é observado nos resultados, onde foram registrados, carga e descarga com eficiência em torno de 70%. Além disso, o desempenho teórico do sistema de descarga sugeriu que o PCM, proporcionou um fornecimento rápido de aquecimento, enquanto no concreto ocorreu de forma lenta o que contribui para prolongar o período de fornecimento de calor que foi provado nos resultados experimentais de inverno. A energia adquirida na laje que não é usado no mesmo dia é armazenada e torna-se útil durante dias com baixo consumo de energia. Este fato deve-se à elevada massa térmica do concreto e sua taxa de descarga baixa, o que é provado nos resultados teóricos e experimentais.

O artigo publicado por Kalnaes & Jelle (2015) demonstrou que, incorporando materiais de mudança de fase (PCM) em um prédio, permite uma utilização mais racional de energia. Devido às capacidades de armazenamento de PCMs, o excesso de calor pode ser

armazenado durante períodos quentes e liberado durante períodos frios. Ele também pode funcionar ao contrário, armazenando energia fria e usá-la para sistemas de refrigeração em períodos quentes. Os benefícios do uso de PCM em edifícios giram principalmente em torno de uma redução no consumo de energia, juntamente com uma transferência de carga de pico de energia necessária para o aquecimento ou de arrefecimento e um aumento do conforto térmico, diminuindo as flutuações de temperaturas.

Um estudo numérico foi realizado na cidade de Wuhan na China, onde apresenta um sistema integrado de uma bomba de calor geotérmica com uso de material de mudança de fase para arrefecimento no sistema de armazenamento de energia em prédio de escritórios. Este trabalho estudou o método de controle ótimo de GSHP integrado com tanque de armazenamento de refrigeração PCM em um edifício de escritório, onde foi percebido a mudança na carga de pico e a economia de energia elétrica. Foram analisados o desempenho e análise econômica deste sistema combinado sob diferentes formas de armazenamento de carga de refrigeração (a proporção da capacidade de arrefecimento de PCM do tanque de armazenamento com a capacidade total de resfriamento do sistema). O modo de operação e relação de armazenagem de refrigeração ideal foram obtidos para este sistema combinado. Os resultados dessa análise numérica deram conta de que com o investimento de operação e custo inicial, a economia de armazenamento de energia de refrigeração ideal foi de 40%. O custo anual do GSHP combinada PCM arrefecimento sistema de armazenamento sob a economia de armazenamento de arrefecimento de 40% foi reduzido em 34,2% em comparação com o sistema comum GSHP torre de refrigeração híbrida (CT). (ZHU *et al.*,2015).

Wang & Zhao (2015), publicaram em outro trabalho também realizado na China, mais precisamente na cidade de Xangai, com o título de “Investigações de parâmetros no uso de cortina de PCM para edifícios energeticamente eficientes”, que as janelas são consideradas elementos de fáceis transmissão de calor, devido à sua pequena resistência térmica e transparência à radiação solar, sendo responsável por uma grande parte do ganho de calor solar em edifícios. Neste estudo, uma técnica de custo baixo e flexível usando um sistema de janela com uma cortina dentro PCM (materiais de mudança de fase) é proposta para reduzir o ganho de calor solar em verões quentes. Parâmetros tais como a espessura do intervalo de ar, a temperatura de fusão PCM e espessura da camada de PCM foram variados a fim de revelar a sua eficácia térmica na redução de ganho de calor. Verificou-se que a convecção natural é aumentada em intervalos de ar mais espessas, o que mostra efeitos negativos em reduzir o ganho de calor. A temperatura de fusão PCM é essencial para o sistema de janelas, que devem ser selecionados e otimizados com base nos resultados da simulação. O ganho de calor também

pode ser reduzido pelo uso de camadas mais espessas de PCM com uma temperatura de fusão adequada. Foi verificado ainda que, a taxa média de transferência de calor para o espaço interior nas horas de trabalho pode ser reduzida em até 30.9% quando se utiliza uma camada de PCM de 15 mm, com uma temperatura de fusão na 29°C nos dias mais quentes de Verão em Xangai. Segundo os autores, a técnica proposta é promissora para serem aplicadas em futuras edificações.

2.3.1. Desempenho Térmico em Paredes

Vários estudos para investigar o desempenho térmico de edificações e seus elementos construtivos veem sendo realizados com o objetivo de promover maior eficiência energética e conforto aos usuários. O comportamento de diferentes materiais em relação à absorção, reflexão e transmissão de radiação solar podem propiciar uma redução no consumo de energia, tanto para resfriar quanto aquecer ambientes internos.

A razão entre a amplitude máxima da temperatura interna e externa depende das propriedades termofísicas dos materiais de construção e da espessura da parede. Aumentando a espessura da parede e diminuindo a condutividade térmica, a amplitude da temperatura interna diminui e aumenta o tempo de transferência de calor para a parede interna (GIVONI, 1976).

A seguir, são apresentados estudos, onde foram analisados os desempenhos térmicos de diversos tipos de edificações, analisando variáveis construtivas e sua influência nos resultados.

A vegetação como estratégia bioclimática é bastante conhecida de profissionais, tanto do meio acadêmico quanto da construção. Como elemento de fachada, a vegetação pode minimizar o ganho de calor, proporcionando uma melhor condição no conforto térmico das edificações. O uso da vegetação nas fachadas contribui para o conforto térmico de um ambiente construído, atenuando a radiação solar, reduzindo a temperatura do ar e temperatura superficial de parede interna e externa (BARTHOLOMEI, 2003 e MORELLI, 2009).

Lima (2005) desenvolveu uma pesquisa sobre material composto para uso na construção civil, utilizando argamassa de gesso e fibra vegetal, com objetivo obter um novo material que possa ser utilizado como revestimento ou elementos de vedação, agregando a esta propriedade que conduza à baixa condutividade térmica. Os testes realizados indicaram que as propriedades térmicas da Fibra Vegetal proporcionaram um ganho de 27,14 % em isolamento térmico pela redução da condutividade térmica do composto.

Marques (2007) analisou os efeitos sob o conforto térmico em um protótipo de habitação situado na cidade de São Luís – MA, alterando a configuração do telhado e monitorando a temperatura da parede. Os resultados obtidos permitiram concluir que quanto maior a inclinação do telhado, menor a temperatura interna.

Segundo Çengel & Afshin (2012), as paredes de alvenaria pintadas de cor escura, chamadas paredes de trombe, são comumente usadas no hemisfério norte, do lado sul das casas com energia solar passiva para reter energia solar, armazená-la durante o dia e liberá-la para a casa durante a noite. A ideia foi proposta por E.L. Morse, de Massachusetts, em 1881, e nomeada em referência ao Professor Felix Trombe, da França, que a usou extensivamente em seus projetos na década de 1970. Normalmente uma camada única ou dupla de vidro é colocada fora da parede e transmite a maior parte da energia solar, bloqueando as perdas de calor da superfície exposta da parede externa.

As paredes de trombe posicionadas com face para o sul são destinadas a regiões localizadas no hemisfério norte da atmosfera terrestre, pois esta é a superfície que recebe maior radiação solar. Para cidades do Brasil, a parede que recebe maior radiação solar é a de face norte.

Cavalcanti (2013) avaliou o desempenho térmico de um ambiente padrão a partir do uso de parede de trombe com diferentes configurações e tipologias de uso, por meio de comparações com um ambiente da mesma dimensão dotado de janelas convencionais, para oito cidades brasileiras. O uso da parede de trombe melhorou o conforto térmico dos usuários, promovendo ventilação natural e aquecimento solar passivo.

2.3.2. Elementos Construtivos com uso de Pneus

Apresentaremos agora resultados de alguns estudos publicados em artigos, onde os pneus inservíveis são utilizados como elemento de construção, sendo usado de várias formas, como elemento agregado, incorporado a outros materiais, onde se avalia suas propriedades, características e desempenho térmico, sempre voltado para as construções e edificações.

O potencial do uso de borracha de pneus usados em muitas áreas da engenharia civil, são estudados em trabalhos há mais de 40 anos. Aplicações onde os pneus podem ser usados e onde a adição de borracha de pneu provou ser eficaz em proteger o meio ambiente e conservar os recursos naturais incluem a produção de misturas no cimento, construção de estradas e obras geotécnicas. A reciclagem de pneus nas aplicações mencionadas acima,

representa um meio de aplicação destes, por razões ambientais e econômicas (OIKONOMOU & MAVRIDOU, 2009).

Aliabdo, Elmoaty e Abdelbaset (2015) em artigo publicado com o título “Utilização de resíduos de borracha em aplicações não estruturais” tendo como foco principal o estudo da disponibilidade do uso de partículas de borracha residual em aplicações não estruturais, observaram a partir de investigações anteriores, que a implementação de partículas de borracha residual no concreto tem um efeito negativo nas propriedades mecânicas. Este estudo teve como objetivo se beneficiar das altas propriedades de isolamento da borracha para aprimorar as propriedades de isolamento térmico e acústico do concreto. Além disso, as propriedades dos compósitos borracha-cimento e borracha-epóxi foram avaliadas nesta investigação, especialmente em termos de isolamento térmico e acústico. O conceito nesses compósitos é usar cimento ou epóxi como aglutinante para as partículas de borracha residual sem outros aditivos. O programa experimental foi dividido em duas partes. A primeira parte foca nas propriedades de isolamento térmico e acústico do concreto emborrachado em frações de alto volume de borracha. Além disso, as propriedades físicas e mecânicas do concreto emborrachado foram avaliadas em termos de densidade, absorção, resistência à compressão, resistência ao impacto, ductilidade e resistência à flexão. A segunda parte é sobre os compósitos borracha-cimento e borracha-epóxi. Três séries de testes foram conduzidos para determinar as propriedades de isolamento térmico e acústico, além das relações tensão-deformação e as propriedades relacionadas a esses compósitos.

Com o título “ Uso de Resíduo de Pneus Inservíveis em Substituição ao Agregado Fino em Argamassa de Revestimento”, Torres *et al.* (2017) da UFRGN realizaram substituições parciais em massa do agregado fino (15% e 25%) por resíduo de borracha peneirada que passa nas peneiras de 1,2mm e retida na de 0,6mm na produção de argamassas de revestimento. O objetivo foi avaliar a possibilidade do uso viável desta argamassa e para isso realiza os ensaios de resistência a compressão, absorção por capilaridade e avaliação do desempenho térmico. No estudo experimental foi definido o traço 1:3 e realizados ensaios de caracterização do material e aqueles de avaliação do desempenho da argamassa, conforme disposto na metodologia e de acordo com as normas específicas. A relação água/cimento definida foi de 0,70 para a referência e 0,63 para aquelas argamassas com substituições. A influência do resíduo de borracha de pneu na argamassa de revestimento, em comparação com a referência, mostra reduções na resistência a compressão, menores índices de absorção e capilaridade com o aumento do incremento de resíduo de borracha. A avaliação térmica revelou uma maior redução na variação de temperatura após incidência de fonte térmica. Constatou-se, portanto, uso viável da argamassa

de revestimento com substituição do agregado fino por resíduo de borracha principalmente com o foco de maior isolamento térmico para a construção.

Mais recentemente, Djadouni *et al.* (2019) resolveram avaliar o ciclo de vida do muro de contenção preenchido com pneus triturados, onde compara o consumo de energia, as emissões de gases de efeito estufa e os danos ambientais para dois métodos de construção de estruturas de retenção de encostas, um método tradicional que envolve um muro de contenção preenchido com areia e um método alternativo que envolve um muro de contenção preenchido com pneus triturados. O estudo levou em conta a extração e produção dos materiais de construção usados, o carregamento, o transporte e a instalação, a demanda acumulada de energia (CED), o potencial de aquecimento global (GWP), o potencial de acidificação, os critérios de saúde humana, o potencial de eutrofização aquática e a destruição da camada de ozônio, para cada método de construção. As sete categorias de impacto ambiental foram calculadas usando a ferramenta de software ATHENA® Environmental Impact Estimator (ATHENA® EIE) para edifícios v5.2.0118. As sete categorias de impacto foram reduzidas significativamente pelo uso de pneus triturados como aterro do muro de contenção; isso se deve à diminuição nas quantidades de concreto, aço de reforço e quantidade de combustível consumido pela construção de máquinas e veículos que transportam materiais de construção. O estudo conclui que, em todas as categorias de impacto examinadas, o método alternativo oferece um benefício ambiental maior que o método tradicional. Além disso, os resultados demonstram claramente que o uso de pneus triturados é muito eficaz como alternativa sustentável às estruturas de contenção.

Siddika *et al.* (2019) em artigo, analisaram a utilização de borrachas de pneus usados em compósitos cimentícios emborrachados, juntamente com suas propriedades de consumo de material, durabilidade e desempenho de manutenção. Este estudo também visa fornecer uma visão fundamental sobre as aplicações integradas de materiais compósitos de concreto emborrachado (RuC) para melhorar os métodos de construção, incluindo aplicações para aprimorar a sustentabilidade ambiental de estruturas de concreto na indústria da construção. A inclusão de agregado de borracha reciclada (AR) clareia o concreto, aumenta sua vida em fadiga e resistência, aprimora suas propriedades dinâmicas e melhora sua ductilidade. O concreto com AR reciclado apresenta bom desempenho em clima quente e frio e alcançou resultados significativos sob exposição crítica e várias condições de carregamento. Embora o RuC possua baixa resistência mecânica em geral, o tratamento específico e a inclusão de aditivos podem ser uma boa solução para melhorar essas propriedades de maneira confiável. Os pesquisadores afirmam ainda que, as investigações do RuC como materiais estão disponíveis

significativamente, mas as pesquisas sobre os membros estruturais do RuC devem ser enriquecidas.

Em outro artigo que trata do uso potencial de resíduos de borracha de pneus como agregado no concreto de cimento, mostram que o concreto que incorpora partículas de borracha triturada (CR) diminui a densidade fresca e diminui linearmente com o aumento do conteúdo de CR. As propriedades mecânicas do concreto geralmente diminuem à medida que o conteúdo de CR incorporado aumenta. No entanto, a resistência à compressão e à flexão da CRC, que é um pouco acima da do concreto agregado natural (NAC), é limitada ao tamanho fino da CR que substitui a areia e ao nível ótimo de substituição da CR (o teor de CR de 0% a 10% aumenta a resistência à compressão 2% e a resistência à flexão é aumentada em 7% a 21% em misturas com 10% a 20% de CR). A CRC tem maior absorção e permeabilidade à água que a NAC. No entanto, pequenas quantidades de nível de substituição de borracha (2,5% -7,5% CR) e a mistura de diferentes tamanhos de partículas de borracha podem reduzir a absorção de água do concreto. O CRC exibe alta resistência ao congelamento-degelo, resistência elétrica, resistência à abrasão e resistência ao ataque de sulfúricos e sulfatos ao incorporar o conteúdo adequado de CR em misturas de concreto. A profundidade da penetração de íons cloreto no CRC diminui com baixo conteúdo de CR (até 27,3% de redução para 5% de CR), mas aumenta quando o conteúdo de CR excede 20% (LI *et al.*, 2019).

Algumas pesquisas ainda focam especificamente o aspecto térmico da borracha de pneus como elemento construtivo, na qual nosso trabalho está voltado, entre elas temos:

Yesilata, Bulut e Turgut (2011) em estudo experimental do comportamento térmico de uma estrutura de edifício usando paredes exteriores de borracha, constatam que a adição de pedaços de pneus inservíveis em compósitos cimentícios melhora o desempenho do isolamento térmico. Afirmam que o desenvolvimento de tais materiais de construção com menor transmitância térmica reutilizando esses resíduos é uma questão desafiadora, pois fornece uma solução combinada para as preocupações atuais de economia de energia e poluição ambiental. A favor disso, as recentes diretivas da União Europeia estabeleceram limites estritos e silenciosos para reduzir o consumo de energia e a disposição de resíduos sólidos em aterros. O experimento comparou uma sala de modelos cujos exteriores são totalmente feitos com concreto adicionado com pneus para aumentar sua proteção térmica e uma sala padrão / convencional em dimensões idênticas, mas cercada por concretos comuns. Os comportamentos térmicos de longo prazo dessas duas salas são investigados e comparados em ambientes atmosféricos reais. Suas temperaturas internas revelam que a adição de pedaços de pneus de sucata reduz as variações de temperatura interna e o efeito das condições externas. Como

exemplo, os valores médios do intervalo de tempo ou retardamento do pico de temperatura de 3,28 e 2,96 h, respectivamente, para as salas construídas com e sem o uso de peças de pneus de sucata, correspondendo a uma melhoria de quase 11% na proteção térmica. Em geral, os resultados verificam que a adição de pneus de sucata melhora a proteção térmica da sala e é uma solução econômica para pessoas com baixa renda e / ou indivíduos que vivem em áreas rurais.

Em estudo realizado sob o título de “comportamento térmico transitório do concreto modificado com borracha triturada e implicações na resposta térmica e eficiência energética em edifícios”, são apresentados dados experimentais para as propriedades termo físicas de estado estacionário seco e saturado, e também as propriedades térmicas dinâmicas, de projetos de misturas visuais de 180, 120 e 65 mm para concreto liso emborrachado (RSC) com % em peso variável de borracha de pneu e substituição agregada tipos (fino, grosso e misto). Como resultados os compósitos apresentaram densidade e condutividade térmica significativamente mais baixas que o concreto simples, o decréscimo térmico permaneceu quase constante e, no entanto, o intervalo de tempo associado (retardamento do pico de temperatura) pode ser aumentado significativamente. A análise paramétrica dos efeitos da substituição da borracha de miolo por uma habitação padrão PassivHaus pesada (no modo de ventilação não mecânica) foi realizada usando simulação de desempenho do edifício. Para um clima de Londres (mais quente) ou Glasgow (mais frio), a RSC pode ser usada com adição de até 30% em peso e todos os tipos de substituição como um substituto para o concreto liso sem causar nenhuma diferença significativa na (DRT), se usada em conjunto com ventilação passiva para resfriamento noturno. No entanto, para o mesmo material, houve uma tendência geral de aumentar o número de horas de aquecimento nesse tipo de construção devido à sua maior capacidade de reter qualquer energia térmica armazenada (HALL, NAJIM e HOPFE, 2012).

Pessette & Pelisser (2012) da UNESC-Universidade do Extremo Sul Catarinense, em seu artigo “efeito da borracha reciclada de pneus na condutividade térmica de paredes de concreto” afirmam que a resistividade térmica é uma vantagem importante do concreto com borracha, principalmente para ser utilizado como placas em fachadas. O aumento do isolamento térmico, contribui para eficiência energética das edificações, reduzindo os custos com energia para climatização. Esses resultados não consideraram a determinação da carga térmica e condições específicas de envoltória para o cálculo de conforto térmico de uma edificação, mas mostraram a maior eficiência do concreto com borracha para o isolamento térmico de fachadas, o que, por sua vez, influencia na melhoria do conforto térmico das edificações, em clima tropical, como o Brasil. Os resultados de condutividade térmica mostraram uma forte tendência

de redução dos índices de condutividade, atingindo uma redução de 20% com o uso de 10% de borracha, para uma espessura de parede de 15 cm.

Em um projeto de pesquisa, foi estabelecido um programa experimental para investigar o efeito da quantidade e tamanho da borracha triturada (borracha obtida da reciclagem de pneus de sucata) e as propriedades térmicas da argamassa. Foram testadas, quatro níveis de adição de borracha triturada: 10, 20, 30 e 40% e três tamanhos de borracha triturada (nº 30, nº 10-20 e uma combinação de ambos os tamanhos) foram considerados misturas da argamassa emborrachada. Um dispositivo de medição de transferência de calor especialmente projetado e construído, foi usado para medir a condutividade térmica das amostras. Os resultados foram utilizados para determinar a melhor quantidade de borracha triturada que fornece a menor condutividade térmica, diretamente relacionada à melhoria na resistência térmica de misturas de concreto. Verificou-se que o tamanho e a quantidade de borracha triturada tinham um efeito sobre as propriedades térmicas das amostras investigadas. A condutividade térmica da argamassa emborrachada diminuiu 28% quando a borracha de migalha nº 10-20 foi usada. Verificou-se também que a borracha de migalhas nº 10-20 teve mais efeito na redução da condutividade térmica do que as borrachas nº 30 (ASHRAE, 2013).

Abu-jdayil, Mourad e Hussain (2016) desenvolveram um composto de enchimento de poliéster como material isolante, utilizando partículas de borracha residual como material de enchimento. Os compósitos foram preparados usando diferentes concentrações de borracha (0-40% em volume). Os compósitos foram caracterizados por testes de condutividade térmica, retenção de água, densidade, estabilidade térmica e microestrutura (MEV). Os resultados revelaram que as partículas de borracha provaram ser um bom material de enchimento que pode ser usado com poliéster não saturado para produzir compósitos isolantes. A investigação experimental mostrou que a adição de partículas de borracha à matriz polimérica reduz a condutividade térmica e a densidade dos compósitos. O baixo valor da condutividade térmica (0,144-0,113 W / m K) e a retenção de água muito baixa (<2,0%) do composto de borracha-poliéster mostram-se promissores para aplicações construtivas como isolante térmico. As micrografias de MEV indicaram que as partículas de borracha estão bem incorporadas na matriz polimérica com a formação de pequenos vazios ou lacunas na matriz composta. Aumentar o conteúdo e o tamanho da borracha leva a diminuir a condutividade e a densidade térmicas e, ao mesmo tempo, aumentar a retenção de água. Por outro lado, os compósitos apresentaram uma ligeira diminuição na estabilidade térmica quando comparados ao polímero puro. O estudo garantiu ainda a existência de uma relação não linear entre k e a densidade composta e que a incorporação do composto de borracha na parede da construção reduz o k geral em 70%.

Com o título de “Propriedades Mecânicas e Térmicas do Concreto que Incorpora Borracha e Fibras da Reciclagem de Pneus, Medina *et al.*, (2017) apresentam uma análise das propriedades mecânicas e térmicas de um concreto sustentável que incorpora borracha triturada (CR) e fibras de aço ou plástico parcialmente revestidas com borracha (FCR). Enquanto o CR é normalmente usado como agregado no concreto, o FCR é um novo agregado. O FCR consiste em fibras parcialmente revestidas com borracha triturada recuperada do processo de reciclagem de pneus, durante a granulação e antes da separação total da borracha. As propriedades mecânicas do concreto com borracha obtendo até 100% de substituição em volume do agregado de pedra foram obtidas através de testes de compressão, flexão, impacto e resistência ao desgaste. O módulo, a tenacidade, o índice de tenacidade e a absorção de energia de impacto de Young também são estudados. O concreto com agregado FCR apresenta um melhor comportamento mecânico que o concreto emborrachado convencional. A condutividade térmica (k) do concreto com FCR como agregado é comparável ao k de concreto com CR e menor que o concreto de referência. Finalmente, algumas propostas de sistemas construtivos com concreto emborrachado para reabilitação térmica de edifícios são analisadas usando software dependente de pseudotime, para o qual pode ser observada uma redução significativa dos fluxos térmicos.

Rajagopalan *et al.* (2019), apresentaram em estudo recente, onde foca nas propriedades mecânicas e térmicas de concretos com borracha em substituição parcial de agregados convencionais bem graduados. O estudo inclui a substituição de 10, 20, 30 e 100% de agregado grosso por agregados de resíduos de pneus e foi comparado com o concreto convencional da classe M30. Os concretos foram submetidos a um aquecimento cíclico térmico de 50 ° C por um período de 7 dias. Os resultados mostraram que o peso do concreto de borracha é reduzido em 12% em comparação ao concreto convencional e a resistência do concreto diminui com o aumento do teor de borracha. À temperatura ambiente, o concreto de borracha foi encontrado termicamente estável. As forças de compressão foram encontradas aumentando após aquecimento cíclico de 50 ° C por um período de 7 dias. Este efeito pode ser devido ao efeito do cimento Portland com Pozzolana, que contém 30% de cinza volante. A partir deste estudo, pode-se concluir que os concretos com resíduos de borracha podem ser um candidato potencial para estruturas e estruturas sem carga à temperatura ambiente.

Nesse 2º capítulo apresentamos de forma clara alguns conceitos e resultados de trabalhos envolvendo paredes térmicas e materiais utilizados em paredes, que podem de forma direta, contribuir para minimizar os efeitos da radiação térmicas, comenta-se os tipos de transmissão de calor, faz-se um resumo dos principais tipos de materiais, entre eles, o PCM,

apresentados em trabalhos nacionais e internacionais, onde se justifica claramente a sua utilização em questões que amenizam o conforto térmico ambiental e finalizamos mostrando resultados de alguns trabalhos, onde pudemos perceber algumas literaturas a respeito do uso de pneus, como isolante térmico, sendo usado para compor paredes térmicas, apenas alguns, que mostramos sendo incorporados às argamassas de revestimento ou placas de construção, alguns trabalhos também foram relatados, envolvendo a utilização de pneus de carro no formato natural de forma a aproveitá-lo passivamente como componente de redução de carga térmica .

Vale sempre ressaltar que os atuais problemas ambientais relativos à atmosfera fazem com que o mundo volte às atenções para medidas ambientalmente responsáveis visando atenuar o efeito estufa e a destruição da camada de ozônio. A cada ano a temperatura do planeta aumenta e mudanças climáticas desordenadas têm provocado fenômenos naturais que até então o planeta não havia sentido. É unânime a conclusão de que os países devem adotar políticas que, ao mesmo tempo, não agridam o meio ambiente e não tragam prejuízos econômicos e sociais. Esses suportes teóricos avaliados nas referências citadas, nos deu uma grande contribuição tecnológica, para acreditar que estaremos contribuindo para melhoria das condições climáticas ambientais e ratificando-as com os resultados dessa tese.

3 ANÁLISE EXPERIMENTAL DE PAREDES TÉRMICAS COM USO DE BORRACHA

Nessa etapa, foi implementada uma bancada experimental, que modelasse uma parede térmica eficiente na troca de calor, ou seja, capaz de minimizar os efeitos da radiação solar no interior das residências, com o foco específico de se obter a condutividade térmica efetiva das paredes investigadas, com a borracha de pneus.

O experimento foi realizado entre os meses de junho a dezembro de 2019, no Laboratório de Física da Universidade Estadual do Maranhão no próprio Campus da UEMA, localizada na cidade universitária Paulo VI, s/n Tirirical em São Luís capital do Estado do Maranhão. É uma ilha que está situada ao norte do estado entre as baías de São Marcos e São José de Ribamar, limita-se com os municípios de Paço do Lumiar, São José de Ribamar e Raposa, possuindo uma área de 827,141 Km², com uma população atual de 1.014.837 habitantes (IBGE-2010), localiza-se apenas à 4 metros de altitude, 2,031'48''S de latitude e 44,016'10''W de longitude, apresentando clima tropical quente e úmido, sendo duas estações bem definidas, a seca de agosto a dezembro e a chuvosa de janeiro a julho, com precipitação média anual de 2.325mm e temperatura média anual variando de 20 a 31°C.

O trabalho experimental foi desenvolvido em três etapas distintas:

- Construção da bancada experimental com instrumentação adequada;
- Listagem das variáveis a investigar verificando a operação e avaliação de propagação de erro;
- Levantamento de dados e análise dos resultados.

3.1 Definição da bancada experimental

As etapas desenvolvidas na análise experimental foram iniciadas desde março de 2017 com a definição da concepção e construção de uma bancada experimental. As etapas estão descritas detalhadamente, conforme fluxograma apresentado na Figura 3.1.

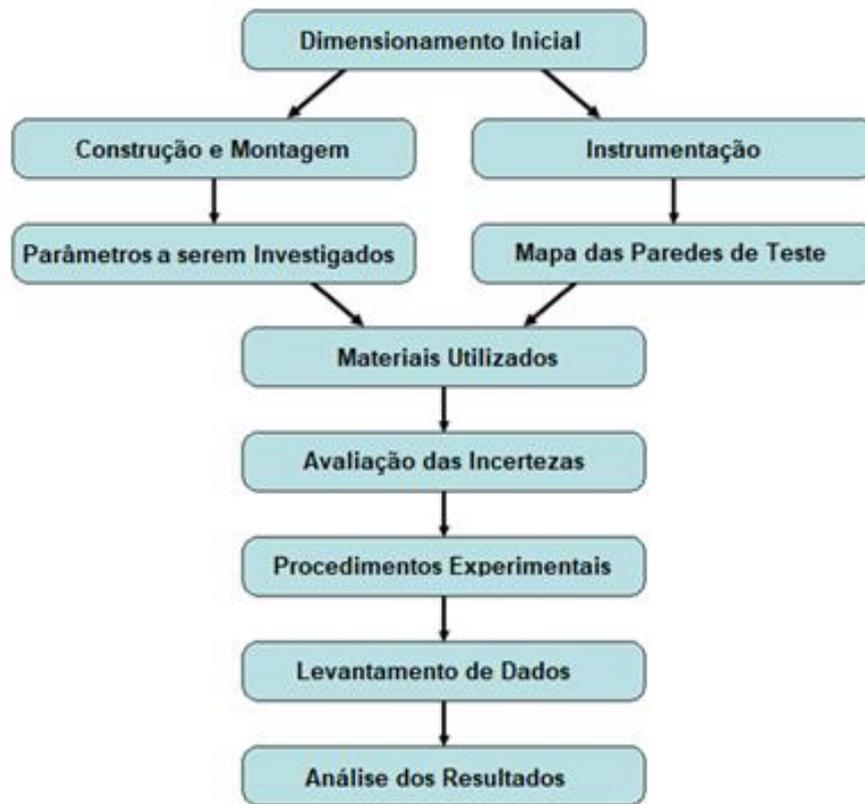


Figura 3.1- Fluxograma do desenvolvimento do experimento
 Fonte: Autoria própria, 2019

A seguir estão detalhadas as etapas do experimento, ou seja, os procedimentos da construção, instrumentação, operação, coleta de dados e análises dos resultados.

3.1.1 Dimensionamento Inicial: Construção e Montagem

A bancada experimental foi projetada e construída com o objetivo de determinar o comportamento térmico de um grupo de paredes de teste, mais precisamente, obter suas condutividades térmicas para posteriormente serem usadas nas simulações numéricas. O método utilizado para obter os valores de k foi o "Método do fluxo de calor longitudinal em placa", como descrito por (ISMAIL, 2000). Os segmentos especificados a seguir, constando de quatro partes independentes, que para efeito didático dividiu-se em A, B, C, D, conforme demonstra a Figura 3.2.

3.1.1.1. Projeto da Bancada

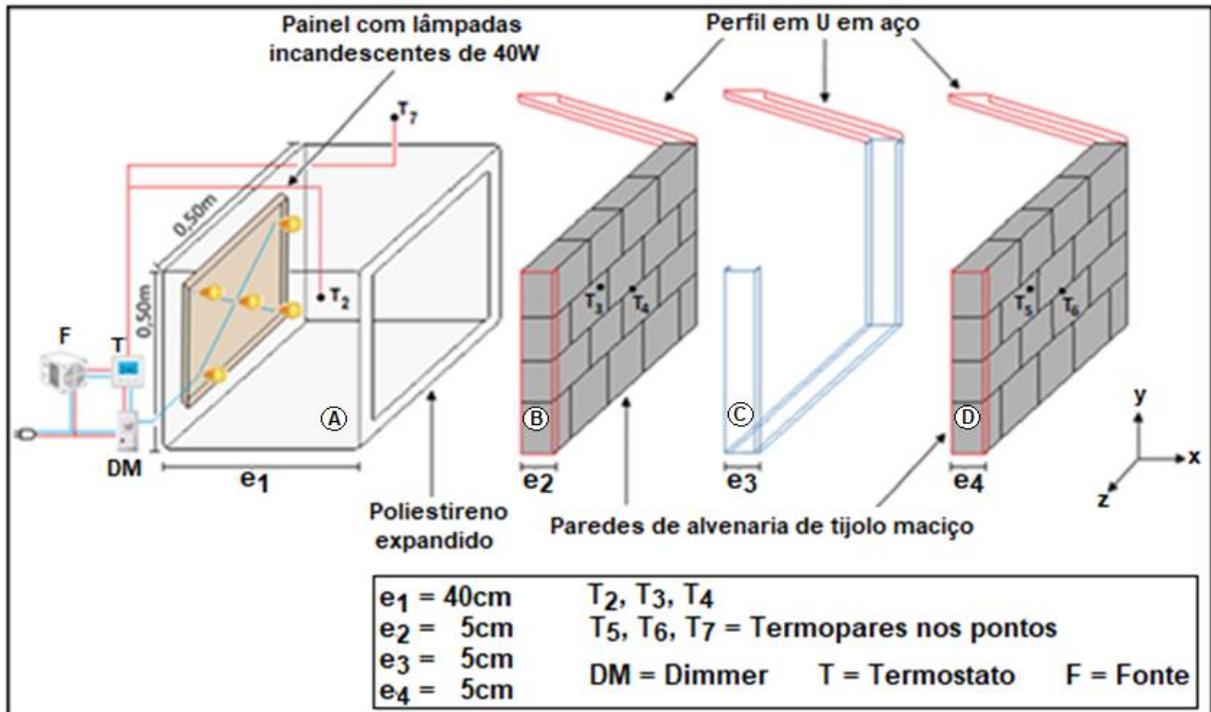


Figura 3.2 – Desenho esquemático da Instalação Experimental
 Fonte: Autoria própria, 2019

A parte **A**, consta de uma caixa de Poliestireno Expandido de dimensões de $(0,50 \times 0,50 \times 0,40)$ m, onde na lateral esquerda de dimensões de $0,50 \times 0,50 \text{m} = 0,25 \text{m}^2$, destinada a fixação de 5 lâmpadas incandescentes de potência nominal de 40, fixadas em soquetes de porcelanas. As lâmpadas foram distribuídas de maneira uniforme em toda a área de $0,25 \text{m}^2$, guardando as distâncias entre si de aproximadamente 10cm. Esse procedimento, se deve ao fato delas simularem a radiação solar de maneira uniforme. As lâmpadas foram ligadas em paralelo acopladas a um *Dimer* rotativo, que permitirá a variação de suas potências. Foi utilizado um termostato como dispositivo de segurança, para controle da temperatura máxima, inferior a temperatura de fusão do poliestireno expandido, acoplado a uma fonte chaveada 12V,5A,60W, bivolt.

A parte **B**, é constituída de uma parede de alvenaria de tijolos cerâmicos maciços $(5 \times 10 \times 20)$ cm na espessura de 5cm com área quadrada de $0,50 \text{m} \times 0,50 \text{m}$, tecida com argamassa de cimento e areia no traço 1:6. Foram instalados termopares tipo K nas posições indicadas nas Figuras. 3.2 e 3.3, para aferição das referidas temperaturas. Foi projetado uma estrutura de perfil tipo U de aço galvanizado, confeccionado circundando a mesma, como uma moldura de 5cm de espessura, soldada, com a parte superior móvel, contendo dobradiças. O objetivo dessa

moldura foi proporcionar uma maior rigidez da parede, impedindo que por qualquer esforço adicional, a parede venha a quebrar.

A parte **C**, foi construído somente a moldura, que chamamos de "Célula" de 5cm de espessura que terá dimensão quadrada também de 0,50m x 0,50m, local onde será colocado internamente pedaços de pneus inservíveis, que foram cortados em pedaços pequenos quadrados com volume médio aferido de 1,8cm³; 0,9cm³ e 0,45cm³, em forma de paralelepípedos com espessura da parte lateral dos pneus. A célula foi preenchida com os pedaços de pneus, somente depois de presos os termopares nas devidas paredes e presa o conjunto com parafusos de aperto. Cabe informar que foram utilizados ainda 02 duas granulometrias na denominação de pó de borracha, a G2, variando de 2,0 a 3,2mm e G3, com variação entre 0,68 e 2,0mm. Foram instalados termopares tipo K (T3, T4, T5 e T6), sendo que o T4 e T5, ficaram em contato com os pneus picados e o T3 e T6 nas superfícies das paredes no sentido, de dentro da câmara para fora da mesma, ou seja, da fonte quente para a fonte fria, onde através do *Datalogger* foram aferidas as referidas temperaturas nesses pontos.

A parte **D** foi construída de maneira similar à parte **B**.

Em todas as partes laterais da bancada (B, C e D), nas suas respectivas larguras de 5,0cm, foram usadas folhas de poliestireno expandido de 1,00 cm de espessura, com o objetivo de se evitar o efeito de borda, perda de calor pelas laterais da mesma, isolando do contato com a moldura metálica.

Finalmente, foram instalados dois termopares tipo K em pontos específicos, como forma de avaliar as temperaturas seguintes: T2 na parte interna à câmara, mais precisamente nas proximidades da aferição do termostato, aproximadamente 2,0cm da lâmpada e o T7, sem ter contato com a pele de cima da câmara, para aferição da temperatura ambiental.

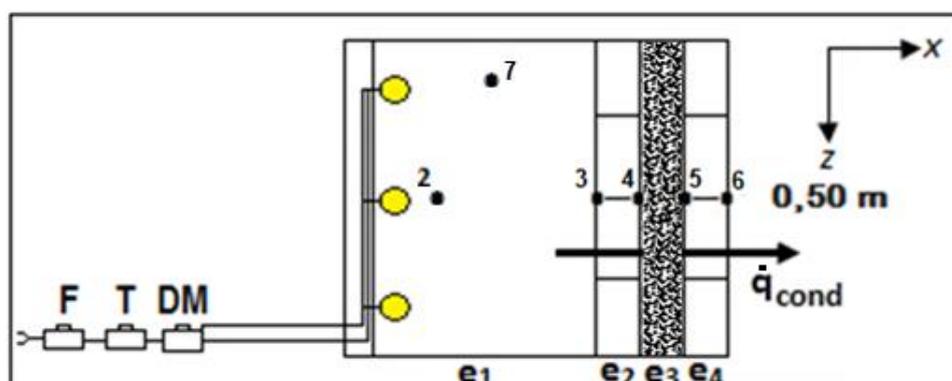


Figura 3.3 – Planta baixa e localização dos Pontos de Medição
Fonte: Autoria própria, 2019

Na Figura 3.3 acima, estão representadas as partes A, B, C, D, unidas na forma operacional da bancada vista em planta baixa.

3.2. Variáveis investigadas

Com o Experimento implantado, foram investigados os parâmetros listados abaixo:

- As temperaturas aferidas pelos termopares nos pontos considerados;
- O Coeficiente de Condutividade Térmica efetiva da parede composta e da borracha;
- O Coeficiente de Condutividade Térmica da parede convencional;
- O Consumo de Pneus para construção de uma casa de 100 m²;

3.3. Instrumentação da bancada

Para a implementação da bancada foram utilizados instrumentos e materiais que classificamos como:

3.3.1. Material Permanente

- *Dimer* Rotativo BR 5002;
- Fonte chaveada 12v,5A,60W bivolt;
- Termostato digital W1401;
- 6 Termopares tipo K;
- 1 Termômetro digital;
- 1 Sistema de aquisição de dados (*Datalogger*) de 8 pontos;
- 1 Microcomputador Intel core I7
- 5 Lâmpadas incandescente de 40W;
- 5 Soquetes para Lâmpadas incandescente de 40W;
- 20m de Cabo 2,5mm²;
- Nobreak e Extensão elétrica

3.3.2. Material de Consumo

- 30 Tijolos cerâmicos maciços de dimensões (5x10x20) cm;
- 15 Tijolos cerâmicos de 6 furos de dimensões (10x15x20) cm;
- 1 Caixa de Isopor 100 litros;
- 5 Folhas de isopor de 1,00cm de espessura
- 1 Latas de pasta térmica;
- 1 Litros de cola de Isopor;
- 4 Parafusos de 5/16 de 6”;
- 12 ml de Aço Perfil U de 2”;
- 1 Kg de solda elétrica;
- 3 dobradiças tipo tarugo
- 8 Pneus inservíveis;
- 8 Kg de pó de Pneus de granulometria (0,68 a 2,00mm)
- 8 Kg de pó de Pneus de granulometria (2,00 a 3,20mm)
- 3 L de Tinta esmalte sintético na cor preta

3.3.3. Descrição dos Instrumentos e Materiais

Abaixo temos as descrições de alguns desses componentes e materiais utilizados, com algumas fotos e a montagem final do experimento.

3.3.3.1. Modulo *Dimmer*

Características Técnicas:

Tipo:Módulo Variador de Luminosidade (*Dimmer*)

Tensão:220Vca

Potência:600W

Cor:Branco

3.3.3.2. W1401 dc 12v *display* digital termostato controlador de temperatura

Características Técnicas:

Nome do produto: Controle de Temperatura Digital Inteligente

Modelo: XH-W1401

Faixa de temperatura: – 9°C a 99°C

Temperatura de Precisão: 1°C

Controle de Precisão: 1°C

Taxa de atualização: 0,55

Tensão de Entrada: KC-12V/24V

Entrada do Instrumento: NTC (3950-10K 1%), sensor a prova d`água

Tipo de Saída: Saída de relé

3.3.3.3. Fonte Industrial VTXWG 24V 1A *View Tech*

Uma fonte que apresenta alta qualidade e tecnologia, destinada à alimentação de aparelhos que precisam de corrente contínua para funcionar. Ideal para circuitos de led, câmeras de segurança etc.

Modelo: VTXWG-25-24 1A

SKU: VTXWG2524

Características Técnicas:

Entrada: 100-220V

Saída: 24V

Corrente de saída: 1A

Frequência: 50/60Hz



Figura 3.4 – Conjunto *Dimmer*, Termostato e Fonte

3.3.3.4. Termopar tipo K

Constitui um sensor utilizado para a medição da temperatura. Ele é constituído de dois metais distintos, sendo eles Cromel (+) e Alumel (-), 20AWG, com revestimento de PVC, código de cor ANSI, condutores amarelo e vermelho, unidos por suas extremidades e revestimento externo na cor amarela. O termopar tipo K é de uso genérico, tem um baixocusto e, devido a sua popularidade estão disponíveis no mercado com muita facilidade. Abrangem uma faixa de medição de temperatura entre -200° a 1250°C , tendo uma sensibilidade de aproximadamente $41\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$. Quando há uma diferença de temperatura entre a extremidade unida e as extremidades livres, verifica-se o surgimento de uma diferença de potencial que pode ser medida através do Sistema de aquisição de dados (*Datalogger*).



Figura 3.5 – Termopar Tipo K

Características Técnicas:

Termoelemento positivo (KP): Ni90%Cr10% (Cromel)

Termoelemento negativo (KN): Ni95%Mn2%Si1%Al2% (Alumel)

Faixa de utilização: -200°C a 1250°C

F.e.m. produzida: $-6,458\text{ mV}$ a $48,838\text{ mV}$.

3.3.3.5. Termômetro de Precisão

Foi utilizado um Termômetro Digital Portátil, Tipo Vareta-10 a 200°C , Minipa MV-363-A, Prova de Água, LCD de 3 1/2 Dígitos, Resolução de $0,1^{\circ}\text{C}$ ou $0,1^{\circ}\text{F}$, Precisão

Básica de 3°C, Registro de Máximo e Mínimo. Realiza Medidas de Temperaturas na Faixa de -10°C a 200°C ou 14°F a 392°F.

Características Técnicas :

Display: LCD 16 X 8mm.

Indicação de Polaridade: Automática, Negativa (-) Indicada.

Memória: Leitura Máxima e Mínima.

Resistente a Água.

Precisão à Quartz: 0.1°C.

Descarga Eletrostática: $\pm 8\text{Kv}$.

Vareta de Aço Inoxidável: 110mm de Comprimento.

Ambiente de Operação: 0°C ~ 40°C.

Ambiente de Armazenamento: -10°C ~ 60°C, Rh 1.2V ~ 1.7V.

Faixa de Temperaturas: -10°C ~ 200°C, 14°F ~ 392°F

Resolução: $\pm 0.1^\circ\text{C}$

Dimensões do Corpo: 9 cm

Dimensões da haste: 15 cm



Figura 3.6 – Termômetro de Precisão em uso na Calibração dos Termopares

3.3.3.6. *Field Logger 512k - Interface RS485, Ethernet e USB*

O *Field Logger*, que também pode ser chamado de *Datalogger*, é um módulo de leitura e registro de variáveis analógicas, digitais e outras, com grande resolução e velocidade.

Trata-se de um equipamento de alto desempenho e alta conectividade, porém fácil de configurar e operar. Possui 8 entradas analógicas configuráveis por software para sinais de tensão, corrente, termopares, Pt100 e Pt1000.

Possui até 128 canais para o cálculo de grandezas a partir das informações medidas. Até 32 ocorrências de alarme podem ser detectadas, permitindo o acionamento de saídas, envio de e-mails ou de *traps* SNMP.

Sua interface RS485 opera com o protocolo *Modbus* RTU e pode ser configurada como mestre ou escravo, o que permite a aquisição de até 64 canais externos para registro.



Figura 3.7 – Datalogger utilizado para as medições

3.3.3.7 Lâmpadas Incandescentes

Segundo coloca Alvarez (1998), as lâmpadas incandescentes convencionais (Figura 3.8), são as que apresentam o menor rendimento luminoso (entre 12 e 17 lm/W). Além disso, são as menos duráveis, com vida média de 1.000 horas. Como vantagens podem ser consideradas a excelente reprodução de cores, o baixo custo (são as mais baratas do mercado) e a fácil manutenção, dispensando qualquer dispositivo auxiliar (reator e ignitor) para operar.

A substituição das lâmpadas incandescentes por outros modelos tem sido gradativa desde 2014, quando o Plano de Metas estabelecido em Portaria do Ministério de Minas e Energia, determinou que os modelos que não atendessem aos novos níveis mínimos de eficiência energética deveriam ser banidos do mercado. As lâmpadas incandescentes de 60W puderam ser produzidas e importadas até junho de 2014 e vendidas até junho de 2015. Os modelos de 200W, 150W, 100W e 75W deixaram de ser comercializadas em 2015 e as últimas a deixarem o mercado são as de 40W e 25W. As incandescentes ainda representam 20% das

vendas de lâmpadas do País, em razão do seu preço atraente, em média 5 vezes menor que uma fluorescente. Por outro lado, ela se caracteriza por converter a energia em luz e calor, o que faz com que consuma mais (NAVAJAS, 2016).

Brunner *et al.* (2010) coloca que a eficiência destas lâmpadas é em torno de 10 a 20 lm/W, dependendo da sua construção e temperatura de operação (DOE, 2012). A vida útil de uma lâmpada incandescente é em torno de 1.000 horas (OSRAM, 2009; SIMPSON, 2008). As lâmpadas incandescentes são consideradas fontes ineficientes de luz, pois 90% da energia de entrada é perdida como saída quente.

Um outro estudo, tendo como título: “Uma luz no debate ambiental: a era das lâmpadas incandescentes está chegando ao fim, e as novas tecnologias que estão despontando prometem reduzir a conta de luz e o impacto no meio ambiente”, afirma que lâmpadas incandescentes são lâmpadas que convertem apenas 5% da eletricidade consumida em luz, ou seja, de sua potência elétrica, sendo que o restante é eliminado em forma de calor. Dos 95% restantes 80% se dissipa na forma de radiação, e os outros 15% em convecção (FERRARI, 2012).

Valores próximos a estes foram obtidos em trabalho experimental com resultados apresentados na 63ª Reunião Anual da SBPC por Pinheiro *et al.* 2011, realizado na UFGO em Goiânia, que com o objetivo de medir a quantidade de carga térmica emitida por lâmpada incandescente para o ambiente, comprovou que 92% da energia elétrica consumida é transformada em calor.

Segundo os estudos realizados e citados nas referências acima, pudemos elaborar a Tabela 3.1 abaixo, com um resumo da eficiência de lâmpadas incandescentes e sua respectiva média aritmética para valores em percentuais da energia elétrica passada para o ambiente em forma de calor e luz. Valor da potência em forma de calor, utilizado para nossos cálculos efetuados em todas as paredes que foram utilizadas para obtenção das condutividades térmicas no referido experimento.

Tabela 3.1 – Eficiência de Lâmpadas Incandescentes

Referência	Calor (%)	Luz (%)
Brunner <i>et al.</i> 2010	90	10
Ferrari, 2012	95	5
Pinheiro <i>et al.</i> , 2011	92	8
Média	92,33	7,67

Fonte: adaptada pelo autor



Figura 3.8 – Lâmpada Incandescente de 40W

3.3.3.8. Tijolos Cerâmicos Maciço e Furados

O tijolo mais comum utilizado que remete suas origens a muitos séculos no decorrer na nossa história que em suas origens com os primeiros tijolos maciços era moldado e seco somente ao sol não sendo queimado que até hoje ainda são utilizados os conhecidos como “tijolo de sol”. Para quase tudo temos Normas que padronizam métodos e características de materiais, sistemas de gestão, equipamentos etc. Para o tijolo maciço temos as ABNT: NBR 7170, NBR 8041 e NBR 6460 que respectivamente dita sobre a Especificação, Padronização e o Método de Ensaio.

O tijolo maciço é fabricado com argila, conformado por extrusão ou prensagem, queimado à temperatura que permita que o produto atenda às condições determinadas pela NBR 7170. Ele é classificado em comum e especial, sendo o comum classificados em A, B e C de acordo com a resistência a compressão, e os especiais podem ser fabricados com formato e especificações diversas desde que aceite pelo fabricante e consumidor. A NBR 7170 recomenda as que as dimensões nominais sejam: Comprimento = 190mm; Largura = 90mm; Altura = 57 ou 90mm. Para Aceitação das peças deve ser feita uma observação se atende as características visuais como uniformidade da cor, se não há fissuras aparente, quebras, irregularidades da forma etc., analisado o certificado de ensaio do fabricante e coletado amostras para posterior ensaios a compressão.

O tijolo maciço que atenda as características definidas na NBR 7170, que é comercializado na capital de São Luís, está representado na Figura 3.9, abaixo ele suporta não

só seu peso próprio, mas também recebe cargas de acordo com os limites de cada categoria do produto e necessidades de cada projeto. É muito usado para alvenaria de embasamento cumprindo muito bem sua função quando se trata de embasamento para alvenaria toda com tijolos maciços, alvenarias de vedação ou estrutural desde que para pequenos carregamentos já que sua resistência é bem limitada em se tratando de alvenaria estrutural.



Figura 3.9 – Tijolo Maciço (0,05x0,10x0,20) m

O Tijolo furado, também chamado de “Tijolo Baiano”, possui na parte externa uma série de rachaduras para facilitar a aderência da argamassa de revestimento e seu interior tem pequenos canais prismáticos ou redondos, como se diz popularmente, “furos”. Em geral se encontra os de 6 furos e de 8 furos, mas há uma grande variedade de tijolos furados. Suas vantagens são a rapidez na execução, baixo peso e preço acessível. O tijolo utilizado no experimento foi o de 6 furos, conforme Figura 3.10, abaixo.



Figura 3.10 – Tijolo Furado (0,10x0,15x0,20) m

3.3.3.9 Perfil tipo U, Parafuso-Barra Roscada, Tarugos, Soldas e Tinta

Outros elementos foram utilizados na construção da bancada experimental, dentre eles: Perfil U em Aço Galvanizado (Figura 3.11) utilizado para fazer a moldura das paredes de testes de tijolos maciço e furado, nas dimensões de 0,05m e 0,10m, respectivamente. Barra Roscada, tipo parafusos com porca e arruelas (Figura 3.12), para a fixação e união das paredes. Dobradiças, tipo Tarugo (Figura 3.13), utilizada para movimentar a parte de fechamento das molduras metálicas das paredes. Eletrodos de solda elétrica (Figura 3.14) usadas para soldagens das partes metálicas e Tinta Esmalte Sintético na cor preta ante ferrugem (Figura 3.15) para pintura de proteção das partes metálicas da bancada.



Figura 3.11 – Perfil em U de Aço Galvanizado



Figura 3.12 – Barra Roscada-Tipo Parafuso



Figura 3.13 – Dobradiça -Tarugo



Figura 3.14 – Eletrodo Elétrico –Solda



Figura 3.15 – Tinta Esmalte Sintético

3.3.3.10 Pneus Inservíveis: Grãos e em Pó

Foram utilizados Pneus inservíveis cortados manualmente em várias granulometrias diferentes, para atender os objetivos do experimento. Inicialmente os grãos foram cortados numa granulometria média de 25,7 mm, em seguida eles foram cortados para a granulometria média de 12,8 mm e por fim os últimos cortes foram feitos com granulometria média de 6,4 mm, conforme ilustrado na Figura 3.16.



Figura 3.16 – Grãos de Pneus Cortados

Para complementar as medições experimentais das paredes com borracha de Pneus, foram utilizados fragmentos de pneus na condição de pó de borracha, nesse caso, sem condições de ser cortados manualmente, dessa forma houve a necessidade de ser adquirido na UTEP do Brasil de Guarulhos-SP, que é uma empresa que atua na coleta, trituração, reciclagem e destinação ambientalmente correta de resíduos de borracha e pneus e oferece uma ampla linha de produtos, entre eles a linha de Granulado de Borracha. Os pneus usados são transformados em Granulado de Borracha e tem uma elevada gama de aplicações nos mais variados tipos de indústrias, contribuindo assim para a melhoria da qualidade do ambiente. O Granulado de Borracha pode ser usada na composição do asfalto de rodovias e ferrovias, quadras esportivas, nos setores da Construção Civil, Composição de Biomassa, Indústria Calçadista, Autopeças, entre outros.

Contando com tecnologia e equipamentos italianos de última geração, a borracha dos pneus é coletada e através de um processo industrial passa por uma etapa de classificação, onde primeiramente lhe é retirada toda a impureza que vem da própria coleta, como arame, nylon e outros afins, deixando a borracha pronta para a segunda etapa, onde ela é moída e

triturada a partir da trituração e moagem, em medidas que vão de 0,60 mm a 100,00 mm, chegando ao seu resultado final com uma granulometria entre 2mm à 3mm. Para o nosso experimento utilizamos o pó de pneus em duas granulometrias o grânulo denominado de G2 e o G3, conforme Figuras 3.17 e 3.18, abaixo.

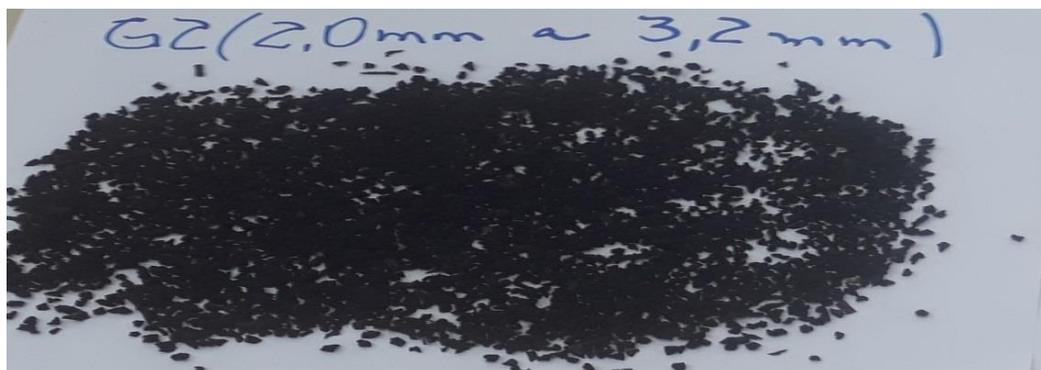


Figura 3.17 – G2 – Granulado de Pneu de Borracha, espessura de 2mm a 3,2 mm.



Figura 3.18 – G3 – Granulado de Pneu de Borracha, espessura de 0,68mm a 2mm.

3.3.3.11 Paquímetro, Poliestireno Expandido e Balança Digital

Fizemos uso de mais alguns instrumentos e materiais que foram muito importantes na construção da bancada e obtenção dos resultados experimentais, são eles: Paquímetro para aferição das dimensões dos grãos de borracha de pneus (Figura 3.19), conforme indicado na composição das paredes P1, P2 e P3. Poliestireno expandido cortado em tiras (Figura 3.20) muito útil para isolar as bordas das paredes ensaiadas e uma Balança Digital (Figura 3.21) utilizada para aferição da massa dos grãos de pneus.

Características principais do Paquímetro Analógico, 200 Mm – 8” Nove54

- Capacidade do paquímetro: 0 – 200 mm/ 0 – 8”
- Graduação: 0,05 mm – 1/128”
- Exatidão do paquímetro: +/- 0,05 mm
- Material das faces de medição do paquímetro: aço carbono
- Material do corpo do paquímetro: aço carbono
- Altura do bico do paquímetro: 50,0 mm



Figura 3.19 – Paquímetro Universal Analógico

O poliestireno é um homopolímero resultante da polimerização do monômero de estireno. Trata-se de uma resina do grupo dos termoplásticos, cuja característica reside na sua fácil flexibilidade ou moldabilidade, sob a ação do calor, que a deixa em forma líquida ou pastosa. Seu uso é muito comum em construções e nas Embalagens. As aplicações do isopor na construção civil são extraordinariamente variadas, salientando que o isopor, além de ser um excelente material de isolamento térmico. O baixo peso do isopor facilita sua aplicação em enchimento de lajes em obra de engenharia.



Figura 3.20 – Tiras de Poliestireno Expandido

A Balança Digital, foi utilizada com um único objetivo de aferir a massa necessária dos grãos de pneus usadas na parede da bancada de $0,25\text{m}^2$. As principais características da balança estão especificadas abaixo:

Capacidade: 7 ou 10 kg

Sistema de alta precisão de calibragem: sistema de tara

Função para pesar em gramas (g)

Pesagem de 1 em 1 grama

Visor de cristal líquido LCD

Alimentação: 2 pilhas AA

Largura: 16 cm

Altura: 3,4 cm

Comprimento: 24 cm

Diâmetro do prato: 14cm

Peso: 200g



Figura 3.21 – Balança com avaliação da Massa dos Grãos de Pneus

Finalmente, apresentamos uma sequência de figuras que mostra desde a construção da bancada experimental no prédio do NUTENGE- Prédio do Núcleo Tecnológico de Engenharia Mecânica da UEMA, até o processo de coleta de dados no LABFIS-Laboratório de Física também da UEMA, Figuras 3.22 a 3.27.



Figura 3.22 – Parede dupla de alvenaria-NUTENGE



Figura 3.23 – Vista geral da Montagem da Banca



Figura 3.24– Ligações Iniciais dos Termopares



Figura 3.25 – Vista com os pneus picados e termopares instalados

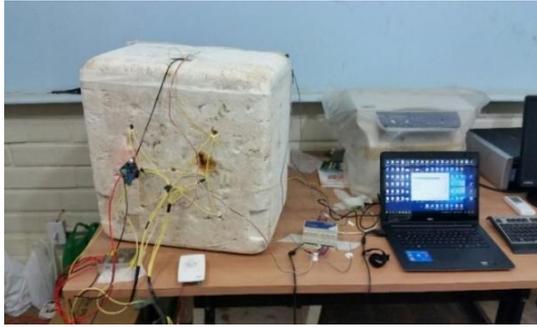


Figura 3.26 – Experimento em andamento



Figura 3.27 – Coleta de dados

3.4 Descrição das paredes de teste

Para melhor compreensão do detalhamento das paredes investigadas, foram realizados, desenhos esquemáticos com a identificação, descrição e ilustração das referidas paredes. Foram analisadas 05 paredes, nas configurações de Paredes composta triplas e 01 na configuração de parede Simples, conforme detalhado nas Figuras de 3.28 a 3.33.

DESENHO ESQUEMÁTICO DAS PAREDES

Identificação/descrição	Ilustração
<p align="center">PAREDE 01</p> <p>Parede mista de tijolos maciços, assentados na dimensão de 5,0 cm, com borracha (Grão – 25,7 mm).</p> <p>① Dimensões aproximadas: 5,00x10,00x20,00 cm</p> <p>② Espessura da argamassa de assentamento: 1,00cm</p> <p>③ Espessura da borracha: 5,00 cm</p> <p> Espessura total da parede: 15,00cm</p> <p>④ Cor natural</p>	

Figura 3.28 – Configuração da Parede 01

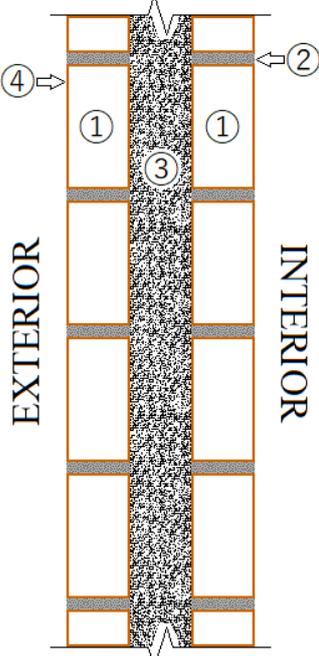
Identificação/descrição	Ilustração
PAREDE 02	
<p>Parede mista de tijolos maciços, assentados na dimensão de 5,0 cm, com borracha (Grão – 12,8 mm).</p> <p>① Dimensões aproximadas: 5,00x10,00x20,00 cm</p> <p>② Espessura da argamassa de assentamento: 1,00cm</p> <p>③ Espessura da borracha: 5,00 cm</p> <p> Espessura total da parede: 15,00cm</p> <p>④ Cor natural</p>	

Figura 3.29 – Configuração da Parede 02

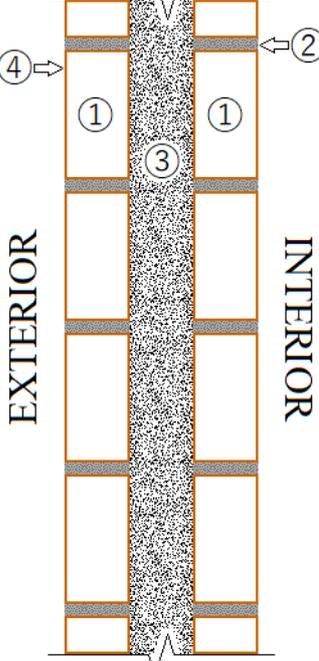
Identificação/descrição	Ilustração
PAREDE 03	
<p>Parede mista de tijolos maciços, assentados na dimensão de 5,0 cm, com borracha (Grão – 6,4 mm).</p> <p>① Dimensões aproximadas: 5,00x10,00x20,00 cm</p> <p>② Espessura da argamassa de assentamento: 1,00cm</p> <p>③ Espessura da borracha: 5,00 cm</p> <p> Espessura total da parede: 15,00cm</p> <p>④ Cor natural</p>	

Figura 3.30 – Configuração da Parede 03

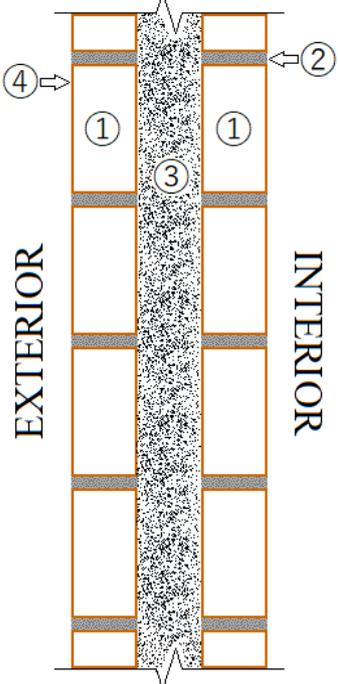
Identificação/descrição	Ilustração
<p align="center">PAREDE 04</p> <p>Parede mista de tijolos maciços, assentados na dimensão de 5,0 cm, com borracha (Grão G2–2,00 a3,20 mm).</p> <p>① Dimensões aproximadas: 5,00x10,00x20,00 cm</p> <p>② Espessura da argamassa de assentamento: 1,00cm</p> <p>③ Espessura da borracha: 5,00 cm</p> <p> Espessura total da parede: 15,00cm</p> <p>④ Cor natural</p>	

Figura 3.31 – Configuração da Parede 04

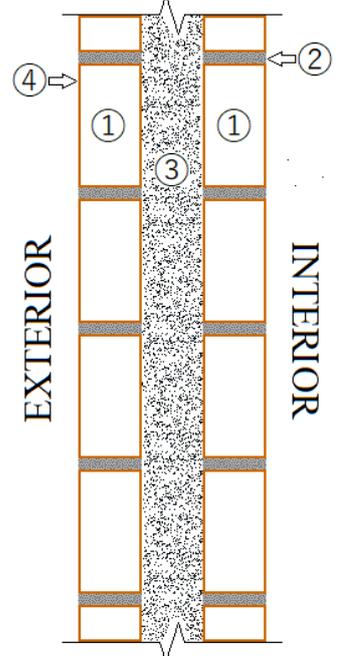
Identificação/descrição	Ilustração
<p align="center">PAREDE 05</p> <p>Parede mista de tijolos maciços, assentados na dimensão de 5,0 cm, com borracha (Grão G3–0,68 a2,00 mm).</p> <p>① Dimensões aproximadas: 5,00x10,00x20,00 cm</p> <p>② Espessura da argamassa de assentamento: 1,00cm</p> <p>③ Espessura da borracha: 5,00 cm</p> <p> Espessura total da parede: 15,00cm</p> <p>④ Cor natural</p>	

Figura 3.32 – Configuração da Parede 05

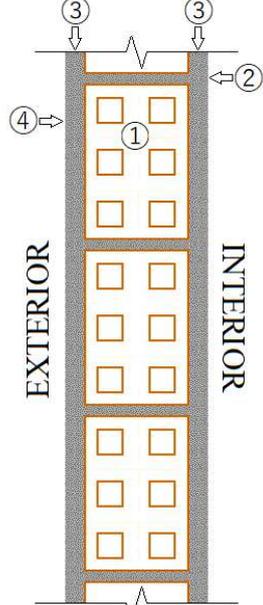
Identificação/descrição	Ilustração
<p align="center">PAREDE 06</p> <p>Parede simples com tijolos 6 furos assentados na dimensão de 10,0 cm, revestida com argamassa externa e internamente.</p> <p>① Dimensões aproximadas: 10,00x15,00x20,00 cm</p> <p>② Tijolo de 6 furos</p> <p>③ Espessura da argamassa de assentamento: 1,00cm</p> <p>④ Espessura da argamassa de revestimento: 2,50 cm</p> <p align="center">Espessura total da parede: 15,00cm</p> <p>⑤ Cor natural</p>	

Figura 3.33 – Configuração da Parede 06

3.5 Materiais de construção utilizados

Os materiais utilizados na construção das paredes, são materiais de uso comum nas construções no município de São Luís do Maranhão, disponíveis no comércio local. Todos os materiais foram ensaiados no Laboratório de Solos e Concreto do SENAI-Ma, situado a BR-135, Km-05, Tibiri em São Luís-Ma. Abaixo listamos cada um com seus respectivos resultados, que julgamos serem importantes no comportamento térmicos das paredes componentes do experimento.

3.5.1 Cimento

O cimento utilizado na construção das paredes foi o CP-II- F-32, Cimento Portland composto com fíler, suas características são preconizadas pela norma NBR 11578/1991(Tabela-3.2).

Tabela 3.2 - Exigências do cimento Portland CP-II-F-32.

Características e propriedades		Unidade	Cimento CP-II-F-32
Finura	Resíduo na peneira 75 μ m	%	$\leq 12,00$
	Área específica	m ² /kg	≥ 260
Tempo de início de pega		h	≥ 1
Expansibilidade a quente		mm	≤ 5
Resistência à compressão	3 dias de idade	MPa	≥ 10
	7 dias de idade	MPa	≥ 20
	28 dias de idade	MPa	≥ 32

Fonte: Adaptado da Tabela 3 da NBR 11578/1991.

3.5.2 Areia

Os ensaios para caracterização da areia foram realizados no Laboratório de Solos do SENAI, os mesmos visam o conhecimento de quais são as parcelas constituídas de grãos de cada diâmetro, expressas em função da granulometria, as massas do material no estado solto e compactado, material pulverulento e massa específica aparente e absorção de água.

Para a determinação da massa unitária e material pulverulento, foram realizados os ensaios seguindo as normas: NBR NM 45 de 2006 – Determinação da massa unitária do volume de vazios, NBR NM 46 de 2003 – Determinação do material fino que passa na peneira 75mm, por lavagem, NBR 7211 de 2009 – Agregados para concreto-especificação e NBR NM 53 de 2003 – Determinação da massa específica e massa específica aparente.

O ensaio de composição granulométrica foi realizado de acordo com a norma NBR NM 248.

3.5.3 Bloco de 6 furos

Os blocos de 6 furos utilizados na construção da parede convencional-P6, foram adquiridos na cidade de São Luís-MA e sua caracterização foi realizada também no SENAI.

Foram realizadas, segundo as normas ABNT-NBR-15270/2017 (Componentes cerâmicos-blocos e tijolos para alvenarias), os seguintes ensaios de caracterização: Dimensões

efetivas, desvio em relação ao esquadro, planeza das faces em blocos cerâmicos, absorção de água e resistência mecânica.

3.5.4 Tijolo maciço

Os tijolos maciços utilizados na pesquisa para a fabricação das paredes P1 a P5, foram também adquiridos na praça de São Luís e ensaiados também no SENAI. Sua caracterização seguiu a mesma norma utilizadas para o tijolo cerâmico convencional de 6 furos, onde foram realizados os mesmos ensaios.

3.5.5 Argamassa de assentamento

O traço utilizado para ao assentamento foi de 1:6 (1 de cimento e 6 de areia). A espessura da argamassa de assentamento foi de 1,00 cm.

3.5.6 Chapisco

Foi aplicada chapisco em ambas as faces da parede, com objetivo de dar aderência ao revestimento. O traço utilizado para a mesmo foi de 1:3 (1 de cimento e 3 de areia).

3.5.7 Argamassa de revestimento

O traço utilizado para o revestimento foi 1:5 (1 de cimento e 5 de areia). A espessura da argamassa de revestimento foi de 2,5cm.

3.6 Avaliação das incertezas

Muitos dados de testes experimentais são frequentemente utilizados para complementar análises de engenharia como base para a credibilidade de um projeto. Nem todos os dados são igualmente bons; a validade dos dados deve ser documentada antes que os resultados do teste sejam usados no projeto. A análise de incerteza é o procedimento usado para quantificar a validade e exatidão dos dados.

Esse método consiste em especificar a incerteza de cada medida experimental primária como temperatura, comprimento, volumes etc. Chamaremos de R uma função e x_1, x_2, \dots, x_n , as variáveis independentes, obtém-se a relação:

$$R=R(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (3.1)$$

Denominando as incertezas de cada variável independente por w_1, w_2, w_3, w_n , obtém-se:

$$w_n = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.2)$$

Com base nesta explanação, foram calculadas as incertezas relativas a todas as variáveis medidas ao longo do experimento em especial: às temperaturas e volumes dos grãos de pneus.

3.6.1 Incerteza da temperatura.

Como em qualquer experimento que envolva medidas de temperaturas com termopares, é necessário que estes sejam, previamente, calibrados. A incerteza relativa à temperatura é de $\pm 0,5^0 \text{ C}$, isto é:

$$\mu T = \pm 0,5^0 \text{ C}.$$

3.6.2 Incerteza do comprimento e volumes.

Para a obtenção das medidas dos pedaços de pneus a serem inseridos na parede interna da bancada experimental, depois de várias medidas com paquímetro analógico, nas três dimensões dos fragmentos, apresentaram valores médios de $1,80\text{cm}^3, 0,90\text{cm}^3$ e $0,45\text{cm}^3$, respectivamente. Para cada caso, se fez uso de 100 amostras e colhida suas medidas e em decorrência disso, pôde-se calcular as médias relativas às medidas dos volumes dos grãos, conforme Apêndices-A1, A2 e A3. Para estabelecer uma uniformidade entre as unidades dos grãos e o pó especificado pelo fabricante em milímetros, efetuamos aproximação dos volumes dos grãos de seus diâmetros médios para $25,7\text{mm}; 12,8\text{mm}$ e $6,4\text{mm}$, respectivamente. Como o principal objetivo do trabalho experimental é a determinação da condutividade térmica nas

respectivas granulometrias de borracha, não foram investigados valores para massa específica e calores específicos dos materiais utilizados no experimento.

3.7 Procedimentos experimentais

3.7.1 Calibração dos sensores de temperaturas

Os sensores de temperatura, termopares, como qualquer outro instrumento de medida sofrem alterações de suas características ao longo do tempo, tanto por agentes externos como pelo próprio envelhecimento, os termopares podem apresentar erros de leitura devido ao desgaste em função do ambiente instalado, da oxidação e de avarias. Isto significa que o equipamento realizaria medições de valores incompatíveis com os valores reais, indicando que o instrumento necessita de uma nova calibração.

Para garantir a qualidade e a precisão necessárias para avaliação das temperaturas decidiu-se construir e calibrar os termopares antes dos ensaios laboratoriais para se conseguir uma maior precisão nos resultados obtidos, de acordo com as normas de medição de temperatura ANSI/ASHARE 41.1 – 1986. Foram confeccionados no Laboratório de Física da Universidade Estadual do Maranhão-UEMA, tendo a união dos dois fios (Cromel e Alumel) - tipo K, sido obtido por fusão em banho de mercúrio para garantir a sua não contaminação e, por isso a sua maior precisão ($\pm 0,1^\circ\text{C}$).

Com o propósito de garantir o nível de incerteza exigido pela norma ASHRAE, optou-se pela calibração de todos os termopares em conjunto com o sistema de aquisição de dados *Field Logger 512k* - Interface RS 485, conforme mostrado na Figura 3.6. O sistema de aquisição de dados coleta os sinais analógicos e através de uma interface que comunica com o computador, foi configurado para fornecer, a temperatura instantânea, na escala Celsius [$^\circ\text{C}$], a cada 60 segundos, a partir do início da gravação dos dados para cada um dos termopares, isto permite a avaliação dos erros sistemáticos e aleatórios associados a medição das temperaturas.

Na calibração, a escala dos termopares utilizado nos ensaios, devem coincidir como uma escala conhecida. Para a calibração foi utilizado um recipiente cilindro de poliestireno expandido, onde foram inseridos os 06 termopares e um termômetro de precisão aferido pelo Instituto de Pesquisa Tecnológica (IPT), cuja precisão é de $\pm 0,1^\circ\text{C}$. No recipiente foi colocado um banho termostaticado que garantiu uma precisão na regulação e na homogeneização da temperatura do referido banho (água destilada) de $\pm 0,1^\circ\text{C}$. A calibração foi feita com as temperaturas variando entre 5° a 50°C , gama de valores que cobre as condições de

funcionamento das paredes. Para controlar a temperatura foi utilizado um termostato elétrico e quando a temperatura desejada do termômetro padrão deixou de variar, foi inicializado o programa. Em intervalos de 30 s, os dados foram armazenados pela placa de aquisição de dados, então, quando a temperatura voltou a oscilar o programa foi finalizado e então foram extraídas todas as temperaturas de cada termopar. Para cada valor de temperatura foi feito o mesmo procedimento para se obter a curva de calibração desejada. Na Tabela 3.3 são mostrados os dados obtidos com os termopares (T) e com o termômetro de referência calibrado (TC).

Tabela 3.3 – Dados utilizados na calibração dos Termopares

Termopar	t1(°C)	t2(°C)	t3(°C)	t4(°C)	t5(°C)
TC	11,1	23,2	26,5	46,0	49,8
T2	9,0	21,8	25,5	44,6	48,2
T3	10,5	22,5	26,1	45,5	49,5
T4	9,0	21,8	26,3	44,8	48,4
T5	10,1	22,6	25,8	44,5	48,5
T6	8,7	21,4	24,4	43,3	47,3
T7	9,4	22,9	25,9	44,7	48,8

Fonte: o autor

As curvas de calibração, para cada termopar fixado ao longo da secção de teste, que representa a relação entre a temperatura padrão, medida pelo termômetro padrão e as temperaturas dos termopares, está mostrada nos Apêndices B.1 a B.6. E por regressão linear foram obtidas as suas respectivas equações de calibração que estão apresentadas na Tabela 3.4, juntamente com o coeficiente de correlação R^2 , calculado pela (Equação 3.3) de cada ajuste.

Tabela 3.4 – Equação de regressão linear dos termopares

Termopar	Equação de regressão linear	R^2
<i>T2</i>	$TC_2 = 0,9884 \cdot T_2 + 1,9004$	0,98009
<i>T3</i>	$TC_3 = 0,9927 \cdot T_3 + 0,7531$	0,99792
<i>T4</i>	$TC_4 = 0,9811 \cdot T_4 + 1,8512$	0,98255
<i>T5</i>	$TC_5 = 1,0151 \cdot T_5 + 0,5641$	0,99748
<i>T6</i>	$TC_6 = 1,0109 \cdot T_6 + 2,0700$	0,96904
<i>T7</i>	$TC_7 = 0,9945 \cdot T_7 + 1,1748$	0,99286

Fonte: o autor

$$R^2 = 1 - \left[\frac{\sum_{l=1}^L (T_{cl} - T_{el})^2}{\sum_{l=1}^L T_{el}^2 - (\sum_{l=1}^L T_{el})^2 / L} \right] \quad (3.3)$$

Onde: T_e e T_c , são as temperaturas experimentais e calculadas, respectivamente; l é a iteração dos dados de temperatura, sendo $l=1,2,3...L$.

3.7.2 Procedimentos de Instrumentação das Paredes

Antes de dar início aos ensaios, as paredes passaram pelos seguintes procedimentos de preparação:

- Depois de construídas, as paredes foram ensacadas com saco plástico, ficando assim pelo período de 28 dias com a finalidade de obter-se a cura adequada dos materiais cimentícios;
- Ao se passarem os 28 dias, o plástico foi retirado sendo que as paredes ficaram ao ar livre por mais 28 dias para que o excesso de umidade fosse retirado das mesmas;
- 28 dias depois, as paredes foram submetidas a um período de 24 horas de incidência de calor, acopladas a câmara térmica em que os ensaios seriam posteriormente realizados, para que o restante de umidade indesejada e que poderia influenciar no resultado dos ensaios, fosse retirado.

Para determinar o comportamento térmico das paredes de teste e obter as informações a que se propõe o experimento, foram instalados 06 termopares tipo K para medir as temperaturas das faces das paredes, além da temperatura da fonte luminosa e da temperatura ambiente da sala do laboratório de física. Os termopares foram fixados no centro geométrico da face interna e externa de cada parede por meio de pasta térmica, com o objetivo de se aferir exatamente a região de incidência unidirecional da radiação provocada pela lâmpada e dessa forma evitar o efeito de borda. Todos eles foram conectados ao sistema de aquisição de dados que fazia a recolha e o registro dos dados a intervalos de tempos definidos de 5 em 5 minutos.

Diferente da forma como realizado por Castro (1991), em seu trabalho numérico e experimental, na colocação dos termopares para instrumentação das paredes, não houve a necessidade de se fazer furos para fixação destes, pois os pontos de interesse, são exatamente os das faces das paredes. O posicionamento dos termopares foi alinhado segundo a direção que consideramos de “x” e fixados no ponto médio da largura, eixo “z” e altura eixo “y”. O termopar

T3 localizado na face mais próxima a incidência de radiação da lâmpada (fase quente), seguido pelo T4 a 5cm do T3 na direção de 'x', T5 a 10cm e T6 a 15cm, correspondendo a (face fria) ou face ambiente.

Na parede de configuração simples convencional P6, foram colocados os termopares T3 e T4 na mesma posição, na face mais próxima a incidência de radiação da lâmpada e os T5 e T6 na face fria, ambiental. Os esquemas de colocação dos termopares e as imagens das paredes já construídas encontram-se nas Figuras 3.34 a 3.36. É importante assegurar que os termopares nas extremidades das paredes estejam encostados nas faces destas, a fim de evitar que a medição da temperatura seja a do ar próximo a face das paredes, ao invés da temperatura das fronteiras.

DESENHO ESQUEMÁTICO DA COLOCAÇÃO DOS TERMOPARES E FOTOS REAIS

Posicionamento dos sensores	Fotos reais
	<p style="text-align: center;">PAREDE 01-25,7mm</p>
	<p style="text-align: center;">PAREDE 02-12,8mm</p>

Figura 3.34 – Inserção dos termopares e foto real das Paredes 01 e 02

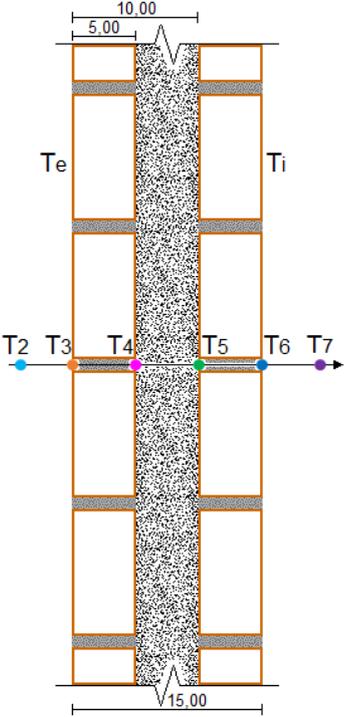
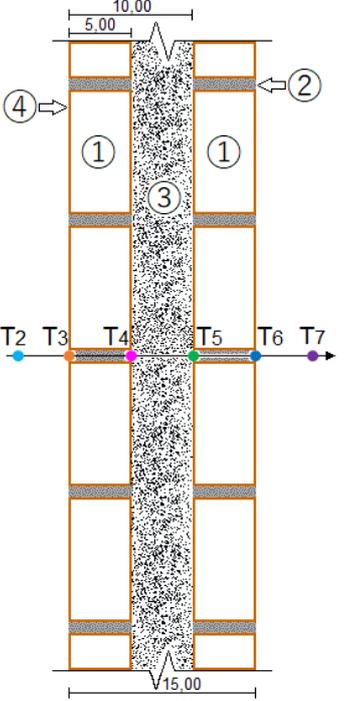
Posicionamento dos sensores	Fotos reais
 <p>Diagrama de posicionamento dos sensores para a Parede 03. O diagrama mostra uma seção transversal de uma parede com uma largura total de 10,00 unidades e uma altura de 15,00 unidades. O sensor T4 está no centro da parede, e os sensores T2, T3, T5, T6 e T7 estão distribuídos horizontalmente. As etiquetas Te e Ti indicam as faces externa e interna da parede.</p>	<p>PAREDE 03-6,2mm</p>  <p>Foto real da Parede 03, mostrando a inserção dos sensores em uma parede de 6,2mm de espessura.</p>
 <p>Diagrama de posicionamento dos sensores para a Parede 04. O diagrama mostra uma seção transversal de uma parede com uma largura total de 10,00 unidades e uma altura de 15,00 unidades. Os sensores T2, T3, T4, T5, T6 e T7 estão distribuídos horizontalmente. As etiquetas circunscritas 1, 2, 3 e 4 indicam as faces externa e interna da parede.</p>	<p>PAREDE 04-3,2mm</p>  <p>Foto real da Parede 04, mostrando a inserção dos sensores em uma parede de 3,2mm de espessura.</p>

Figura 3.35– Inserção dos termopares e foto real das Paredes 03 e 04

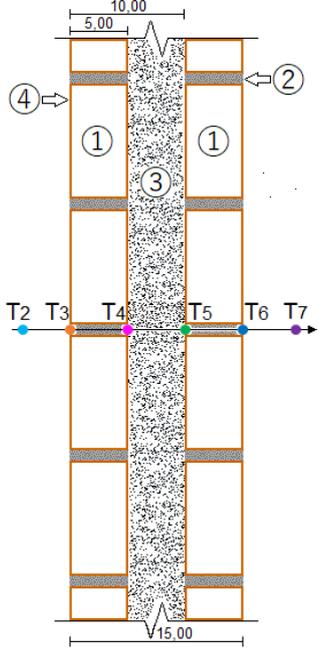
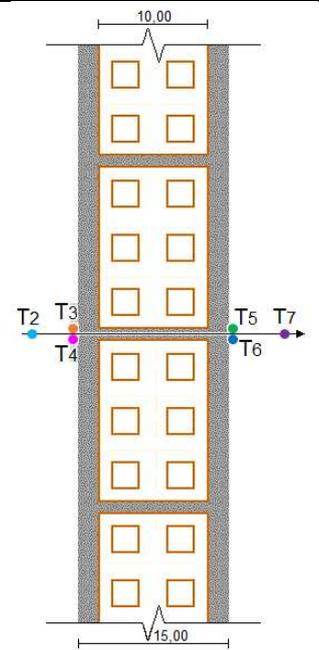
Posicionamento dos sensores	Fotos reais
	<p data-bbox="989 414 1228 448">PAREDE 05-2,0mm</p> 
	<p data-bbox="957 1153 1260 1187">PAREDE 06-Convencional</p> 

Figura 3.3.6– Inserção dos termopares e foto real das Paredes 05 e 06

3.8 Levantamento de dados

As coletas de dados, na bancada experimental, tiveram início em fevereiro de 2019, onde foram aferidos os instrumentos, calibração dos termopares e ajustes na mesma. Nessa fase inicial da coleta, se efetivou uma análise preliminar dos resultados com objetivo de avaliar sua coerência, para posterior avaliação das incertezas e análise de erros.

Para se obter as temperaturas, conforme informado anteriormente, foram utilizados 6 termopares tipo K conectados a um equipamento de aquisição de dados (*Datalogger*). Também foi utilizado um termostato como dispositivo de segurança a fim de evitar que a altas temperaturas fossem alcançadas uma vez que para temperaturas acima de 100°C poderia correr o risco da câmara se fundir e provocar incêndio. Um *dimer* também foi utilizado a fim de regular a potência dissipada pelas lâmpadas no interior da câmara termicamente isolada.

Após algumas aferições, foi observado que a potência dissipada pelas 5 lâmpadas, estava proporcionando uma temperatura superior a 100 graus Celsius, tornando-se impossível a execução do experimento, na forma que se esperava, simulando uma estufa. Após essa constatação, foram feitas diversas aferições ao longo dos dias, utilizando a potência total das 5 lâmpadas incidindo na parede com a câmara a uma distância predeterminada da parede, para que a mesma não funcionasse como uma estufa e houvesse a convecção do ar, simulando assim, uma condição mais próxima do que acontece na realidade. No entanto os resultados encontrados para a condutividade térmica da parede padrão P1 nessas condições, também se mostraram incoerentes, apresentando valores altíssimos, tanto para a parede composta, quanto para a camada de pneus.

Com o objetivo de se ter um parâmetro de comparação de quais temperaturas poderiam chegar na parede externa, foi realizada uma medição das temperaturas reais ao longo de dois dias no prédio de Física da UEMA, onde foram colocados dois termopares, um na parte externa e outra na interna, afim de aferir as temperaturas que a parede alcança ao longo do dia, conforme Figura 3.37.



Figura 3.37 – Aferição da temperatura da parede do prédio de Física da UEMA

Foram coletados ao longo dos dias 23 e 24 de maio de 2019, 576 aquisições da temperatura interna e externa da parede (10,5 cm de espessura) do prédio de Física, como mostrada na Figura 3.38.

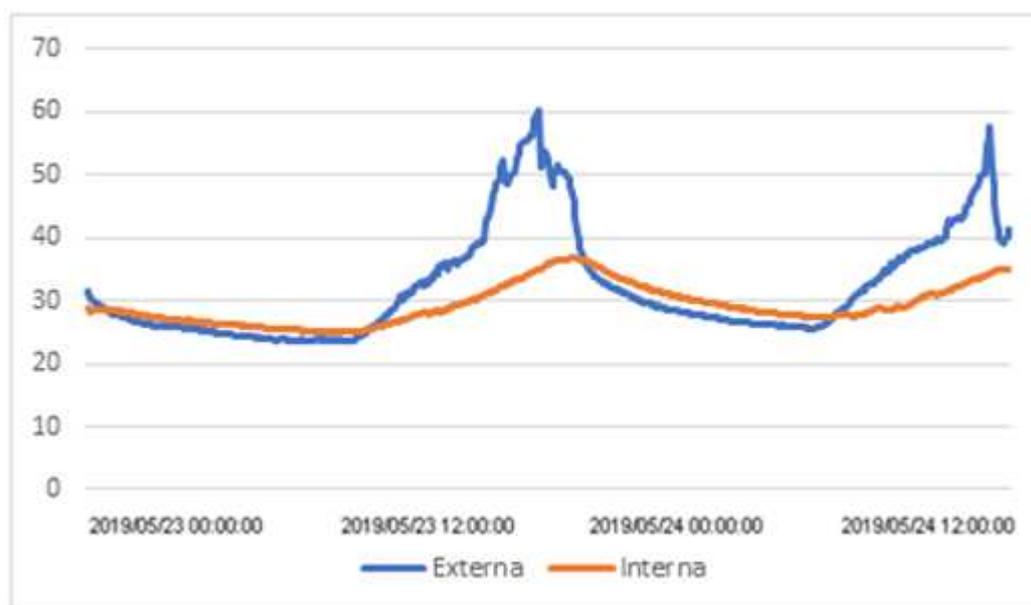


Figura 3.38 – (Parede da UEMA)-Variação da Temperatura x horas do dia.

Podemos comparar mais detalhadamente as temperaturas das paredes externas e internas do dia 23/05/2019 obtidas com o tempo em que a radiação se encontrava em maiores níveis, segundo dados do INMET.

O pico máximo de temperatura (60°C) da parede externa se deu entre as 15:00 h e 16:00 h do dia 23 de maio de 2019. Já a parede interna obteve seu pico máximo entre 16:30 h e 17:30h. Podemos observar uma espécie de atraso no valor máximo da temperatura da parede interna, em relação ao valor máximo da temperatura parede externa.

De acordo com o INMET, obtivemos a temperatura ambiente e a faixa de radiação que ocorria no mesmo horário, para o mesmo dia:

Data	Hora	Temperatura (°C)			Umidade (%)			Pto. Orvalho (°C)			Pressão (hPa)			Vento (m/s)			Radiação (kJ/m ²)	Chuva (mm)
		Inst.	Máx.	Mín.	Inst.	Máx.	Mín.	Inst.	Máx.	Mín.	Inst.	Máx.	Mín.	Vel.	Dir. (°)	Raj.		
23/05/2019	00	24.3	24.4	24.3	94	95	94	23.3	23.6	23.3	1006.9	1006.9	1006.4	1.9	292	5.6	-0.66	0.0
23/05/2019	01	23.4	24.3	23.4	92	95	91	22.1	23.3	22.0	1006.9	1007.1	1006.9	1.3	286	5.6	-1.75	0.0
23/05/2019	02	23.5	23.5	23.4	95	95	92	22.6	22.6	22.1	1006.4	1006.9	1006.4	0.6	359	4.3	-1.46	0.2
23/05/2019	03	23.0	23.4	23.0	96	96	95	22.3	22.7	22.3	1006.2	1006.5	1006.2	0.1	307	1.6	-2.00	0.0
23/05/2019	04	22.7	23.0	22.7	97	97	96	22.2	22.3	22.1	1005.8	1006.2	1005.8	0.3	292	1.2	-2.00	0.0
23/05/2019	05	22.4	23.1	22.4	97	97	97	21.9	22.5	21.9	1005.4	1005.8	1005.4	0.0	252	1.5	-2.90	0.0
23/05/2019	06	22.7	22.7	22.4	97	97	97	22.2	22.2	21.9	1005.0	1005.4	1005.0	0.4	285	1.4	-1.97	0.0
23/05/2019	07	22.8	22.8	22.6	97	97	97	22.3	22.3	22.1	1004.8	1005.0	1004.8	0.3	273	1.8	-2.75	0.0
23/05/2019	08	22.5	22.8	22.4	97	97	97	22.0	22.2	22.0	1005.0	1005.0	1004.8	0.1	259	1.5	-2.66	0.0
23/05/2019	09	22.6	22.7	22.5	97	97	97	22.2	22.3	22.0	1005.2	1005.2	1004.9	0.3	274	1.2	-0.70	0.0
23/05/2019	10	25.0	25.0	22.6	97	97	97	24.5	24.5	22.1	1005.8	1005.8	1005.2	0.6	291	1.9	167.9	0.0
23/05/2019	11	26.8	26.8	25.0	86	97	86	24.3	25.4	24.2	1006.7	1006.7	1005.8	1.2	286	3.2	1103.	0.0
23/05/2019	12	27.5	27.5	26.7	78	86	78	23.4	24.5	23.2	1007.4	1007.5	1006.7	2.4	273	5.2	1645.	0.0
23/05/2019	13	28.5	28.7	27.3	75	79	72	23.8	23.8	22.8	1007.7	1007.8	1007.4	2.1	268	5.9	2197.	0.0
23/05/2019	14	28.5	29.6	28.5	75	76	69	23.6	24.3	22.9	1007.4	1007.7	1007.4	2.1	276	6.1	2035.	0.0
23/05/2019	15	30.2	30.4	28.5	65	76	64	22.8	24.1	22.8	1006.5	1007.4	1006.5	2.4	272	5.7	2501.	0.0
23/05/2019	16	30.8	31.1	30.1	67	69	62	23.9	24.1	22.7	1005.7	1006.5	1005.7	2.0	263	6.6	2599.	0.0
23/05/2019	17	30.8	31.3	30.3	74	76	62	25.7	25.7	23.1	1004.9	1005.7	1004.9	2.4	201	5.7	2321.	0.0
23/05/2019	18	29.5	30.8	29.2	76	78	71	24.8	25.5	24.7	1004.3	1004.9	1004.3	3.3	206	7.2	1263.	0.0
23/05/2019	19	29.8	30.3	29.5	75	77	73	24.8	25.3	24.8	1004.0	1004.3	1004.0	2.6	215	6.7	1763.	0.0

Quadro 3.1– Tabela Climática INMET
Fonte: INMET, 2019.

Comparando a Figura 3.38 e o Quadro 3.1, podemos observar que o aumento da temperatura da parede teve relação direta com o aumento da radiação, tendo seu maior pico de radiação entre 15:00h e 16:00h, justamente no mesmo horário que houve a maior temperatura na parede externa do prédio da UEMA.

Essa análise, nos permitiu concluir que para obtermos temperaturas desta ordem, teríamos que diminuir a potência da fonte de radiação da bancada. Foi resolvido então, utilizar uma única lâmpada de 40 W, como fonte de irradiação e voltar a unir a câmara junto à parede de saída da estufa, inclusive para minimizar os efeitos da convecção e tratar o problema, apenas

como um processo envolvendo a condução de calor. Desta forma, o experimento se desenvolveu de junho a dezembro de 2019, sempre com coletas iniciando-se no início da tarde até as 8:00h do dia seguinte, os dados coletados para as medições das 06 configurações de paredes, variaram entre 15 a 20h de medição, até que o fluxo de calor através das mesmas se encontrasse em regime permanente, fato que ocorria a partir das 3:00 h do dia seguinte, de modo que as temperaturas adquirissem uma aparência linear, caindo da face interna para a face externa da câmara, ou seja, da face quente para face fria, importante frisar que na condição de regime permanente, a sala do laboratório sempre se encontrava com o ar condicionado desligado.

4 MODELAGEM NUMÉRICA DE UMA PAREDE COMPOSTA PLANA

4.1 Modelagem matemática

Neste capítulo será apresentada a metodologia utilizada para a formulação das equações de transferência de calor e suas respectivas condições de contorno desenvolvido para o cálculo do método numérico em paredes térmicas. Existem vários métodos numéricos possíveis de serem utilizados para o caso em questão, dentre eles: o de diferenças finitas, elementos finitos e volumes finitos. O primeiro, corresponde ao mais simples dos três e de mais fácil implementação computacional, porém possui certa dificuldade e imprecisão da malha quando tratado para múltiplos corpos em contato. Enquanto os outros têm melhor adaptação ao estudo de múltiplos corpos em contato ou em descontinuidades ao longo de um corpo estudado, porém implementação computacional mais trabalhosa e complexa, sendo o método de volumes finitos, considerado por alguns autores, o melhor para o estudo de transferência de calor e escoamento de fluidos, quando se trata de análise bi e tridimensionais.

Por uma questão de simplificação, resolvemos discretizar e implementar o modelo matemático pelo MDF – Método de Diferenças Finitas.

A modelagem inicia-se a partir da equação da difusão térmica unidimensional em regime transiente para a condução do calor ao longo de uma parede sem geração interna de calor. Esta equação é uma Equação Diferencial Parcial do tipo Parabólica e, para o caso em estudo é do tipo não linear uma vez que as condições de contorno são funções da variável independente tempo, já que é admitido que a radiação solar incidente na superfície da parede externa e a temperatura ambiental diária variam ao longo das horas do dia. Em virtude dessas características, faz-se necessário o uso de um método numérico para obter a solução da equação. Assim, optou-se por usar o MDF com Esquema Explícito devido a sua simplicidade, vasta literatura disponível e representar satisfatoriamente, fenômenos de transferência de calor unidirecional.

A utilização do método se resume em trabalhar o fenômeno em um domínio discreto de pontos, cujas equações são lineares e mais simples de serem resolvidas do que se fossem trabalhadas no domínio contínuo. Dessa forma, um passo importante do método é a etapa de discretização da equação da difusão de calor para os pontos dentro do corpo da parede e nas fronteiras internas e externas da mesma. E, levando em consideração que nossa parede é

formada por mais de um material dispostos em camadas, temos que admitir cada camada como um corpo com duas fronteiras, o que torna o processo muito mais complexo e trabalhoso.

A Figura 4.1, ilustra a parede mista, que foi idealizada inicialmente composta de duas camadas externas de tijolos, uma central de borracha de pneu granulada e duas finas camadas de madeira compensada tipo “madeirit” que envolve a camada de borracha. Assim teremos 05 (cinco) camadas e 11 (onze) pontos de interesse a serem considerados para a elaboração da modelação matemática e posterior simulações.

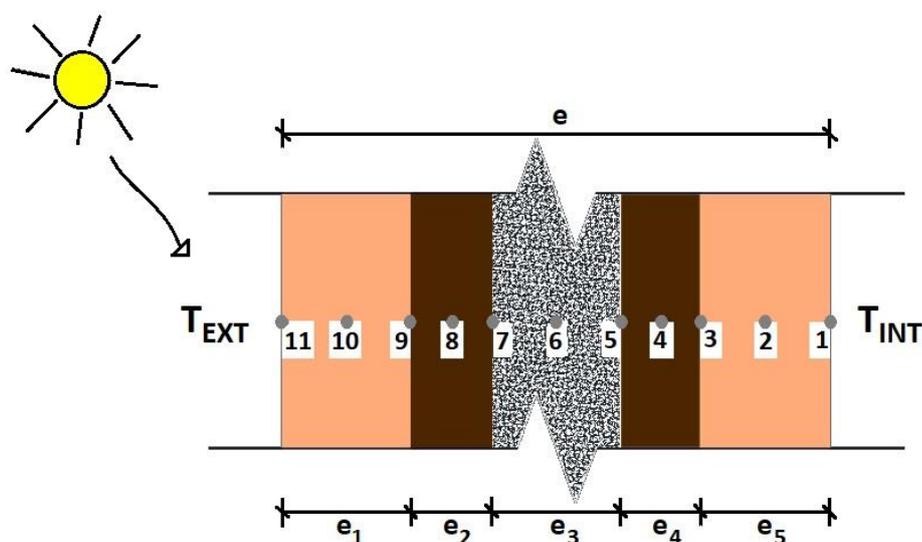


Figura 4.1 – Composição da parede composta com pontos de interesse

Convém ressaltar que, embora o algoritmo tenha sido montado para cinco camadas, foi utilizado somente três, substituindo a camada de madeira também por alvenaria nas simulações dos resultados. Para nosso estudo, foram consideradas as camadas das paredes e lajes do teto de alvenaria e concreto, como sendo homogêneas e embora a camada de borracha de pneus serem em grãos e possuir pequenos espaços de ar entre eles, foram desprezados os efeitos de convecção interna, sendo tratado o fenômeno puramente como condução. Assim de modo geral, foi considerado que:

- Cada camada constituinte dos elementos da nossa parede e teto é homogênea e isotrópica;
- As propriedades térmicas dos materiais que os constituem não variam com a temperatura;
- Não há fontes de calor no interior dos elementos;

- Não há considerações nem infiltrações de humidade nos elementos;
- As condições de fronteiras são simétricas.

4.2 Discretização da equação da difusão térmica

Para início do processo de discretização, precisamos enfatizar, que nossa parede térmica é composta por uma superfície plana sujeita a radiação solar incidente, convecção na superfície da parede externa e interna, condução através da parede, condução entre as fronteiras internas das paredes e condução pura entre a parede de borracha. Considerando a temperatura inicial uniforme, propriedades físicas dos materiais construtivos constantes, coeficiente de transmissão de calor convectivo, das faces internas e externas, constantes, parede sem umidade, e temperatura do ar no ambiente interno constante.

Para a obtenção da equação governante do problema, tomaremos como base a formulação de diferenças finitas (PATANKAR, 1980).

Pela definição de derivada:

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \frac{f(x + \Delta x) - f(x)}{\Delta x} \quad (4.1)$$

Primeira derivada pela série de Taylor truncada ($x + \Delta x$ em torno de x).

$$T(x + \Delta x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} \frac{\partial^n T(x)}{\partial x^n} \Delta x^n \quad (4.2)$$

Primeira derivada truncada em $n=1$:

$$T(x + \Delta x) = T(x) + \frac{\partial T(x)}{\partial x} \Delta x \quad (4.3)$$

Reorganizando a equação:

$$\frac{\partial T(x)}{\partial x} = \frac{T(x + \Delta x) - T(x)}{\Delta x} \quad (4.4)$$

Assim obtendo uma equação semelhante a definição de derivada (4.1).

Fazendo a derivada segunda para o ponto m :

$$\frac{\partial^2 T(x)}{\partial x^2}_m = \frac{\frac{\partial T(x)}{\Delta x}_{m+1/2} - \frac{\partial T(x)}{\Delta x}_{m-1/2}}{\Delta x} \quad (4.5)$$

Sendo:

$$\frac{\partial T(x)}{\Delta x}_{m+1/2} = \frac{T_m - T_{m-1}}{\Delta x}; \quad \frac{\partial T(x)}{\Delta x}_{m-1/2} = \frac{T_{m+1} - T_m}{\Delta x} \quad (4.6)$$

Substituindo a equação (6) na equação (5), temos:

$$\frac{\partial^2 T(x)}{\partial x^2}_m = \frac{\frac{T_m - T_{m-1}}{\Delta x} - \frac{T_{m+1} - T_m}{\Delta x}}{\Delta x} \quad (4.7)$$

Obtendo assim então:

$$\frac{\partial^2 T(x)}{\partial x^2} = \frac{T_{m-1} - 2T_m + T_{m+1}}{\Delta x^2} \quad (4.8)$$

Para o caso envolvendo condução do calor em regime transiente, que resulta da equação da energia (primeira lei da termodinâmica) e da equação de Fourier para os termos de fluxo de calor por difusão, temos a equação governante do problema:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{e_{ger}}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.9)$$

Para o caso da condução do calor em regime transiente unidimensional em uma parede plana e sem geração de calor, temos a seguinte equação:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.10)$$

4.2.1 Discretização no interior de cada camada

A discretização para os nós interiores, sendo eles os pontos **(2;4;6;8 e 10)** da Figura 4.1 anterior, fazendo os devidos balanços de energia para o método explícito, se dá da seguinte forma, como mostrado na Figura (4.2) e Equação (4.11):

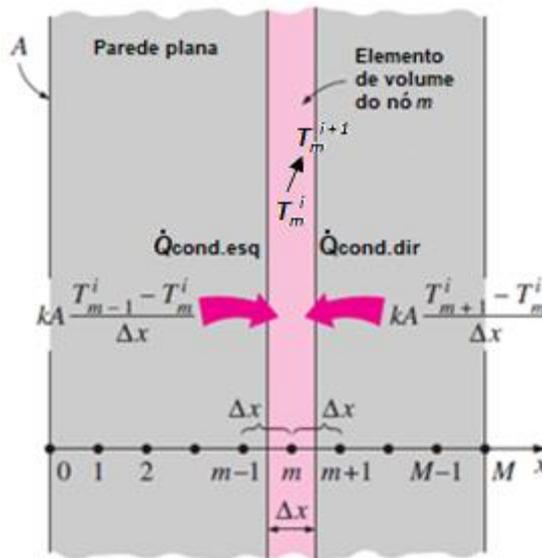


Figura 4.2 Pontos no interior da malha.
Fonte: Çengel, adaptada pelo autor.

Substituindo a equação (4.8) ou realizando o balanço de energia, obtemos a equação (4.11):

$$kA \frac{T_{m-1} - T_m}{\Delta x} + kA \frac{T_{m+1} - T_m}{\Delta x} = \rho A \Delta x C_p \frac{T_m^{i+1} - T_m^i}{\Delta t} \quad (4.11)$$

Multiplicando por $\Delta x / (kA)$, obtemos:

$$T_{m-1} - 2.T_m + T_{m+1} = \frac{\rho \cdot \Delta x^2}{k} C_p \frac{T_m^{i+1} - T_m^i}{\Delta t} \quad (4.12)$$

Para: $(\alpha = \frac{k}{\rho \cdot c_p})$, fica: $T_{m-1} - 2.T_m + T_{m+1} = \frac{\Delta x^2}{\alpha \Delta t} (T_m^{i+1} - T_m^i)$ (4.13)

Sendo $(\tau = \frac{\alpha \Delta t}{\Delta x^2})$, teremos: $T_{m-1} - 2.T_m + T_{m+1} = \frac{T_m^{i+1} - T_m^i}{\tau}$ (4.14)

Reorganizando e explicitando o termo de interesse, temos:

$$T_m^{i+1} = (T_{m-1} - 2T_m + T_{m+1})\tau + T_m^i \quad (4.15)$$

4.2.2 Discretização entre diferentes camadas

Para o problema da condução de calor entre as paredes de materiais diferente, temos os pontos (3;5;7 e 9) da Figura 4.1, onde temos que assumir para esta descontinuidade, a mudança do material de uma placa para outra e que o nó da malha está no exato ponto entre os dois corpos, como mostrado na Figura 4.3 abaixo.

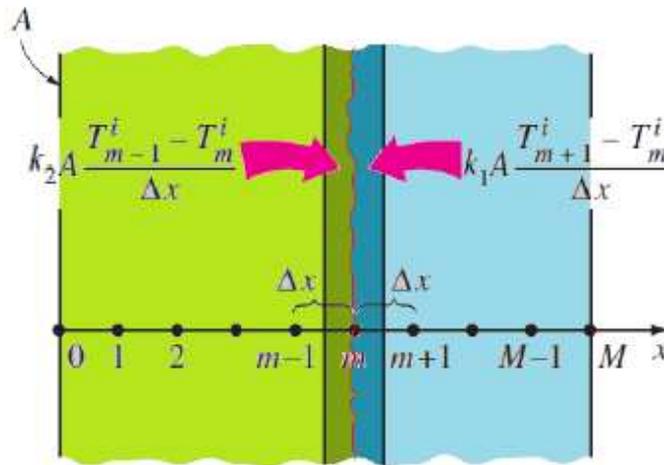


Figura 4.3 Nó entre as duas placas.
Fonte: Çengel, adaptada pelo autor.

Temos então a condução entre dois materiais diferentes k_1 e k_2 :

$$k_1 \frac{T_{m-1} - T_m}{\Delta x} + k_2 \frac{T_{m+1} - T_m}{\Delta x} = \rho_1 \frac{\Delta x}{2} C_{p1} \frac{T_m^{i+1} - T_m^i}{\Delta t} + \rho_2 \frac{\Delta x}{2} C_{p2} \frac{T_m^{i+1} - T_m^i}{\Delta t} \quad (4.16)$$

Reorganizando:

$$k_1 \frac{T_{m-1} - T_m}{\Delta x} + k_2 \frac{T_{m+1} - T_m}{\Delta x} = (\rho_1 \frac{\Delta x}{2} C_{p1} + \rho_2 \frac{\Delta x}{2} C_{p2}) \frac{T_m^{i+1} - T_m^i}{\Delta t} \quad (4.17)$$

Que isolando o termo de interesse, tem-se:

$$T_m^{i+1} = \left(k_1 \frac{T_{m-1} - T_m}{\Delta x} + k_2 \frac{T_{m+1} - T_m}{\Delta x} \right) \frac{\Delta t}{\left(\rho_1 \frac{\Delta x}{2} C_{p1} + \rho_2 \frac{\Delta x}{2} C_{p2} \right)} + T_m^i \quad (4.18)$$

4.2.3 Discretização da fronteira da face externa

Na equação discretizada para o nó **(11)** da Figura 4.1, situados no contorno da parede externa, admitimos a condição de convecção natural do ar, radiação (pela lei de Stefan-Boltzmann e radiação solar), temos que a taxa líquida de energia que atravessa a face do elemento infinitesimal e dado pela equação (4.19), onde G é a radiação global (radiação solar), α é a absorptividade, ε é a emissividade, $T_{c\acute{e}u}$ é considerada como temperatura ambiente e T_o a temperatura da superfície da parede, conforme (Çengel,2012) e observando também na figura (4.4):

$$Q = \alpha G + \varepsilon \sigma (T_{c\acute{e}u}^4 - T_o^4) + h(T_{amb} - T_o) \quad (4.19)$$

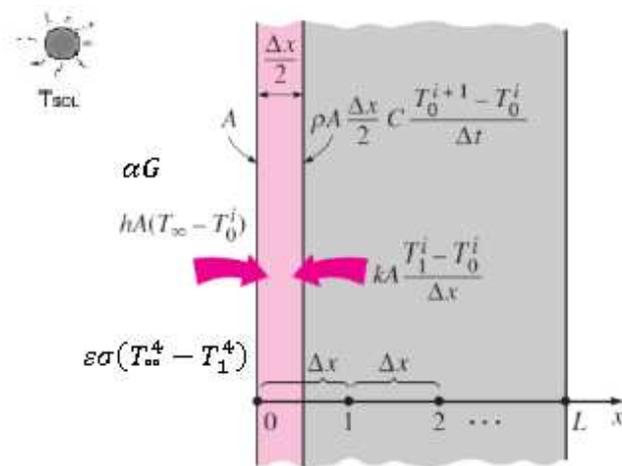


Figura 4.4 Condição do nó na fronteira externa
Fonte: Çengel, adaptado pelo autor.

Admitindo a condição de condução vindo do nó posterior junto a equação (4.19), temos:

$$\alpha G + \varepsilon \sigma (T_{\infty}^4 - T_o^4) + h(T_{\infty} - T_o) + k \left(\frac{T_1 - T_o}{\Delta x} \right) = \rho \frac{\Delta x}{2} C_p \frac{T_o^{i+1} - T_o^i}{\Delta t} \quad (4.20)$$

Isolando o termo e reorganizando a equação, temos:

$$T_1^{i+1} = \left(k \frac{(T_1 - T_0)}{\Delta x} + h(T_\infty - T_0) + \epsilon\sigma(T_\infty^4 - T_0^4) + \alpha G \right) \frac{2\Delta t}{\rho\Delta x C_p} + T_0^i \quad (4.21)$$

4.2.4 Discretização da fronteira da face interna

Finalmente, temos a equação discretizada para o ponto (1) da Figura 4.1, situados na fronteira da face interna, como mostrados na Figura 4.5, nós de contorno, assumindo que a única transferência na superfície ocorre por convecção puramente natural, conforme Eq. 4.22:

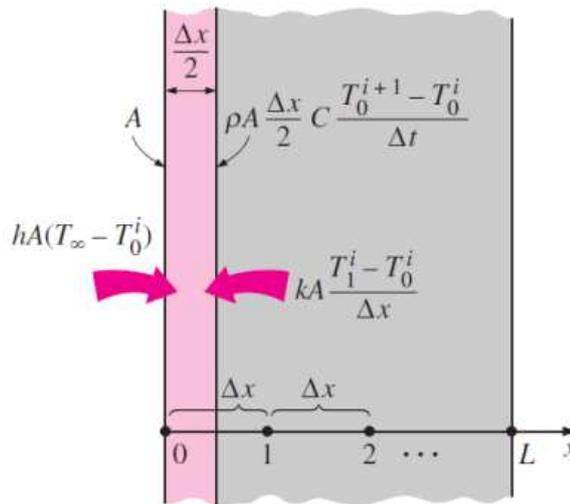


Figura 4.5 – Discretização na fronteira interna do ambiente.
Fonte: Çengel & Afshin

$$h_A (T_\infty - T_0^i) + k.A. \frac{T_1^i - T_0^i}{\Delta x} = \rho.A. \frac{\Delta x}{2} C_p \frac{T_0^{i+1} - T_0^i}{\Delta t} \quad (4.22)$$

$$\text{Multiplicando por } \left(\frac{2\Delta x}{k.A} \right) \rightarrow \frac{2h\Delta x}{k} (T_\infty - T_0^i) + 2. (T_1^i - T_0^i) = \frac{\rho.\Delta x^2}{k} C_p \frac{T_0^{i+1} - T_0^i}{\Delta t} \quad (4.23)$$

$$\text{Para: } \left(\alpha = \frac{k}{\rho.c_p} \right) \rightarrow \frac{2h\Delta x}{k} (T_\infty - T_0^i) + 2.(T_1^i - T_0^i) = \frac{\Delta x^2}{\alpha\Delta t} (T_0^{i+1} - T_0^i) \quad (4.24)$$

$$\text{Fazendo } \left(\tau = \frac{\alpha\Delta t}{\Delta x^2} \right), \text{ temos } \rightarrow \frac{2h\Delta x}{k} (T_\infty - T_0^i) + 2.(T_1^i - T_0^i) = \frac{T_0^{i+1} - T_0^i}{\tau} \quad (4.25)$$

$$\text{Organizando: } T_0^{i+1} - T_0^i = \tau \left[\frac{2h\Delta x}{k} (T_\infty - T_0^i) + 2. (T_1^i - T_0^i) \right] \quad (4.26)$$

Isolando o termo de interesse:

$$T_0^{i+1} = (T_0^i - 2 \cdot \tau \cdot T_0^i - \tau \cdot T_0^i \frac{2h\Delta x}{k}) + 2 \cdot \tau \cdot T_1^i + 2 \cdot \tau \cdot \frac{h\Delta x}{k} \cdot T_\infty^i \quad (4.27)$$

Que na forma simplificada fica:

$$T_0^{i+1} = (1 - 2 \cdot \tau - \tau \cdot \frac{2h\Delta x}{k}) \cdot T_0^i + 2 \cdot \tau \cdot T_1^i + 2 \cdot \tau \cdot \frac{h\Delta x}{k} \cdot T_\infty^i \quad (4.28)$$

4.2.5 Critério de Estabilidade

A implementação do método explícito é mais fácil e rápida de ser realizada, porém é um método instável e para sua utilização, deve-se considerar o critério de estabilidade para evitar que as soluções oscilem ou diverjam da solução real. Todas as equações de diferenças finitas foram analisadas e o procedimento para escolha do critério de estabilidade mais restritivo foi utilizado para o cálculo e ficou automatizado dentro do programa.

Uma vez determinado o número de pontos e um espaçamento uniforme entre os nós consecutivos, o passo de tempo deve satisfazer a seguinte relação (Eq. 4.29):

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x^2}{2\alpha}, \quad \text{onde } \alpha = k/\rho \cdot C_p \quad (4.29)$$

Relação esta que depende da difusividade térmica do material e do espaçamento da malha.

4.3 Solução computacional e modelo climático para São Luís

A construção da rotina computacional com a modelagem por diferenças finitas para o caso da parede exposta as condições climáticas como radiação solar e temperatura ambiente externa, apresenta complexidade pela não-linearidade ocasionada pela variação em função do tempo das condições de contorno associada à face externa da parede, devido a variação da temperatura ambiental externa e a radiação solar, devido movimento do sol, ao longo do dia e noite (DUFFIE & BECKMAN, 2013). A solução descrita na literatura para o problema consiste na utilização de sub-rotinas computacionais contendo uma função com o Modelo da ASHRAE para a temperatura externa diária, baseada nos dados meteorológicos da região e uma função com um polinômio de ajuste com os dados meteorológicos da radiação local. Tais sub-rotinas

são responsáveis por calcularem os valores dessas duas propriedades que variam ao longo do tempo e realizarem a atualização desses valores a cada passo iterativo de tempo na rotina principal com a modelagem do método numérico. Os polinômios de ajuste com os dados meteorológicos e as sub-rotinas com a temperatura diária horária e a radiação solar horária para a cidade de São Luís, foram obtidos da média anual de dados do INMET-2015, que não apresentam grandes diferenças, pelo fato de São Luís possuir baixas latitudes. Esses resultados foram obtidos em trabalho de conclusão de curso do aluno formando em Engenharia Mecânica da UEMA (CARVALHO FILHO, 2016).

4.3.1 Modelo para a Radiação Média Horária

Para a intensidade da irradiação solar horária utilizou-se o software RADIASOL2, desenvolvido pelo laboratório de energia solar (LABSOL) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), que além de contar com uma grande quantidade de informações, realiza o cálculo para intensidade da radiação solar em superfícies inclinadas, poupando tempo e sendo mais confiável ao realizar todas as operações matemáticas envolvendo trigonometria e modelos de distribuição temporal e espacial que não são o foco deste trabalho.

A radiação horária média foi calculada utilizando os dados de um ano inteiro (INMET-2015), exportados para o Excel e depois para o MATLAB onde se encontrou um polinômio de ajuste de quarto grau para correlacionar a intensidade da radiação com a hora do dia. Abaixo, mostra-se o gráfico com os dados e o polinômio de ajuste.

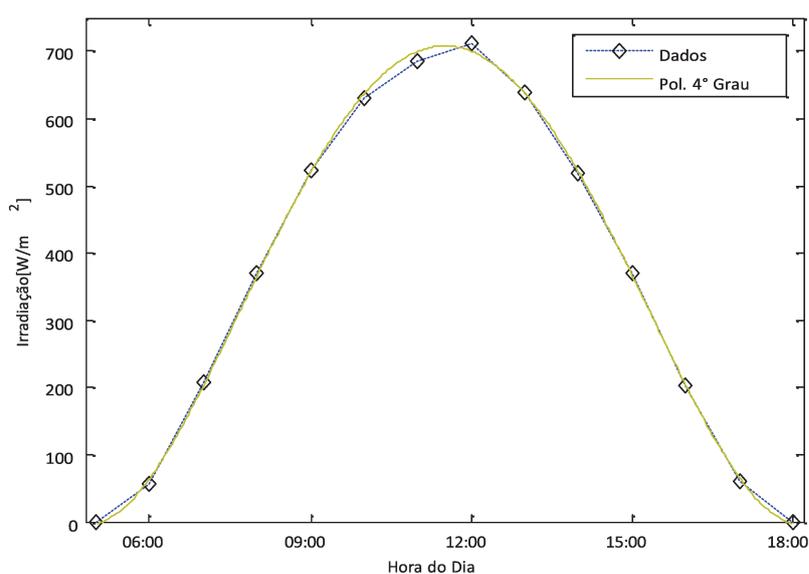


Figura 4.6 – Intensidade da Radiação Horária Média em São Luís
Fonte: Próprio autor. Dados: RADIASOL2

O polinômio de ajuste obtido é:

$$\text{Rad}(t) = \begin{cases} a.t^4 + b.t^3 + c.t^2 + d.t + e, & 5 \leq t \leq 18 \\ 0, & t \notin [5,18] \end{cases} \quad (4.30)$$

onde:

$$a = 0.36655; b = -16.872; c = -258.98; d = -1492.1; e = 2866.83;$$

4.3.2 Modelo para a Temperatura Ambiental

A parede troca calor por convecção e radiação (segundo a lei de Stefan-Boltzmann) com o ambiente externo, cuja temperatura varia ao longo das horas do dia. Assim, faz-se necessário um modelo matemático que defina como a temperatura se comporta em função da hora (t) do dia, levando-se em consideração os dados meteorológicos da localidade. Para isso, foi utilizada a Eq. 4.31, mostrada a seguir, desenvolvida pela (ASHRAE, 2013):

$$T_{\text{amb}}(t) = T_{\text{max}} - \frac{f(t)}{100} (T_{\text{max}} - T_{\text{min}}) \quad (4.31)$$

onde T_{max} e T_{min} são as temperaturas máximas e mínimas baseadas nos dados meteorológicos respectivamente e f é um fator definido pela Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Fator da equação para a temperatura diária

Hora	f	Hora	f	Hora	f
1	82	9	84	17	3
2	87	10	71	18	10
3	92	11	56	19	21
4	96	12	39	20	34
5	99	13	23	21	47
6	100	14	11	22	58
7	98	15	3	23	68
8	93	16	0	24	76

Fonte: Próprio autor. Dados: ASHRAE

Como o fator f é definido para cada hora e existe um interesse de conhecer a temperatura ao longo de todo o dia, é recomendado, segundo a literatura, a utilização de um polinômio de ajuste de nono grau para correlacionar os valores de f para cada instante do dia. O polinômio disponível na literatura (ISMAIL, 2010) é também fácil de ser encontrado utilizando o MATLAB e está definido pela expressão abaixo, cujo gráfico com os valores do fator e a curva de ajuste é mostrado na Figura 4.7.

$$f(x) = a.x^9 + b.x^8 + c.x^7 + d.x^6 + e.x^5 + f.x^4 + g.x^3 + h.x^2 + i.x + j \quad (4.32)$$

onde:

$$\begin{aligned} a &= -2.7512 \cdot 10^{-8}; & f &= 0.11633; \\ b &= 2.820910^{-6}; & g &= -0.34719; \\ c &= -0.00011422; & h &= 0.32303; \\ d &= 0.0022873; & i &= 5.0908; \\ e &= -0.023254; & j &= 81.963. \end{aligned}$$

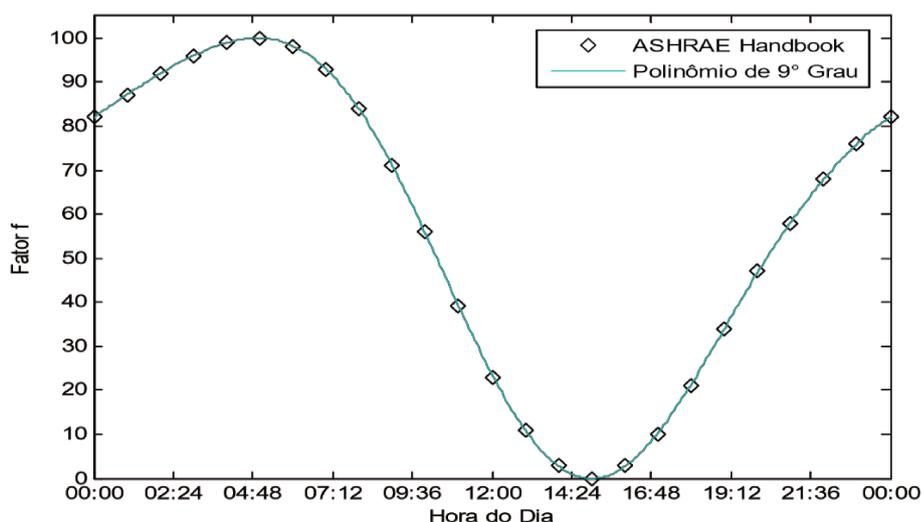


Figura 4.7 – Os valores do fator e a curva de ajuste
Fonte: Próprio autor. Dados: ASHRAE

Porém, análises realizadas durante este trabalho, levaram a concluir que este polinômio pode produzir erros ou desvios, caracterizados inclusive por uma aparente descontinuidade entre os valores de x correspondentes aos horários de 23:59 PM e 0:00 AM, quando se cria uma *function* com tal polinômio para calcular os valores de f . Isto porque os coeficientes do polinômio apresentam ordem de grandeza muito variada e distante uns dos outros, assim os arredondamentos computacionais inerentes ao próprio MATLAB conduzem a tais desvios. Uma solução ótima e simples para esse problema é fazer uma mudança de variável de x para z como é mostrado abaixo.

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma}, \text{ onde: } \mu = 12, \sigma = 7.3598 \quad (4.33)$$

Assim o polinômio fica:

$$f(x) = a.z^9 + b.z^8 + c.z^7 + d.z^6 + e.z^5 + f.z^4 + g.z^3 + h.z^2 + i.z + j \quad (4.34)$$

onde:

$a = -1.7431;$	$f = -42.724;$
$b = 1.2954;$	$g = 123.23;$
$c = 16.323;$	$h = 78.087;$
$d = 11.572;$	$i = -106.01;$
$e = -62.43;$	$j = 23.619.$

E nota-se que assim os coeficientes têm ordem de grandeza não distante uns dos outros como anteriormente. E, agora o polinômio para o fator f pode ser utilizado no modelo da ASHRAE para encontrar a temperatura horária como é mostrada no gráfico da figura 4.8.

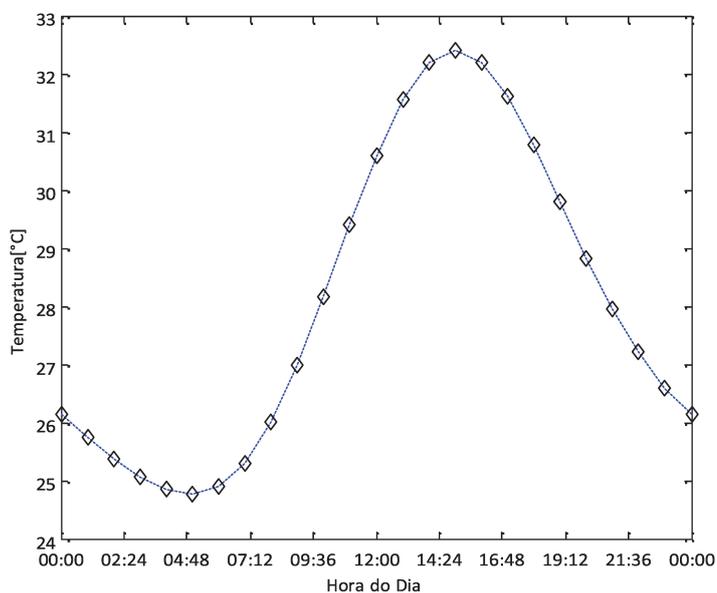


Figura 4.8 – Temperatura horária baseada no modelo da ASHRAE e dados do INMET
Fonte: Próprio autor.

Na figura acima é possível ver que a temperatura alcança seu máximo por volta das quinze horas. E, o seu mínimo se dá próximo ao amanhecer, cerca de cinco horas da manhã.

4.4 Algoritmo para simulação numérica.

Para a solução das equações de conservação, foi desenvolvido um algoritmo, levando-se em consideração a realização das seguintes etapas:

1) A partir das equações de conservação e balanço de energia nas suas formas discretizadas para cada caso, o processo iterativo tem início com estabelecido o tempo de estudo de 48 horas diárias, sendo seus dados computados, só após as primeiras 24 horas, ou seja, a partir do 2^a dia, iniciando às 0:00h e terminando às 24:00h, também foi fixado a temperatura ambiente inicial em 21° C, conforme determina as normas para que se tenha um agradável conforto térmico;

2) posteriormente, foi estabelecido o número de nós para cada camada uma das 5 camadas da parede, bem como suas espessuras, inserindo ainda as características dos materiais que são constituídos as camadas: condutividade térmica, massa específica, calor específico, absorvidade e emissividade;

3) foi considerado os efeitos da Radiação e Convecção incidentes na parede externa, condução pura entre as camadas das paredes e convecção na face da parede interna, que fazendo uso do método explícito, se inseriu: Constante de Boltzmann, difusividade térmica, coeficiente de convecção, espaçamento entre nós, passo de tempo e número adimensional de Fourier;

4) Em seguida foram introduzidas as equações discretizadas para cada nó interno e de fronteira, conforme sequência detalhada a seguir com o auxílio da Figura 4.1;

5). Várias iterações serão necessárias até o processo convergir. O algoritmo nos permite obter valores das temperaturas internas e externas das paredes e tetos, além de estabelecer relações de comportamento entre elas, no que diz respeito a variações de espessuras, condutividade térmica, massa específica, absorvidades e emissividades.

A estrutura de montagem do algoritmo, seguiu a sequência apresentada abaixo, fazendo uso também da Figura 4.1, anteriormente mostrada. As etapas estão numeradas correspondendo exatamente aos pontos de 01 a 11, da face interna para a face externa da parede. Como o algoritmo vai operar em sucessivos ciclos de iterações, o fato de o fluxo de calor ocorrer no sentido contrário, não faz a menor diferença.

- (01) - Temperatura face interna;
- (02) - Meio da 1^a camada = e_5 ;
- (03) - Fronteira entre 1^a e 2^a camada = e_5 e e_4 ;
- (04) - Meio da 2^a camada = e_4 ;

- (05) – Fronteira entre 2^a e 3^a camada = e_4 e e_3 ;
- (06) - Meio da 3^a camada = e_3 ;
- (07) – Fronteira entre 3^a e 4^a camada = e_3 e e_2 ;
- (08) - Meio da 4^a camada = e_2 ;
- (09) – Fronteira entre 4^a e 5^a camada = e_2 e e_1 ;
- (10) - Meio da 5^a camada = e_1 ;
- (11) - Temperatura face externa;

Na Figura 4.9, está demonstrado o fluxograma sintético do programa computacional, onde os dados da radiação e temperaturas entram como sub-rotinas.

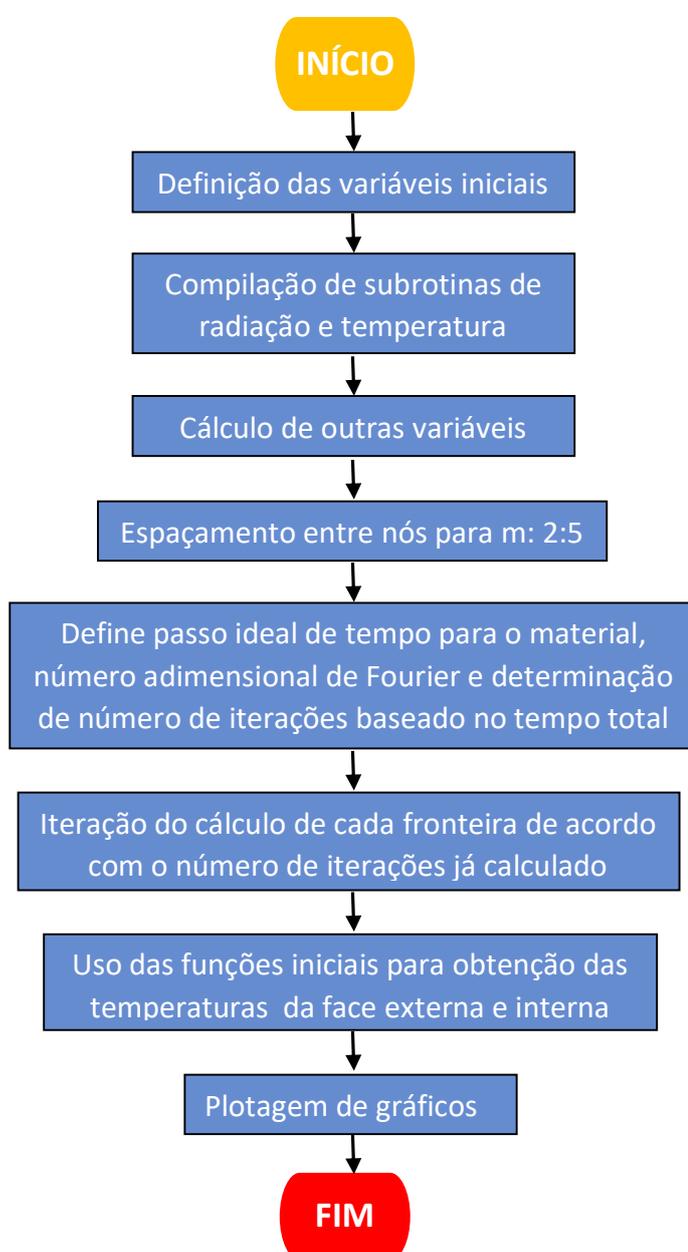


Figura 4.9 – Fluxograma sintético do programa computacional-MATLAB.

4.5 Validação do programa

As previsões numéricas do presente modelo foram validadas por comparação com os resultados de dois outros estudos numéricos que avaliam o desempenho térmico de paredes em condições semelhantes. O primeiro foi realizado por Ozel (2011), onde avaliou paredes de edifícios com cinco materiais estruturais diferentes, utilizando o método implícito de diferenças finitas sob as condições periódicas estáveis e o clima da cidade de Elazig na Turquia. A figura 4.10, mostra a comparação entre os resultados da variação da temperatura interna durante um dia da parede padrão e os obtidos por Ozel, para a parede de concreto com a mesma espessura. Como se pode ver, o comportamento é bom.

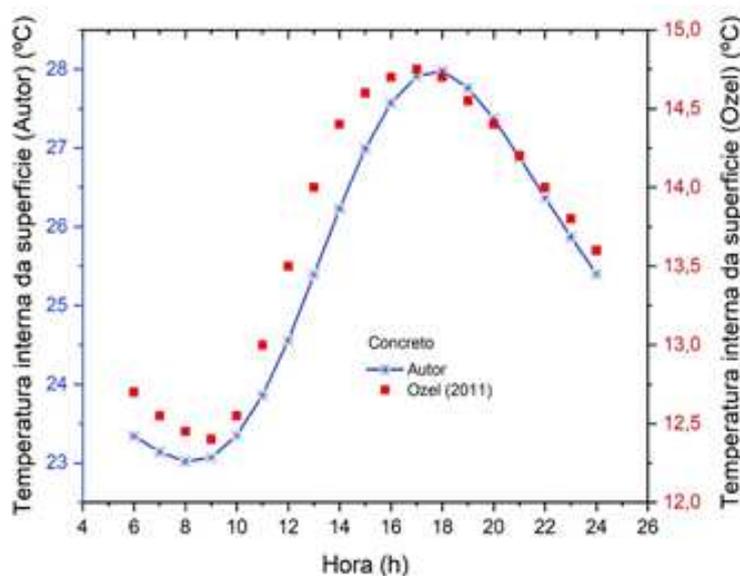


Figura 4.10 - Comparação da temperatura interna prevista com os resultados de Ozel (2011).

No segundo, Asan e Sancaktar (1998), avaliaram os efeitos da variação das propriedades termofísicas de vinte e quatro paredes compostas de diferentes materiais sobre a influência do fator de decremento e do atraso no tempo, utilizando o esquema Crank-Nicolson na resolução da equação unidirecional de condução transitória de calor. A figura 4.11 demonstra os resultados obtidos para os fatores de decremento e os atrasos no tempo de quatro materiais: madeira, alvenaria, concreto e gesso, obtidos por Asan e Sancaktar, possíveis de serem comparados com os obtidos para a nossa parede. Observa-se que, nesta comparação, também o comportamento dos valores e curvas são coerentes.

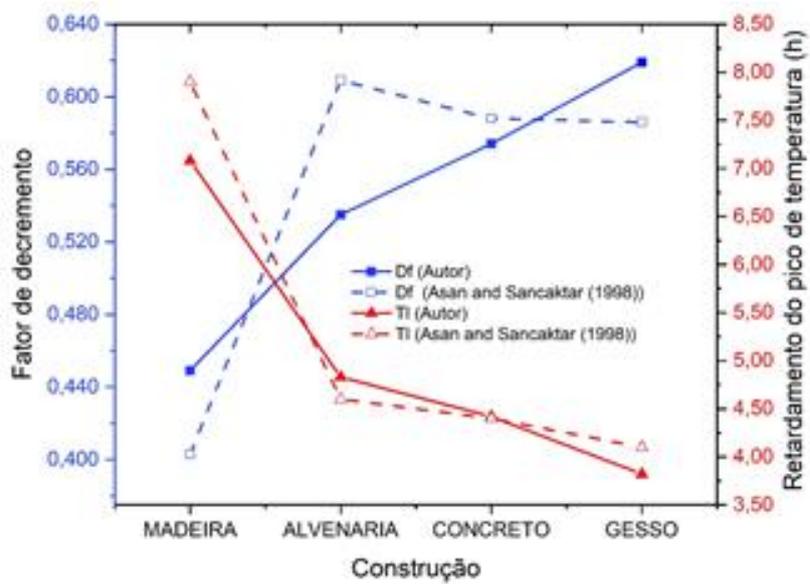


Figura 4.11 - Comparação dos fatores de decremento previstos e dos atrasos no tempo com os resultados de Asan e Sancaktar (1998).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Resultados experimentais para as paredes ensaiadas

Após a etapa de coleta de dados, procedeu-se a análise dos resultados obtidos para as 06 configurações de paredes, conforme descrito no item: 3.4 (Descrição das Paredes de Testes). Para todas a metodologia foi a mesma, sempre ocorrendo no estabelecimento do regime permanente, onde foram coletadas as temperaturas ao longo das secções transversais das paredes de forma a se obter a média aritmética das mesmas e, de posse delas, determinar a condutividade térmica efetiva, bem como a condutividade térmica da borracha de pneus, conforme o caso.

Todas as paredes ensaiadas de acordo com as dimensões da bancada, mantiveram alguns valores constantes, como por exemplo a área superficial da parede $(0,50 \times 0,50) = 0,25 \text{ m}^2$, a espessura da borracha que é $0,05 \text{ m}$ e a taxa de calor dissipada que nesse caso foi de $\frac{1}{4}$ de (1 lâmpadas incandescente de 40 W cada) = 10 W , sendo utilizada para os cálculos, somente $92,33\%$ dessa potência, admitindo para nossos cálculos, ser esse percentual correspondente ao calor que será transferido diretamente para as paredes, sem perdas de calor nas laterais da estufa da bancada, ou seja, o valor de **9,233 W**, já que $7,67\%$, corresponde à parcela de lúmen(conforme média estabelecida na descrição no item: 3.2.3.7- Lâmpadas Incandescentes).

5.1.1 Parede Padrão - P1 (G=25,7 mm)

A parede de configuração P1, foi escolhida para detalharmos o processo de obtenção dos resultados, por se tratar da configuração proposta desse trabalho como alternativa de uso em residências. As aquisições foram iniciadas no dia 25 de junho de 2019, tendo início às 12:23 h até às 07:48 h da manhã do outro dia, durando certa de 15:00 horas, sendo realizadas 233 aquisições, com intervalos de 5 minutos cada. A partir da aquisição 173, as 02:48 horas da madrugada, pode-se observar que não houve grandes alterações nos valores lidos ao longo das últimas cinco horas. Deste modo observou-se que o regime permanente havia sido atingido e pudemos coletar os valores das temperaturas para calcular a condutividade térmica efetiva da parede e da borracha de pneus.

Após o estabelecimento do regime permanente foram coletadas as temperaturas ao longo das secções transversais da parede de forma a se obter a média aritmética das 60 últimas

aquisições. Foram de $T_3=40,36^\circ\text{C}$; $T_4=36,90^\circ\text{C}$; $T_5=29,56^\circ\text{C}$ e $T_6=26,10^\circ\text{C}$, localizadas nas interfaces câmara-tijolo, tijolo-pneu, pneu-tijolo e tijolo-ambiente, listadas na ordem do lado quente para o lado frio.

Os valores das temperaturas médias obtidas nas faces das paredes, são apresentadas na Tabela 5.1, abaixo:

Tabela 5.1 – Média das temperaturas aferidas nas faces da parede P1

Termopares	T3	T4	T5	T6
Temp. Médias ($^\circ\text{C}$)	40,36	36,90	29,56	26,10

Fonte: o Autor

Conhecendo o valor da área superficial da parede de $0,25\text{ m}^2$, a espessura referente a borracha que é $0,05\text{ m}$, a diferença de temperatura $(T_4-T_5) = 7,34^\circ\text{C}$ e a taxa de calor dissipada que foi considerada de $9,233\text{ W}$, foi possível encontrar o valor do coeficiente de condutividade da borracha para a parede interna simples com borracha, calculada a partir da Eq. 5.1.

$$\dot{Q} = -k \times A \frac{dT}{dx} \quad (5.1)$$

Tal que,

$$P_{watt} = k \times A \frac{\Delta T}{E} \rightarrow k = \frac{P \times E}{A \times \Delta T} \quad (5.2)$$

onde

- k = condutividade térmica
- P = potência
- E = espessura da parede
- A = área da parede
- ΔT = variação de temperatura

Substituindo na Eq. 5.2, temos que a condutividade para a borracha de pneu encontrada é:

$$k = \frac{9,233 \times 0,05}{0,25 \times 7,34} \rightarrow k_b = 0,251\text{ W/m.K}$$

Já para a obtenção de $k_p = k_{ef}$ (condutividade térmica efetiva da parede composta), utilizaremos a Eq. 5.2 na forma de se obter, inicialmente, os k_1 e k_3 , já que $k_2 = k_b$ já calculado, para posterior obtenção da resistência equivalente conforme ilustra a Figura 5.1 abaixo:

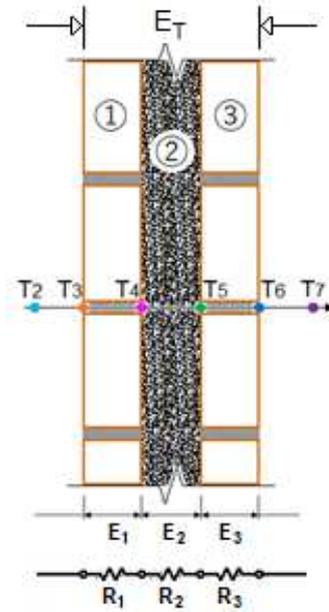


Figura 5.1 – Parede Composta de Três Camadas.
Fonte: Autoria própria, 2019.

Através da Eq. 5.3, onde $R_{eq} = \frac{E_T}{k_{ef} \cdot A}$ (5.3)

ficando $k_{ef} = \frac{E_T}{R_{eq} \cdot A}$ (5.4)

Portanto, fazendo uso da Eq. 5.2, teremos: $k_1 = \frac{9,233 \times 0,05}{0,25 \times 3,46} = \frac{0,462}{0,865} = 0,534 \text{ W/m.K}$

e, $k_3 = \frac{9,233 \times 0,05}{0,25 \times 3,467} = \frac{0,462}{0,865} = 0,534 \text{ W/m.K}$

Sabendo-se que, $R_{eq} = \frac{E_1}{k_1 A_1} + \frac{E_2}{k_2 A_2} + \frac{E_3}{k_3 A_3}$ (5.5)

Substituindo os valores para:

$$\left\{ \begin{array}{l} A_1 = A_2 = A_3 = 0,25 \text{ m}^2 \\ k_2 = k_b = 0,251 \text{ W/ m.k} \\ k_1 = 0,534 \text{ W/ m.k} \quad \text{e} \quad k_3 = 0,534 \text{ W/ m.k} \\ E_1 = E_2 = E_3 = 0,05 \text{ m} \end{array} \right.$$

$$\text{fica: } R_{eq} = \frac{0,05}{0,534 \times 0,25} + \frac{0,05}{0,251 \times 0,25} + \frac{0,05}{0,534 \times 0,25}$$

$R_{eq} = 0,375 + 0,795 + 0,375 = 1,545$ (K/W) e substituindo em Eq. 5.4, temos

$$k_{ef} = \frac{0,15}{1,545 \times 0,25} \implies k_{ef} = k_p = \mathbf{0,388 \text{ W/m.K}}$$

5.1.2 Parede Padrão – P2 (G=12,8 mm)

Para a parede de configuração P2, as aquisições foram iniciadas no dia 22 de outubro de 2019, tendo início às 17:02 h até às 07:57 h da manhã do outro dia, durando cerca de 15:00 horas, sendo realizadas 178 aquisições, com intervalos de 5 minutos cada. A partir da aquisição 119, às 02:57 horas da madrugada, pode-se observar que não houve grandes alterações nos valores lidos ao longo das últimas cinco horas. Deste modo observou-se que o regime permanente havia sido atingido e pudemos coletar os valores das temperaturas para calcular a condutividade térmica efetiva da parede e da borracha de pneus.

Após o estabelecimento do regime permanente foram coletadas as temperaturas ao longo das secções transversais da parede de forma a se obter a média aritmética das 60 últimas aquisições. Foram de T3=39,47°C; T4=36,28°C; T5=29,18°C e T6=25,35°C, localizadas nas interfaces câmara-tijolo, tijolo-pneu, pneu-tijolo e tijolo-ambiente, listadas na ordem do lado quente para o lado frio.

Os valores das temperaturas médias obtidas nas faces das paredes estão na Tabela 5.2, abaixo:

Tabela 5.2 – Média das temperaturas aferidas nas faces da parede P2

Termopares	T3	T4	T5	T6
Temp. Médias (°C)	39,47	36,28	29,18	25,35

Fonte: o Autor

Conhecendo o valor da área superficial da parede de 0,25 m², a espessura da borracha que é 0,05 m, a diferença de temperatura (T4-T5) = 7,10°C = K e a taxa de calor dissipada que foi considerada de 9,233 W, foi possível encontrar o valor do coeficiente de condutividade da borracha para a parede interna simples, calculada de forma semelhante à parede P1, fazendo uso das Eq. 5.1 e 5.2, temos que a condutividade para a borracha de pneu encontrada é:

$$k = \frac{9,233 \times 0,05}{0,25 \times 7,10} \rightarrow k_b = 0,260 \text{ W/m.K}$$

Já para a obtenção de $k_p = k_{ef}$ (condutividade térmica efetiva da parede composta), utilizaremos a Eq. 06 na forma de se obter, inicialmente, os k_1 e k_3 , já que $k_2 = k_b$ já calculado, para posterior obtenção da resistência equivalente. Semelhante ao já calculado para parede P1, e fazendo uso das Eq. 5.3;5.4 e 5.5, teremos:

$$k_1 = \frac{9,233 \times 0,05}{0,25 \times 3,19} = \frac{0,462}{0,797} = 0,578 \text{ W/m.K}$$

$$k_3 = \frac{9,233 \times 0,05}{0,25 \times 3,19} = \frac{0,462}{0,797} = 0,578 \text{ W/m.K}$$

$R_{eq} = 1,526$ (K/W) e substituindo em Eq. 5.4, temos

$$k_{ef} = \frac{0,15}{1,526 \times 0,25} \Rightarrow k_{ef} = k_p = 0,393 \text{ W/m.K}$$

5.1.3 Parede Padrão – P3 (G=6,4 mm)

Na parede P3, as aquisições tiveram início no dia 29 de outubro de 2019, tendo início às 11:40 h até às 08:00 h da manhã do outro dia, durando certa de 20:00 horas, sendo realizadas 244 aquisições, com intervalos de 5 minutos cada. A partir da aquisição 184, as 03:00 horas da madrugada, pode-se observar que não houve grandes alterações nos valores lidos ao longo das últimas cinco horas. Deste modo observou-se que o regime permanente havia sido atingido e pudemos coletar os valores das temperaturas para calcular a condutividade térmica efetiva da parede e da borracha de pneus.

Após o estabelecimento do regime permanente foram coletadas as temperaturas ao longo das secções transversais da parede de forma a se obter a média aritmética das 60 últimas aquisições. Foram de $T_3=39,12^\circ\text{C}$; $T_4=35,94^\circ\text{C}$; $T_5=29,15^\circ\text{C}$ e $T_6=25,17^\circ\text{C}$, localizadas nas interfaces câmara-tijolo, tijolo-pneu, pneu-tijolo e tijolo-ambiente, listadas na ordem do lado quente para o lado frio.

Os valores das temperaturas médias obtidas nas faces das paredes, estão apresentadas na Tabela 5.3, a seguir:

Tabela 5.3 – Média das temperaturas aferidas nas faces da parede P3

Termopares	T3	T4	T5	T6
Temp. Médias (°C)	39,12	35,94	29,15	25,17

Fonte: o Autor

Conhecendo o valor da área superficial da parede de 0,25 m², a espessura da borracha que é 0,05 m, a diferença de temperatura (T4-T5) = 6,79°C = K e a taxa de calor dissipada que foi considerada de 9,233 W, foi possível encontrar o valor do coeficiente de condutividade da borracha para a parede interna simples, calculada de forma semelhante à parede P1, fazendo uso das Eq. 5.1 e 5.2, temos que a condutividade para a borracha de pneu encontrada é:

$$k = \frac{9,233 \times 0,05}{0,25 \times 6,79} \rightarrow k_b = 0,272 \text{ W/m.K}$$

Já para a obtenção de $k_p = k_{ef}$ (condutividade térmica efetiva da parede composta), utilizaremos a Eq. 06 na forma de se obter, inicialmente, os k_1 e k_3 , já que $k_2 = k_b$ já calculado, para posterior obtenção da resistência equivalente. Semelhante ao já calculado para parede P1, e fazendo uso das Eq. 5.3;5.4 e 5.5, teremos:

$$k_1 = \frac{9,233 \times 0,05}{0,25 \times 3,18} = \frac{0,462}{0,795} = 0,580 \text{ W/m.K}$$

$$k_3 = \frac{9,233 \times 0,05}{0,25 \times 3,18} = \frac{0,462}{0,795} = 0,580 \text{ W/m.K}$$

$R_{eq} = 1,511$ (K/W) e substituindo em Eq. 5.4, temos

$$k_{ef} = \frac{0,15}{1,511 \times 0,25} \Rightarrow k_{ef} = k_p = 0,397 \text{ W/m.K}$$

5.1.4 Parede Padrão – P4 (Pó de Pneus, G=3,2mm)

Para a parede de configuração P4, contendo pó de pneus, adquirida na UTEP, as aquisições foram iniciadas no dia 28 de novembro de 2019, tendo início às 13:26 h até às 07:56 h da manhã do outro dia, durando cerca de 18:30 horas, sendo realizadas 222 aquisições, com intervalos de 5 minutos cada. A partir da aquisição 162, as 02:56 horas da madrugada, pode-se

observar que não houve grandes alterações nos valores lidos ao longo das últimas cinco horas. Deste modo observou-se que o regime permanente havia sido atingido e pudemos coletar os valores das temperaturas para calcular a condutividade térmica efetiva da parede e da borracha de pneus.

Após o estabelecimento do regime permanente foram coletadas as temperaturas ao longo das secções transversais da parede de forma a se obter a média aritmética das 60 últimas aquisições. Foram de T3=40,11°C; T4=36,48°C; T5=29,91°C e T6=26,28°C, localizadas nas interfaces câmara-tijolo, tijolo-pneu, pneu-tijolo e tijolo-ambiente, listadas na ordem do lado quente para o lado frio.

Os valores das temperaturas médias obtidas nas faces das paredes, estão apresentadas na Tabela 5.4, abaixo:

Tabela 5.4 – Média das temperaturas aferidas nas faces da parede P4

Termopares	T3	T4	T5	T6
Temp. Médias (°C)	40,11	36,48	29,91	26,28

Fonte: o Autor

Conhecendo o valor da área superficial da parede de 0,25 m², a espessura da borracha que é 0,05 m, a diferença de temperatura (T4-T5) = 6,57°C = K e a taxa de calor dissipada que foi considerada de 9,233 W, foi possível encontrar o valor do coeficiente de condutividade da borracha para a parede interna simples, calculada de forma semelhante à parede P1, fazendo uso das Eq. 5.1 e 5.2, temos que a condutividade para a borracha de pneu encontrada é:

$$k = \frac{9,233 \times 0,05}{0,25 \times 6,57} \rightarrow k_b = 0,281 \text{ W/m.K}$$

Já para a obtenção de $k_p = k_{ef}$ (condutividade térmica efetiva da parede composta), utilizaremos a Eq. 06 na forma de se obter, inicialmente, os k_1 e k_3 , já que $k_2 = k_b$ já calculado, para posterior obtenção da resistência equivalente. Semelhante ao já calculado para parede P1, e fazendo uso das Eq. 5.3;5.4 e 5.5, teremos:

$$k_1 = \frac{9,233 \times 0,05}{0,25 \times 3,63} = \frac{0,462}{0,907} = 0,509 \text{ W/m.K}$$

$$k_3 = \frac{9,233 \times 0,05}{0,25 \times 3,63} = \frac{0,462}{0,907} = 0,509 \text{ W/m.K}$$

$R_{eq} = 1,497$ (K/W) e substituindo em Eq. 5.4, temos

$$k_{ef} = \frac{0,15}{1,497 \times 0,25} \implies k_{ef} = kp = \mathbf{0,401 \text{ W/m.K}}$$

5.1.5 Parede Padrão – P5 (Pó de Pneus, G=2,0mm)

A parede de configuração P5, também com enchimento com pó de pneus, tiveram suas medições para aquisições de dados, iniciadas no dia 16 de dezembro de 2019, tendo início às 11:58 h até às 07:38 h da manhã do outro dia, durando cerca de 20:00 horas, sendo realizadas 236 aquisições, com intervalos de 5 minutos cada. A partir da aquisição 176, as 02:38 horas da madrugada, pode-se observar que não houve grandes alterações nos valores lidos ao longo das últimas cinco horas. Deste modo observou-se que o regime permanente havia sido atingido e pudemos coletar os valores das temperaturas para calcular a condutividade térmica efetiva da parede e da borracha de pneus.

Após o estabelecimento do regime permanente foram coletadas as temperaturas ao longo das secções transversais da parede de forma a se obter a média aritmética das 60 últimas aquisições. Foram de T3=38,39°C; T4=35,03°C; T5=28,78°C e T6=25,42°C, localizadas nas interfaces câmara-tijolo, tijolo-pneu, pneu-tijolo e tijolo-ambiente, listadas na ordem do lado quente para o lado frio.

Os valores das temperaturas médias obtidas nas faces das paredes, estão apresentadas na Tabela 5.5, abaixo.

Tabela 5.5 – Média das temperaturas aferidas nas faces da parede P5

Termopares	T3	T4	T5	T6
Temp. Médias (°C)	38,39	35,03	28,78	25,42

Fonte: o Autor

Conhecendo o valor da área superficial da parede de 0,25 m², a espessura da borracha que é 0,05 m, a diferença de temperatura (T4-T5) = 6,25°C = K e a taxa de calor dissipada que foi considerada de 9,233 W, foi possível encontrar o valor do coeficiente de condutividade da borracha para a parede interna simples, calculada de forma semelhante à parede P1, fazendo uso das Eq. 5.1 e 5.2, temos que a condutividade para a borracha de pneu encontrada é:

$$k = \frac{9,233 \times 0,05}{0,25 \times 6,25} \rightarrow k_b = 0,296 \text{ W/m.K}$$

Já para a obtenção de $k_p = k_{ef}$ (condutividade térmica efetiva da parede composta), utilizaremos a Eq. 06 na forma de se obter, inicialmente, os k_1 e k_3 , já que $k_2 = k_b$ já calculado, para posterior obtenção da resistência equivalente. Semelhante ao já calculado para parede P1, e fazendo uso das Eq. 5.3;5.4 e 5.5, teremos:

$$k_1 = \frac{9,233 \times 0,05}{0,25 \times 3,36} = \frac{0,462}{0,840} = 0,550 \text{ W/m.K}$$

$$k_3 = \frac{9,233 \times 0,05}{0,25 \times 3,36} = \frac{0,462}{0,840} = 0,550 \text{ W/m.K}$$

$R_{eq} = 1,404$ (K/W) e substituindo em Eq. 5.4, temos

$$k_{ef} = \frac{0,15}{1,404 \times 0,25} \Rightarrow k_{ef} = k_p = 0,427 \text{ W/m.K}$$

5.1.6 Parede Simples Rebocada – P6 (Tijolo 6 furos, E=15,0cm)

Finalmente a parede de configuração P6, por ser de tijolos furados convencionais e rebocadas, sendo a mais utilizada em nossa região em construções residenciais foi escolhida para estabelecermos comparação com nossa parede composta proposta, tendo suas aquisições iniciadas no dia 27 de novembro de 2019, tendo início às 12:00 h até às 08:00 h da manhã do outro dia, durando cerca de 20:00 horas, sendo realizadas 241 aquisições, com intervalos de 5 minutos cada. A partir da aquisição 181, as 03:00 horas da madrugada, pode-se observar que não houve grandes alterações nos valores lidos ao longo das últimas cinco horas. Deste modo observou-se que o regime permanente havia sido atingido e pudemos coletar os valores das temperaturas para calcular a condutividade térmica efetiva da parede e da borracha de pneus.

Após o estabelecimento do regime permanente foram coletadas as temperaturas ao longo das secções transversais da parede de forma a se obter a média aritmética das 60 últimas aquisições. Foram de $T_3=36,68^\circ\text{C}$; $T_4=36,85^\circ\text{C}$; $T_5=30,70^\circ\text{C}$ e $T_6=30,62^\circ\text{C}$, localizadas nesse caso T_3 e T_4 na parede exposta a radiação da lâmpada e T_5 e T_6 na face da parede voltada para o ambiente, listadas na ordem do lado quente para o lado frio.

Os valores das temperaturas médias obtidas nas faces das paredes, estão apresentadas na Tabela 5.6, abaixo.

Tabela 5.6 – Média das temperaturas aferidas nas faces da parede P6

Termopares	T3	T4	T5	T6
Temp. Médias (°C)	36,68	36,85	30,70	30,63

Fonte: o Autor

Conhecendo o valor da área superficial da parede de 0,25 m², a espessura da parede total que é 0,15 m, a diferença de temperatura (T3-T6) = 6,05°C = K e a taxa de calor dissipada que foi considerada de 9,233 W, foi possível encontrar o valor do coeficiente de condutividade da parede simples, calculada de forma semelhante à parede P1, fazendo uso das Eq. 5.1 e 5.2, temos que a condutividade para a parede de tijolos convencionais encontrada é:

$$k = \frac{9,233 \times 0,15}{0,25 \times 6,05} \rightarrow k_p = 0,916 \text{ W/m.K}$$

É importante observar que para esse caso, foi considerado a espessura do tijolo que de 10cm e a espessuras do revestimento de 2,5cm, em ambas as faces da alvenaria, formando uma parede única uniforme de espessura total de 15,00cm e que foi considerada as temperaturas aferidas nos termopares T3 e T6, por serem os mesmos que consideramos para a parede composta proposta nesse trabalho.

Para as configurações das 06 paredes foram obtidos estudos de 02 grupos de forma a analisar os comportamentos de suas condutividades térmicas. Avaliou-se no grupo 01, as paredes P1 a P5, a condutividade térmica com relação a variação da granulometria da borracha, sempre mantendo a espessura da mesma de 5,00cm e no grupo 02, a parede P6 foi avaliada apenas a configuração de parede simples rebocada mais utilizada nas construções residenciais locais, conforme mostra o Quadro 5.1 a seguir.

RESUMO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS – TRABALHO DE TESE						
TESE UBIRACI SILVA NASCIMENTO – DINTER – UNICAMP						DATA
(RESULTADOS DE MEDIÇÕES)						17/01/2020
PAREDES	DESCRIÇÃO	Ep (cm)	Eb (cm)	Kp (W/m.K)	Kb (W/m.K)	DATAS
1	VARIAÇÃO DA GRANULOMETRIA DOS PNEUS					
P1	Medição em Parede Composta – Grãos (25,7mm)	15	5,00	0,388	0,251	25/06/2019
P2	Medição em Parede Composta – ½ Grãos (12,8mm)	15	5,00	0,393	0,260	22/10/2019
P3	Medição em Parede Composta – ¼ Grãos (6,4mm)	15	5,00	0,397	0,272	29/10/2019
P4	Medição em Parede Composta – G2 Grãos (2 a 3,2mm)	15	5,00	0,401	0,281	28/11/2019
P5	Medição em Parede Composta – G3 Grãos (0,68 a 2,0mm)	15	5,00	0,427	0,296	16/12/2019
2	PAREDE COM TIJOLO FURADO CONVENCIONAL					
P6	Medição em Parede Simples Rebocada – E=15cm	15	5,00	0,916		27/09/2019

Quadro 5.1– Resumo dos Resultados do Experimento
Fonte: Autoria própria, 2019.

Os dados provenientes desses resultados, nos possibilitou graficar os valores das condutividades térmicas efetivas das paredes compostas e da camada de borracha com a variação da granulometria das mesmas e poder fazer as discussões sobre elas.

5.1.7- Variação da Condutividade Térmica com a Granulometria dos Pneus e=15cm.

Com a variação da granulometria dos pneus, sem alterar a espessura interna da parede padrão, observou-se, conforme pode ser visto na Figura 5.2 que, os valores das respectivas condutividades térmicas, tanto da parede efetiva, quanto da parcela das borrachas, diminuiriam com o aumento da granulometria dos pneus, o que demonstra que quanto maior for a granulometria dos pneus mais isolante será a parede. Esse fato pode ser compreendido, devido aos grãos de pneus com uma maior granulometria possuem entre si uma maior quantidade de ar, tornando-se mais isolante. Percebe-se ainda que, os valores referentes às granulometrias em quadradas como “Pó da borracha de Pneus”, de 3,2mm e 2,0mm, apresentaram valores de condutividade térmica crescentes, mostrando que a parede tenderia a se tornar mais condutora, fato que revela que, devemos usar partículas de pneus com granulometria maiores possíveis, para que tenhamos resultados de paredes mais eficientes com relação a diminuição do fluxo de calor de fora para dentro dos ambientes. Dos resultados obtidos, pudemos avaliar que se compararmos os valores da condutividade térmica de menor granulometria 2,00mm com a maior de 25,7mm, veremos a redução aproximada de 10%, para valores de kp (Parede

Composta), redução que aumenta mais ainda, aproximadamente em 18%, se compararmos os valores de k_b (atribuídos somente a borracha).

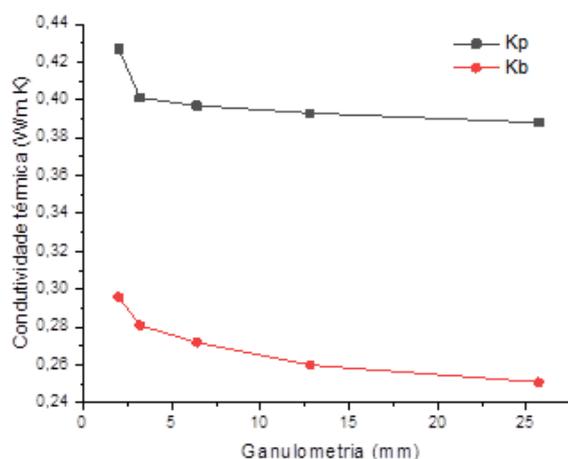


Figura 5.2 – Condução Térmica na Variação de Granulometria dos pneus Paredes (P1 a P5).
Fonte: Autoria própria, 2020.

5.1.8- Comparação da Condutividade Térmica entre as Paredes P1 e P6.

De acordo com o gráfico obtido na Figura.5.3, podemos observar que a parede P1 proposta apresenta uma condutividade térmica efetiva bem menor que a parede convencional P6, podemos perceber que a parede proposta apresenta uma melhora na redução do valor de k_p na ordem de 2,36 vezes, o que representa um percentual de 136%, se comparada com a parede convencional rebocada utilizada em construções de São Luís. Essa melhora é bastante significativa, muito embora saibamos que a condutividade térmica não é parâmetro único para definir um melhor conforto térmico ambiental, mas já nos fornece um bom indicador para podermos utilizar a parede P1 em construções em um projeto piloto.

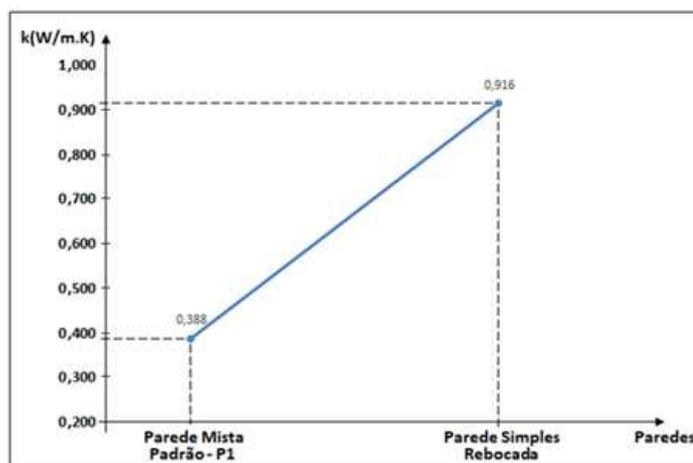


Figura 5.3 – Condutividade Térmica das Paredes P1 e P6

5.1.9- Consumo de pneus necessários para uma casa de 100m².

Durante a realização do experimento, pudemos avaliar para cada caso de granulometria de pneus, utilizados nas paredes de P1 a P5, a massa por metro quadrado dos mesmos, fazendo uso da balança, conforme Figura 3.21(Balança) do item 3.3.3.11, onde pode-se perceber a pesagem para a parede P3, referente a granulometria de 6,4 mm. Os valores aferidos estão contidos na Tabela 5.7 abaixo, levando-se em conta que, foram necessárias em média 100 medidas para cada metro quadrado.

Tabela 5.7 – Medidas da Massa por m² de Parede para cada Granulometria

Granulometria	Massa recipiente (g)	Massa recipiente (kg)	Massa por metro quadrado (kg/m ²)
P5-G3-2,0mm	364	0,364	36,4
P4-G2-3,2mm	332	0,332	33,2
P3-6,4 mm	304	0,304	30,4
P2-12,8 mm	298	0,298	29,8
P1-25,7 mm	296	0,296	29,6

Fonte: o Autor

Conforme dados da própria tabela, verificamos que a nossa parede padrão P1, apresentou um consumo de pneus por metro quadrado menor que os outros, por essa razão utilizamos esse coeficiente para apropriação do consumo em uma casa de 100m² de área construída. Foi avaliada uma Planta Baixa de uma residência de padrão médio muito comum existente em São Luís de área total de 100,03 m², com um perímetro de 40,00m e Pé Direito de 2,80m, temos 112,00 m² de área das paredes externas. Temos ainda a estimativa da área relativa à laje da parte interna da casa, sem a varanda, com um total de 87,15 m², fazendo uma área total por casa de 199,15 m². Como nossa estimativa de consumo para a parede P1 é de 29,6kg/m², seriam necessários então cerca de 5.894,84 kg de pneus para cada casa construída.

Com os dados levantados pela Secretaria de Obras e Serviços Públicos do Município de São Luís-SEMOSP de maio de 2018, conforme descrito na Revisão de Literatura, item 2.1, na Página 07, mais de 85 mil Pneus, cerca de (9 mil toneladas), foram recolhidos entre fevereiro de 2017 e fevereiro de 2018, se dividirmos 9.000.000 kg/ano por 5.894,84 kg /casa, daria para construir **1.526 unidades habitacionais em um ano**, beneficiando assim esse número equivalente de famílias. Outro dado interessante que nos revela a mesma pesquisa da SEMOSP, é que cada pneu de automóvel pesa entre 5,5 a 7,0kg (Média de 6,25kg) e de

caminhão pesa de 55 a 80kg (Média de 67,5kg), se dividirmos 5.894,84 kg /casa, por 6,25kg/Pneus, chegamos à conclusão que, precisaríamos de aproximadamente **943 pneus de automóveis** e se dividirmos 5.894,84 kg/casa, por 67,5kg/Pneus, necessitaríamos de aproximadamente **88 pneus de caminhão**, que seriam retirados do meio ambiente.

5.2 Resultados das simulações numéricas

Várias simulações numéricas foram realizadas nas duas configurações de paredes térmicas e teto: paredes simples, compostas e uma de teto, totalizando 28 simulações ao todo, para investigar os efeitos da variação da granulometria das borrachas nas mesmas, variação de espessura, de cores da pintura da superfície externa, propriedades termofísicas dos materiais de construção e acabamento externo das paredes com a adição de biomassa nas mesmas, além da comparação da parede proposta com a parede convencional e teto. Os dados meteorológicos e de radiação utilizados são para a cidade de São Luís, Brasil com coeficiente de transferência de calor interno e externo de 8,0 W/m².°C, constantes, conforme recomendado em normas. A parede troca calor por convecção com o ambiente externo que está na temperatura segundo o modelo da ASHRAE (2001) e os dados meteorológicos do INMET-2015 (Instituto Nacional de Meteorologia) e por radiação decorrente da irradiação solar, para qual se utilizou um polinômio de ajuste para os dados proveniente do software RADIASOL2. Foi considerado o tempo das 00:00 AM a 24:00 PM (24 horas totais), muito embora os resultados de interesse foram considerados entre 06:00 AM a 24:00 PM. As horas noite adentro, foram avaliadas porque embora não exista mais radiação incidido na parede externa e a temperatura externa já esteja menor, o miolo da parede tem acumulado bastante energia térmica que será dissipada por ambas as faces.

Foram analisadas as variações da temperatura nas superfícies externa e interna das paredes, além da variação do fator de decremento e retardamento do pico de temperatura ao longo das horas do dia. Sendo que esses indicadores, foram definidos conforme item 5.2.1, seguinte.

Duas paredes simples de alvenaria de tijolos cerâmicos de 15 cm de espessura foram simuladas, uma sem reboco-S6 e outra rebocada-S23, essa última, fazendo uso do valor da condutividade térmica de 0,92 W/m.K, encontrado experimentalmente, que foi considerada como “parede convencional”, utilizada em São Luís-MA.

Nas simulações das paredes compostas, foram consideradas, paredes com 3 três camadas, sendo as duas externas de alvenaria de tijolos maciços e a interna preenchida com

pedaços de pneus, cujo valores das condutividades térmicas, variaram entre 0,25 e 0,30 W/m.K, também encontrado experimentalmente. A simulação S1, referente à parede P1, foi utilizada como referência para comparação e análise da eficiência das demais modelagens estudadas, conforme grupos estabelecidos no “Resumo de dados para as simulações numéricas das paredes e tetos”, constantes no Apêndice C.

5.2.1 Simulação da parede simples convencional – S6=P6.

Utilizou-se uma parede de tijolo cerâmico comum de 15 cm de espessura, com condutividade térmica de 0,72 W/m.K, massa específica de 1.922 Kg/m³, calor específico de 835 J/Kg. K, absorvidade de 0,63 e emissividade de 0,93.

Na Figura 5.4, temos a temperatura ao longo do dia para ambas as superfícies da parede simples de tijolo convencional, onde é possível ver que a temperatura máxima na parede externa, com o valor de 49,58°C, ocorre por volta das 13:00h e na face interna, de valor 30,08°C, ocorre por volta das 16:30h. Esse retardamento do pico de temperatura (RET = diferença da hora em que ocorre a temperatura máxima na parede interna em relação a temperatura máxima da parede externa), também chamado de atraso no tempo (**TI**) é provocado pela resistência oferecida pela parede ao fluxo de calor. Um outro resultado que pode ser obtido é o fator de decremento (RT^* = razão entre a temperatura máxima da parede interna e a temperatura máxima da parede externa), também chamado de Fator de decréscimo (**Df**). Para essa simulação-S6, obtivemos valores de: $Df=0,607$ e $TI=3:44h$. Esses indicadores são importantes por exemplo, para estabelecer a otimização do uso de aparelhos de ar-condicionado, possibilitando saber qual o período em que ele será mais exigido e a que horas devemos ligar o mesmo.

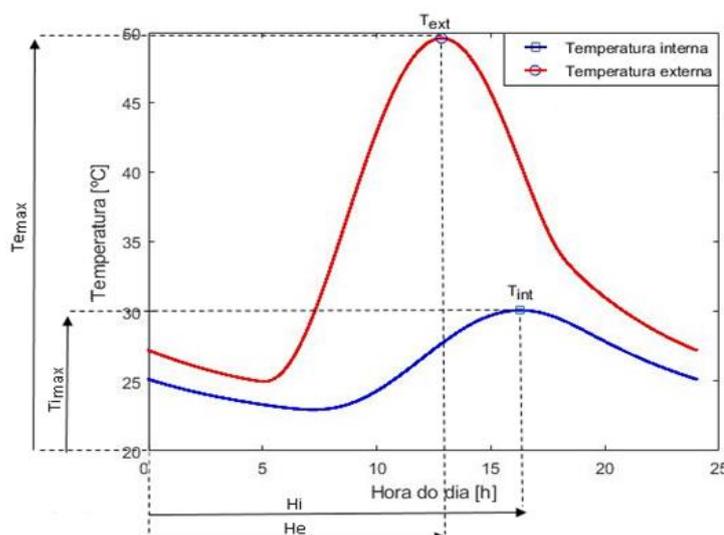


Figura 5.4 - Temperatura em ambas as faces da parede P6 ao longo do dia.

5.2.2 Efeitos da granulometria da borracha na parede composta – S1 a S5.

Os resultados das simulações dos efeitos da variação de granulometria da borracha contida internamente à parede para as temperatura da superfície externa de uma parede composta é apresentado na Figura 5.5 para espessura de 15 cm, com condutividade térmica da borracha obtida de forma experimental, variando entre de 0,25 a 0,30 W/m.K e da alvenaria de 0,72 W/m.K, massa específica da borracha de 1.100 Kg/m³ e da alvenaria de 1.922 Kg/m³, calor específico da borracha de 2010 J/Kg.K e da alvenaria de 835 J/Kg.K , absorvidade de 0,63 e emissividade de 0,93, simulando o grupo G1, comportamento das paredes P1 a P5, conforme variação de granulometria de 25,7mm; 12,8mm; 6,4mm; 3,20 mme 2,00 mm, respectivamente. Os dados de entrada, estão resumidos na Tabela 5.8, abaixo.

Tabela 5.8. Dados para a simulação do grupo – G1

Espessura (m)	Condutividade Térmica (W/m.K)		Massa Específica (Kg/m ³)		Calor Específico (J/Kg.K)		Absortividade	Emissividade
	k. alv.	k. borracha	ρ. alv.	ρ. borra.	c. alv.	c. borra.		
0,15	0,72	0,25 a 0,30	1922	1100	835	2010	0,63	0,93

Fonte: Çengel (2012), Tabelas A5; A8; A19 e Próprio Autor.

Em análise a figura, quase não se percebe um aumento, mesmo que pequeno da temperatura da face externa da parede, quando sua granulometria aumenta, ocorrendo na diminuição dos valores das condutividades térmicas.

Já pela Figura 5.6, é possível notar que a temperatura máxima da face internada parede aumenta com o aumento da condutividade térmica e com a diminuição da granulometria da borracha, devido ao elevado gradiente térmico. Diminuindo a condutividade térmica da borracha há um aumento da resistência térmica do material e do retardamento do pico de temperatura.

A Figura 5.7, mostra a variação do Atraso no tempo e Fator de decréscimo com a granulometria de borracha. Como se pode ver, o aumento da granulometria da borracha, diminui o Fator de decréscimo, uma vez que o aumento do tamanho das partículas de borracha, aumentando a resistência interna do enchimento do espaço devido ao aumento do espaço ocupado pelo ar de baixa condutividade térmica. O efeito da dimensão das partículas de

borracha no Atraso de tempo é aumentar, pelo fato de a resistência global ser aumentada e, conseqüentemente, o calor transferido para o ambiente interior ser reduzido e, conseqüentemente, o tempo necessário para atingir o valor máximo será aumentado.

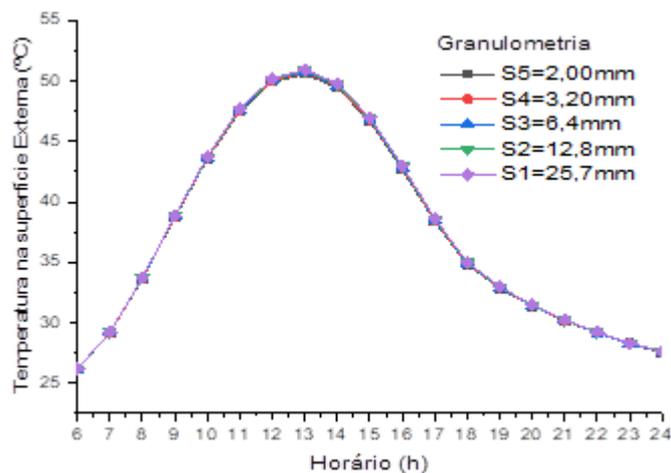


Figura 5.5 - Efeito da variação da granulometria nas temperaturas da superfície externa.

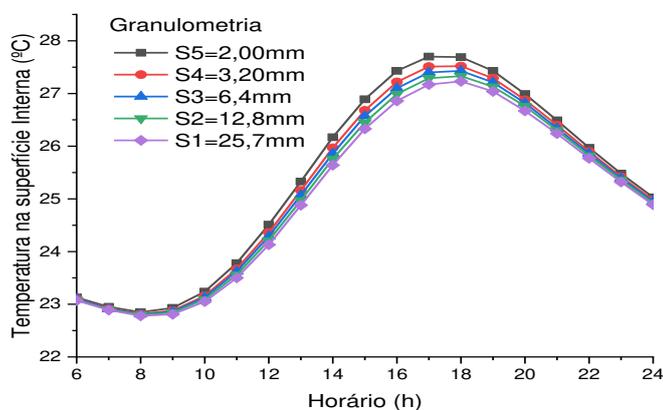


Figura 5.6 - Efeito da variação da granulometria nas temperaturas da superfície interna

Tabela 5.9. Grupo-G1-Variação de Granulometria da Borracha

Granulometria (mm)	Dif. Temp. (°C)	Fator de decremento (Df)	Retardamento do pico de temperatura (TI)-(h)
2,0	22,88	0,548	4,60
3,2	23,18	0,543	4,69
6,4	23,35	0,540	4,73
12,8	23,52	0,538	4,78
25,7	23,70	0,535	4,83

Fonte: Próprio Autor.

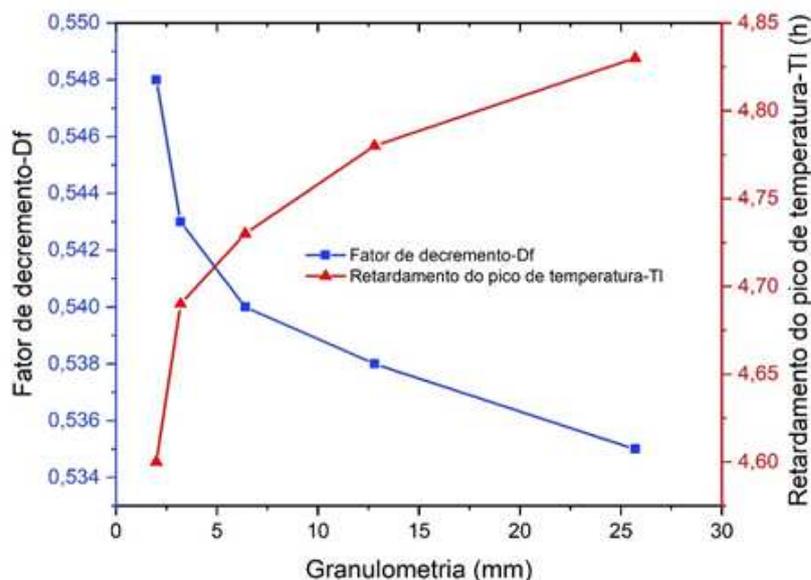


Figura 5.7 - Efeito da granulometria sobre o fator de decremento e o atraso no tempo.

5.2.3 Efeitos da espessura do enchimento da borracha na parede composta – S7 a S10.

O efeito da variação da espessura da parede na temperatura das superfícies, foram obtidas com os dados da Tabela 5.10 abaixo, onde tivemos as variações apenas da camada interna da borracha ficando com espessuras totais de:12cm;13cm;15cm;20cm e 25cm.

Tabela 5.10. Dados para simulação do grupo – G2

Espessura (m)	Condutividade Térmica (W/m.K)		Massa Específica (Kg/m ³)		Calor Específico (J/Kg.K)		Absorvidade	Emissividade
	k. alv.	k. borracha	ρ. alv.	ρ. borra.	c. alv.	c. borra.		
0,12 a 0,25	0,72	0,25	1922	1100	835	2010	0,63	0,93

Fonte: Çengel (2012), Tabelas A5; A8; A19 e Próprio Autor.

Pela Figura 5.8, percebe-se que o aumento da espessura da parede, provoca um aumento, mesmo que pequeno da temperatura da superfície externa.

Como pode ser visto na Figura 5.9, o aumento da espessura da parede, reduz o calor transferido através da mesma e conseqüentemente a temperatura máxima da superfície interna. Pode-se observar também, o retardamento do pico de temperatura e, portanto, o aumento do intervalo de tempo para as temperaturas máximas atingirem a superfície interna da parede.

A Figura 5.10, demonstra os efeitos da espessura de enchimento de borracha sobre o Fator de decréscimo e Defasamento temporal. Como se pode observar, aumentando a espessura, aumenta a resistência térmica causando redução da radiação solar incidente transmitida ao espaço interior, para uma espessura de borracha de enchimento de 25 cm, este efeito corresponde a uma redução de 75,5% do valor, se comparado à uma espessura de 12 cm.

Com referência ao efeito sobre o Atraso de tempo, verifica-se que o Tempo de atraso aumenta de 3,04 para cerca de 11,08 horas, correspondendo a um aumento da espessura de enchimento de borracha de 12 cm para 25 cm, um aumento de 3,64 vezes.

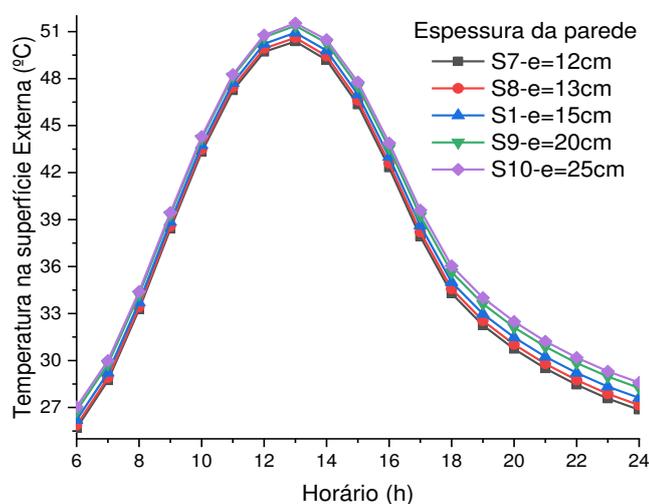


Figura 5.8 - Efeito da variação da espessura da parede nas temperaturas da superfície externa.

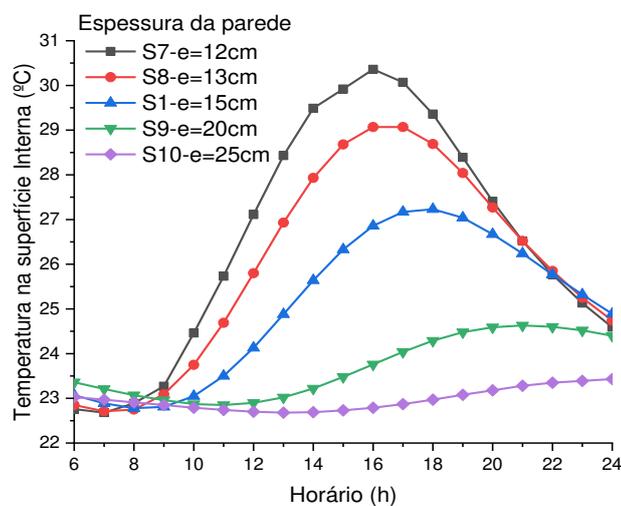


Figura 5.9 - Efeito da variação da espessura da parede nas temperaturas da superfície interna.

Tabela 5.11. Grupo-G2-Variação da Espessura da parede

/Espessura (cm)	Dif. Temp. (°C)	Fator de decremento (Df)	Retardamento do pico de temperatura(TI)-(h)
12	20,03	0,603	3,04
13	21,51	0,575	3,63
15	23,70	0,535	4,83
20	26,75	0,479	8,14
25	28,12	0,455	11,08

Fonte: Próprio Autor.

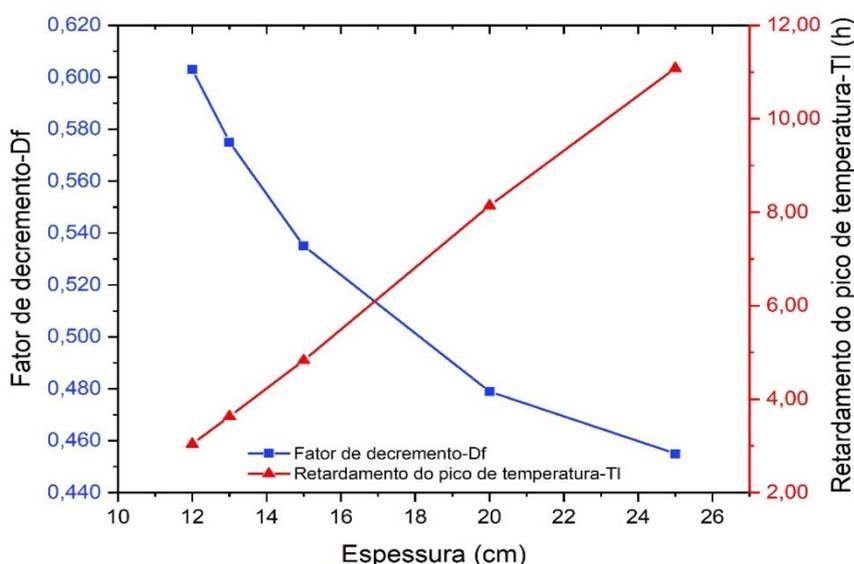


Figura 5.10 - Efeito da espessura da parede sobre o fator de decaimento e o desfasamento temporal

5.2.4 Efeitos da cor do acabamento da parede externa – S11 a S14.

Os efeitos das diferentes pinturas aplicadas na superfície externa da parede, isto é, sua emissividade e absorvidade no valor das temperaturas interna e externa máximas e no retardamento do pico de temperatura foram investigadas. As simulações foram realizadas para nossa parede composta padrão P1, com dados alimentados da Tabela 5.12, para as pinturas da superfície externa nas cores: (S11- branca; S12-verde; S1-Natural; S13-vermelho e S14-preta) e tendo como dados de suas absorvidades e emissividades, para cada parede simulada conforme está descrito no grupo – G6 do Apêndice-C.

Tabela 5.12. Dados para a simulação do grupo – G3

Espessura (m)	Condutividade Térmica (W/m.K)		Massa Específica (Kg/m ³)		Calor Específico (J/Kg.K)		Absortividade	Emissividade
	k. alv.	k. borracha	ρ. alv.	ρ. borra.	c. alv.	c. borra.		
0,15	0,72	0,25	1922	1100	835	2010	0,26 a 0,98	0,90 a 0,98

Fonte: Çengel (2012), Tabelas A5; A8; A19 e Próprio Autor.

As Figura 5.11 e 5.12 mostram os resultados da variação da temperatura nas superfícies da parede externa e interna, respectivamente, conforme as horas do dia, percebe se claramente que as superfícies pintadas com cores mais escuras, vermelho e preto absorve uma maior quantidade de calor se comparada com a parede sem pintura (S1-natural), enquanto a o acabamento com pinturas mais claras, absorve uma pequena quantidade de radiação incidente e consequentemente transfere menos calor para a parede interna.

Foi possível notar também, a grande diferença da variação da temperatura na face externa e na face interna devido às propriedades térmicas da superfície da parede. As superfícies com pintura preta, por exemplo, são destinadas para paredes, onde há a necessidade de coletar energia solar, pois apresentam alta absorvidade solar, mas valores baixos de emissividade. Já as superfícies com pintura mais claras, por exemplo, branca apresentam propriedades opostas e são destinadas para paredes, onde há a necessidade de se manter fria e se torna útil para manter o conforto térmico.

Parte da energia solar incidente na parede externa é refletida, outra parte é absorvida pelo material da parede e aparece como ganho de calor elevando a sua temperatura e o resto é transmitido. A quantidade de radiação solar refletida depende da refletividade da superfície dominada pela sua cor. A Figura 5.13, mostra como a variação da cor da parede afeta o Fator de decremento (Df) e o Atraso no tempo (TI). Se compararmos o Fator de decremento para a parede preta e branca, a parede preta transmitirá aproximadamente, 37% mais calor para a face interna da parede. Comparando a parede branca com a parede padrão com cor natural, o calor transmitido é aproximadamente 21% menos calor para a face interna da parede.

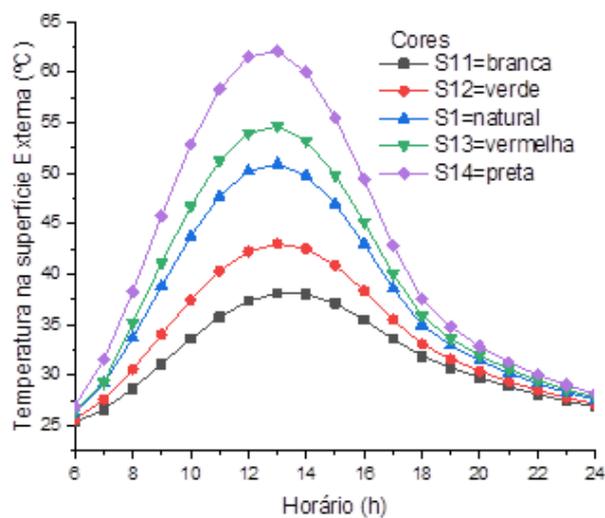


Figura 5.11 - Efeito da variação de cores da pintura externa da parede padrão nas temperaturas da superfície externa.

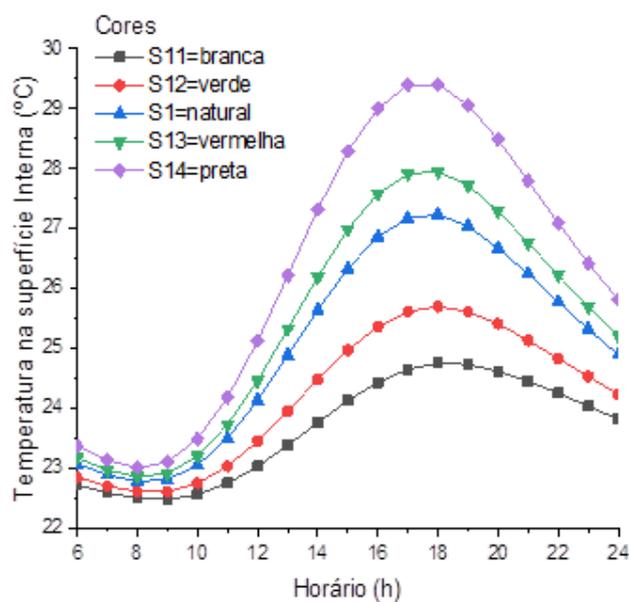


Figura 5.12 - Efeito da variação de cores da pintura externa da parede padrão nas temperaturas da superfície interna.

Tabela 5.13. Grupo-G3-Variação de cores da parede

Cores	Dif. Temp. (°C)	Fator de decremento (RT*)	Retardamento do pico de temperatura (RET)-(h)
Branca	13,46	0,648	4,94
Verde	17,34	0,597	4,87
Natural	23,70	0,535	4,83
Vermelho	26,72	0,511	4,82
Preta	32,77	0,473	4,81

Fonte: Próprio Autor.

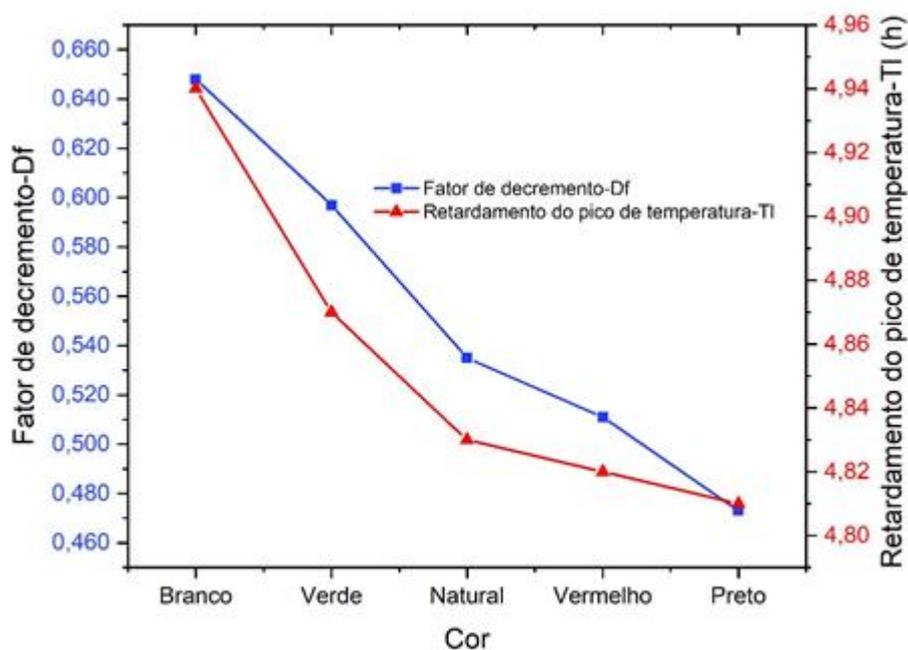


Figura 5.13 - Efeito da cor da parede sobre o fator de decaimento e o desfasamento temporal

5.2.5 Efeitos dos materiais de construção na parede composta – S15 a S17.

Em seguida foi avaliado o efeito da utilização de diferentes materiais na construção da parede com mesmas dimensões que a parede composta padrão-P1 de alvenaria e com propriedades termodinâmicas diferentes, para as análises, foram consideradas as paredes de madeira-S16, alvenaria-S1, de concreto-S17 e de gesso-S15 e verificado o comportamento das temperaturas de suas superfícies externas e internas, além dos fatores (Df) e (TI).

Os resultados são mostrados abaixo, fazendo uso da Tabela 5.14, onde aparece os dados de entrada com as variações para a condutividade térmica dos materiais, massa específica, calor específico, além dos valores variados para suas absorvidades e emissividades.

Tabela 5.14. Dados para a simulação do grupo – G4

Espessura (m)	Condutividade Térmica (W/m.K)		Massa Específica (Kg/m ³)		Calor Específico (J/Kg.K)		Absorvidade	Emissividade
	k. alv.	k. borracha	ρ. alv.	ρ. borra.	c. alv.	c. borra.		
0,12 a 0,25	0,72	0,25	1922	1100	835	2010	0,63	0,93

Fonte: Çengel (2012), Tabelas A5; A8 e Próprio Autor.

Pelas Figuras 5.14 e 5.15, é possível perceber que a temperatura máxima da face externa da parede diminuiu quando se utilizou na sequência materiais como; madeira, alvenaria, concreto e gesso, fato que não ocorreu nas temperaturas das faces internas, onde foi percebido que a parede de concreto obteve a maior temperatura máxima, seguido das paredes de alvenaria, gesso e madeira. Tal comportamento deve se ao fato de que, para esse grupo G4 de simulações, os parâmetros de entrada, não se resumiram apenas, aos parâmetros de variação das condutividades térmicas, absorvidades e emissividades dos materiais, mais também, às variações das massas específicas e calores específicos.

Analisando a Figura 5.16, é possível observar que o fator de decremento (RT^*) diminui no sentido das paredes construídas de madeira, alvenaria, concreto e gesso e no mesmo sentido aumenta o retardamento de pico da temperatura (RET), fato que caracteriza a madeira como materiais mais isolantes, sendo com isso mais resistentes, portanto, a transferência de calor e as paredes feitas de concreto, menos isolantes, menos resistentes ao fluxo de calor.

Com as informações dos dados da Tabela 5.15 que gerou a Figura 5.16, podemos ver que, se compararmos a parede de madeira com a nossa parede padrão de alvenaria composta P1, é possível observar os valores de (Df) e ver uma melhoria na redução do calor transferido através da parede de ordem 16%. Se compararmos agora a parede de alvenaria com a parede de concreto, esta melhoria é da ordem de 6,79% e, se a comparação for entre paredes de madeira e de concreto, a melhoria é de aproximadamente 21,78%. Além disso, o intervalo de tempo (TI) é aproximadamente 1,6 vezes para uma parede de madeira construída quando comparada com uma parede construída de concreto. Os materiais de construção mais comuns têm uma condutividade térmica relativamente elevada da ordem de 0,65 a 1,30 W/m.K (Çengel, 2012).

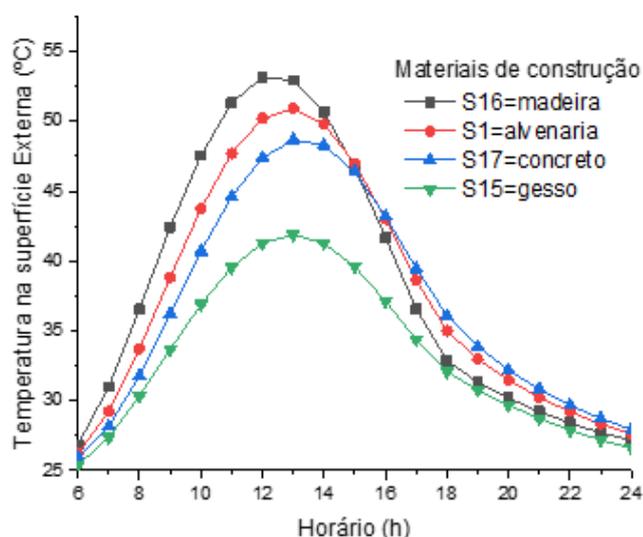


Figura 5.14 - Efeito da variação do uso de materiais de construção da parede padrão nas temperaturas da superfície externa.

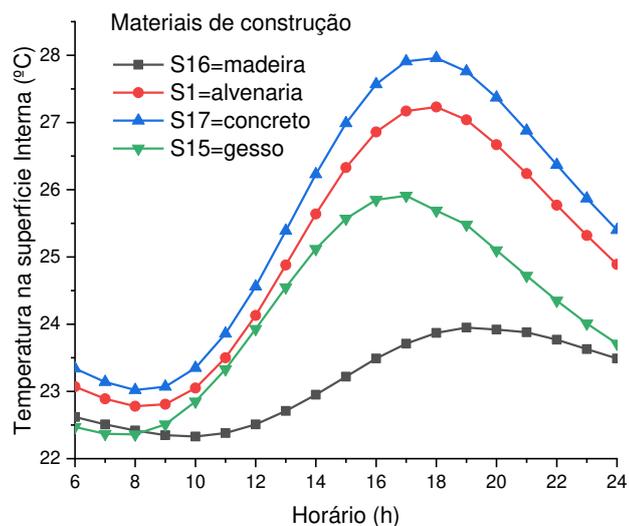


Figura 5.15 - Efeito da variação do uso de materiais de construção da parede padrão nas temperaturas da superfície interna.

Tabela 5.15. Grupo-G4-Diferentes materiais de construção

Materiais	Dif. Temp. (°C)	Fator de decremento (Df*)	Retardamento do pico de temperatura(TI) -(h)
Madeira	29,38	0,449	7,08
Alvenaria	23,70	0,535	4,83
Concreto	20,76	0,574	4,42
Gesso	15,96	0,619	3,82

Fonte: Próprio autor

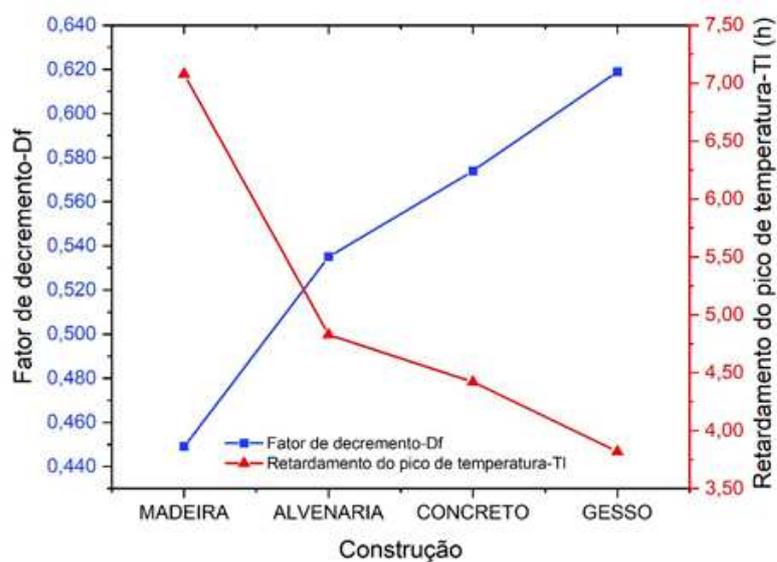


Figura 5.16 - Efeito do tipo de material de construção sobre o fator de decréscimo e o desfasamento temporal

5.2.6 Efeitos da adição de biomassa em revestimento -S18 a S22.

Nas Figuras 5.17 e 5.18, estão representados os resultados realizados para a análise dos efeitos da adição de biomassa da palmeira de Burití em argamassa de gesso, utilizando as propriedades físicas da Tabela 5.16 apresentadas no estudo realizado por Lima (2005), onde foram realizadas simulações para paredes utilizando as amostras com porcentagens de adição de biomassa de 0%,5%,10%,20% e 30%, com o objetivo de se obter um novo material que pudesse ser utilizado como revestimento ou elementos de vedação, agregando a este, propriedade que produza baixa condutividade térmica. Os valores com dados de entrada, foram arredondados para gerar 5 simulações de S18 a S22, expressos na Tabela 5.17.

Tabela 5.16. Propriedades térmicas da biomassa

Parede Dimensões 230x114x64 mm	Propriedades			
	Massa Específica [kg/m ³]	Calor Específico [kJ/kg °C]	Condutividade Térmica [W/m. °C]	Absortividade e Emissividade
Amostra A ₀ :0% de M.v.M;	1.159,36	2,168	0,53	0,63 a 0,93
Amostra A ₅ :5% de M.v.M;	1.031,54	2,623	0,25	0,63 a 0,93
Amostra A ₁₀ :10% de M.v.M;	943,40	1,817	0,17897	0,63 a 0,93
Amostra A ₂₀ :20% de M.v.M;	598,20	3,064	0,20448	0,63 a 0,93
Amostra A ₃₀ :30% de M.v.M;	457,80	3,718	0,19533	0,63 a 0,93

Fonte: Lima (2005).

Tabela 5.17. Dados para a simulação do grupo – G5

Espessura (m)	Condutividade Térmica (W/m.K)		Massa Específica (Kg/m ³)		Calor Específico (J/Kg.K)		Absortividade	Emissividade
	k. alv.	k. borracha	ρ. alv.	ρ. borra.	c. alv.	c. borra.		
0,15	0,18	0,25	458	1100	1817	2010	0,63	0,93
	a 0,53		a 1159		a 3718			

Fonte: Lima (2005); Ávila (2018) e Próprio Autor.

É possível notar através da Figura 5.19, a variação do fator de decréscimo (Df) com a fração de biomassa adicionada à argamassa de gesso indicando que, quanto maior for a

percentagem de adição de biomassa na argamassa, menor será a transmissão de calor para o ambiente interno. A adição de 10% de biomassa à argamassa de revestimento da parede, reduz o calor transmitido em cerca de 18,54%. Também se pode observar que após cerca de 10% de biomassa não há mais nenhuma diminuição de calor transferido para o ambiente interno, podendo ainda ocorrer que valores mais elevados, podem levar a uma resistência mecânica menor da parede.

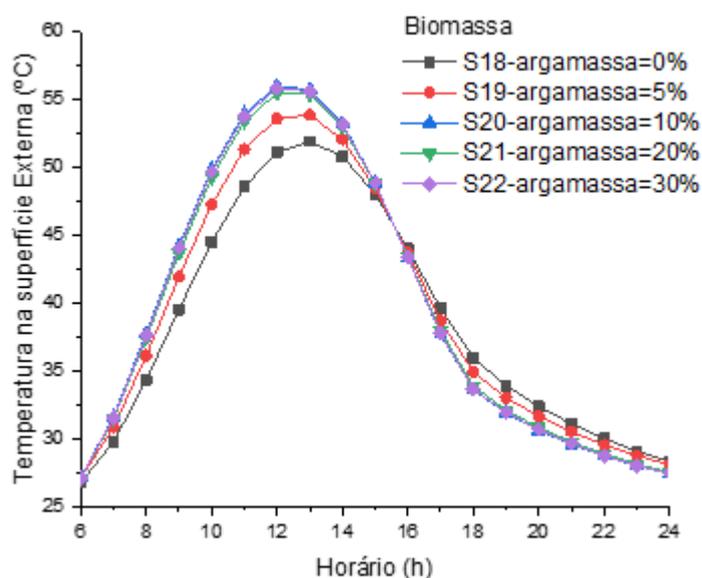


Figura 5.17 - Efeito da variação da adição de biomassa em argamassa de revestimento da parede padrão nas temperaturas da superfície externa.

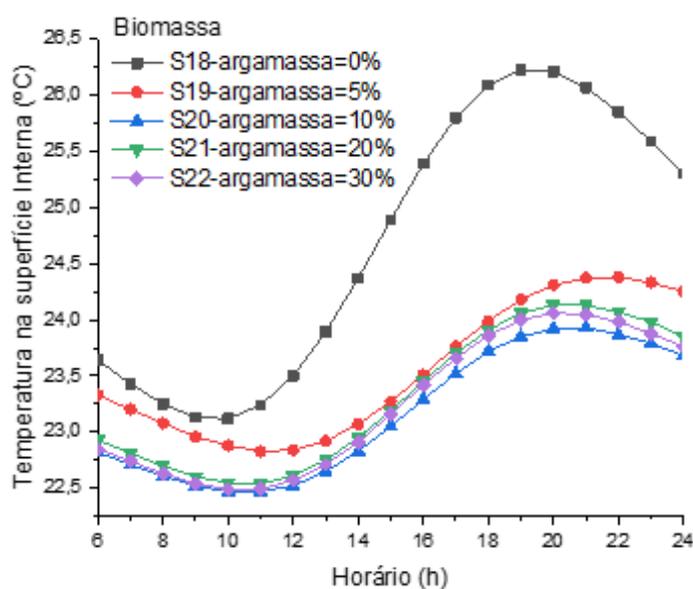


Figura 5.18 - Efeito da variação da adição de biomassa em argamassa de revestimento da parede padrão nas temperaturas da superfície interna.

Tabela 5.18. Grupo-G5-Adição de Biomassa em paredes

Fator Biomassa	Fator de decremento (Df)	Retardamento do pico de temperatura (TI)-(h)
0%	0,505	6,46
5%	0,451	8,94
10%	0,426	8,14
20%	0,433	8,06
30%	0,429	7,95

Fonte: Próprio Autor.

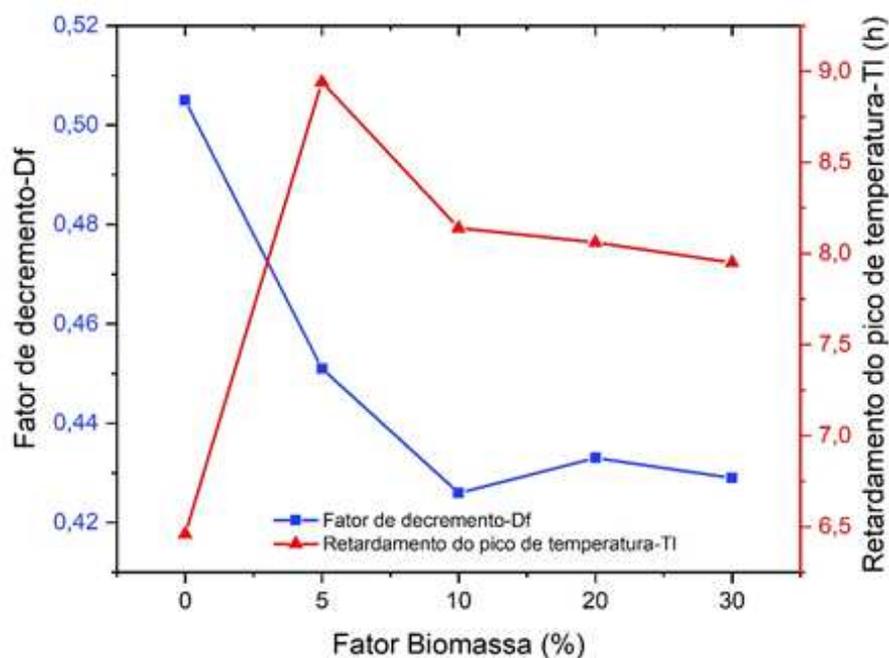


Figura 5.19 - Efeito da variação da adição de biomassa em argamassa de revestimento da parede padrão nas temperaturas da superfície externa

5.2.7 Comparação entre arranjos de paredes investigadas-S1; S6 e S23.

Os resultados da análise das diferentes modelagens de paredes térmicas, sendo elas a simulação S1, que corresponde a parede composta padrão-P1, S6 correspondendo a parede simples convencional-P6 e a S23, correspondendo a parede simples rebocada com dados do experimento, para a condutividade térmica de 0,92 W/m.K, (Parede aplicada na construção de residências na capital de São Luís-MA), são apresentados nas Figuras 5.20 e 5.21, onde todas as paredes possuem 15 cm de espessura e propriedades térmicas, conforme apresentado na Tabela 5.19, abaixo.

Tabela 5.19. Dados para a simulação do grupo – G6

Espessura (m)	Condutividade Térmica (W/m.K)		Massa Específica (Kg/m ³)		Calor Específico (J/Kg.K)		Absor-tividade	Emissi-vidade
	k. alv.	k. borracha	ρ. alv.	ρ. borra.	c. alv.	c. borra.		
0,15	0,72 a 0,92	0,25	1922	1100	835	2010	0,63	0,93

Fonte: Çengel (2012), Tabelas A5; A8; A19 e Próprio Autor.

É possível notar que as paredes simples: P23=S23 e P6=S6 respectivamente, possuem menores resistências térmicas à transferência de calor proveniente da radiação solar, já na parede composta padrão P1=S1 a resistência térmica aumenta, impedindo com mais eficiência o fluxo de calor para a parede interna. Percebe-se que a hora de ocorrência das máximas temperaturas na parede externa, quase não variou, já as horas de ocorrência das máximas temperaturas nas paredes internas, apresentaram uma diferença de aproximadamente 2 (duas) horas entre a parede P23 e P1, dados que demonstram que a camada de borracha utilizada internamente na parede composta P1, se constitui um bom isolante térmico impedindo a transferência de calor para o ambiente no interior da residência.

A variação do fator de decremento com o tipo de parede investigada é mostrada na Figura 5.22. Como se pode ver, o aumento desse fator entre a parede de alvenaria convencional e a proposta com enchimento de borracha é de cerca de 13,46%. Isto deve-se principalmente ao aumento da resistência térmica da parede com enchimento de borracha, atenuando o pico da temperatura até atingir o ambiente interno. Em comparação com a parede rebocada medida experimentalmente, o aumento é de cerca de 21,12%. A comparação da parede proposta com a parede de alvenaria convencional, mostra um aumento no atraso de tempo de cerca de 40,41% e, quando comparado com a parede rebocada experimental, o atraso é aumentado em 62,63%. Mais uma vez, este aumento no atraso de tempo é devido à redução da condutividade térmica efetiva da parede cheia de borracha, o que reduz a taxa de transferência de calor e, portanto, reduz o ganho de calor do ambiente interno.

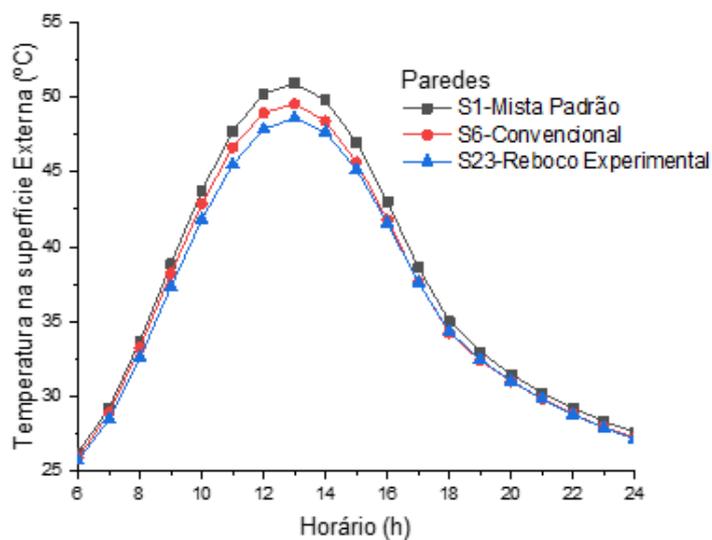


Figura 5.20 – Temperatura da parede externa para várias modelagens de paredes

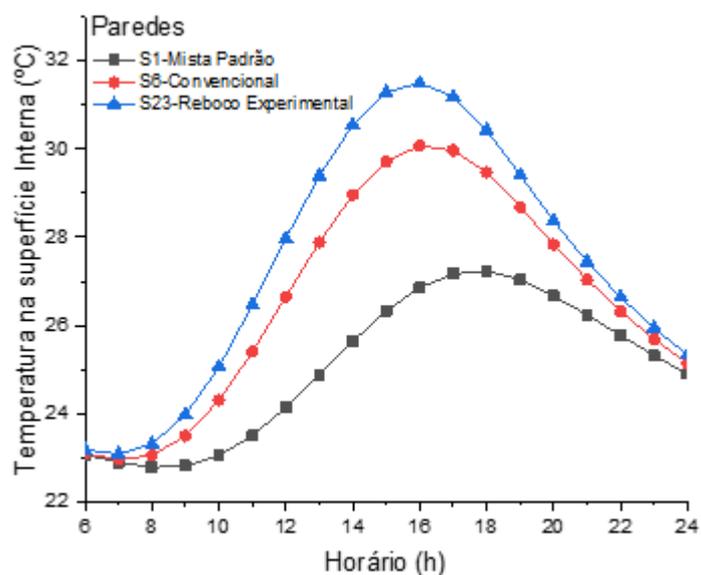


Figura 5.21 – Temperatura da parede interna para várias modelagens de paredes.

Tabela 5.20. Grupo-G6-Comparação entre as paredes P1, P6 e P23

Paredes	Dif. Temp. (°C)	Fator de decremento (Df)	Retardamento do pico de temperatura(TI)-(h)
Parede composta padrão-P1	23,70	0,535	4,83
Parede convencional-P6	19,50	0,607	3,44
Parede rebocada experimental-P23	17,10	0,648	2,97

Fonte: Próprio Autor.

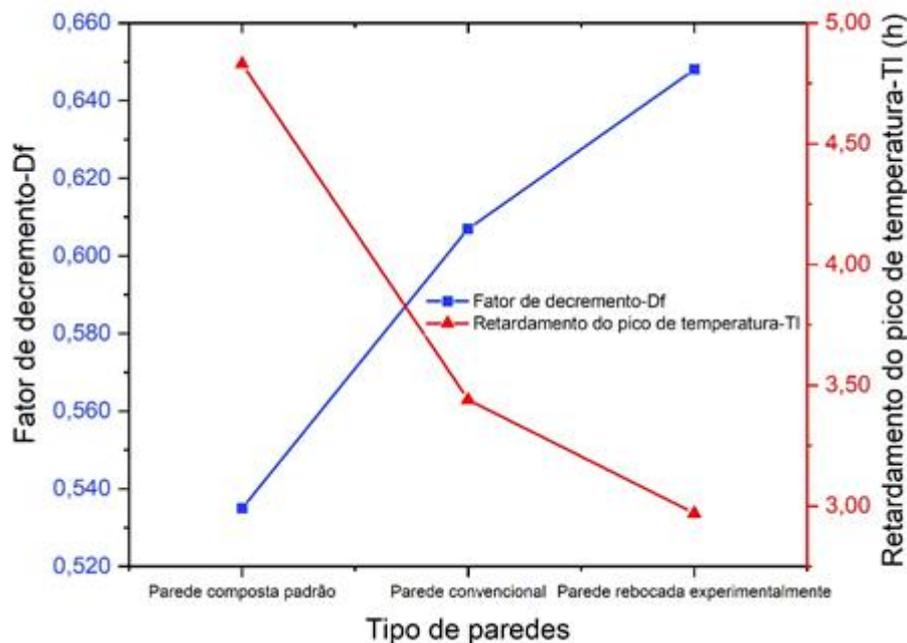
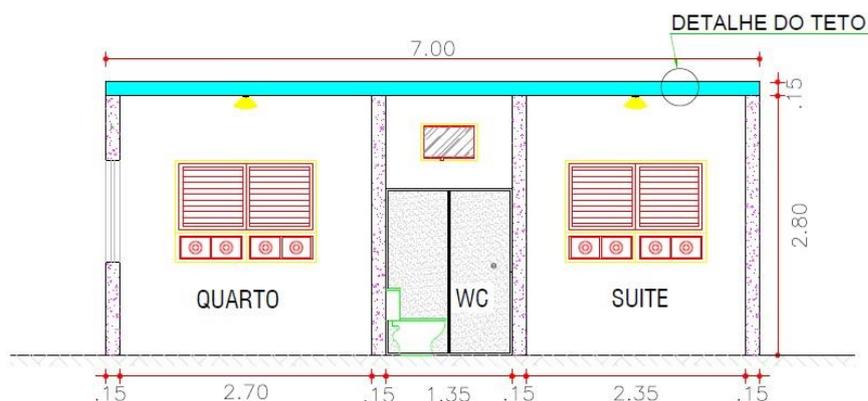


Figura 5.22 -- Efeito do tipo de parede sobre o fator de decaimento e o desfasamento temporal

5.2.8 Teto - Laje Maciça com Borracha, Efeitos da variação de espessura-S24 a S28.

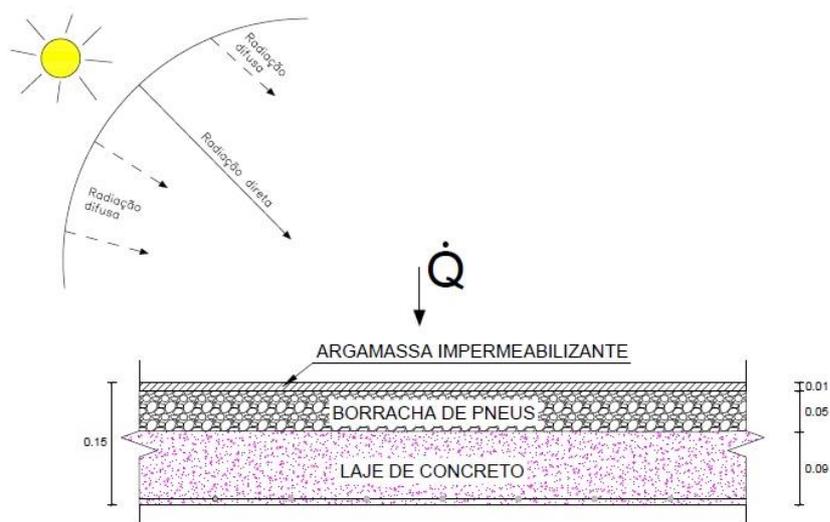
Para finalizar nossos estudos, atendendo aos objetivos desse trabalho de tese, simulamos o comportamento do Teto da nossa residência de 100 m², como sendo todo feito em laje maciça horizontal, conforme mostra a Figura 5.23, com detalhe na Figura 5.24. O Teto está constituído de uma laje maciça em concreto armado de espessura total de 9,00cm, que sobre a mesma terá uma camada de grãos de Pneus (25,7 mm) de 5,00cm de espessura, similar à usada na parede composta padrão-P1, em seguida, teremos uma camada de argamassa impermeabilizante para revestimento de 1,00cm de espessura, que será aplicada sobre a camada de pneus. Chamamos de S24, a simulação da laje de teto que corresponde à espessura total de 15,00cm e denominamos de: S25=12,00cm; S26=13,00cm; S27=20,00cm e S28=25,00cm, as simulações, que correspondem às variações de espessura da camada da borracha em 2,00;3,00;10,00 e 15,00cm, respectivamente, para que pudéssemos fazer as respectivas avaliações do comportamento dessas variações de espessura.



CORTE A-B TRANSVERSAL DE CASA
PADRÃO MÉDIO EM SÃO LUIS-MA

ESCALA.....1/75

Figura 5.23 – Corte Transversal da casa de 100m².



DETALHE DO TETO

SEM ESCALA

Figura 5.24. – Detalhe do Teto com Laje de Concreto Maciça da Casa de 100m².

Os resultados das cinco simulações, correspondendo ao teto com uma laje maciça de concreto armado, contendo uma camada de pneus na sua parte de cima, e em seguida, revestida com uma argamassa impermeabilizante com pintura de sua superfície na cor cinza, para diferentes espessuras da camada de borracha, estão apresentados nas Figuras 5.25 a 5.27, onde foram simuladas para propriedades térmicas, conforme apresentado na Tabela 5.21, abaixo.

Tabela 5.21. Dados para a simulação do grupo – G7

Espessura (m)	Condutividade Térmica (W/m.K)		Massa Específica (Kg/m ³)		Calor Específico (J/Kg.K)		Absor-tividade	Emissi-vidade
	k. alv.	k. borracha	ρ. alv.	ρ. borra.	c. alv.	c. borra.		
0,12 a 0,25	0,92	0,25	1922	1100	835	2010	0,75	0,95
	a 1,40		e 2300		e 880			

Fonte: Çengel (2012), Tabelas A5; A8; A18; A19 e Próprio Autor.

Ao analisarmos a Figura 5.25, percebe-se que o aumento da espessura da parede, quase não provoca variação das temperaturas para as primeiras horas da manhã até as 13:00h, demonstrando uma pequena alteração com valores ligeiramente maiores para as maiores espessuras nas 11 horas posteriores da tarde das temperaturas de superfície externa, comportamento este semelhante ao ocorrido nas simulações do grupo G-02 para as paredes, figura 5.6.

Com os resultados demonstrados na Figura 5.26, que trata das temperaturas das faces internas, podemos perceber claramente que, com o aumento da espessura do teto, reduz o calor transferido através da mesma e conseqüentemente a temperatura máxima da superfície interna. Pode-se observar também, o retardamento do pico de temperatura e, portanto, o aumento do intervalo de tempo para as temperaturas máximas atingirem a superfície interna da laje, esse resultado também é similar ao encontrado para a parede na Figura 5.7.

O efeito da espessura do enchimento de borracha no Fator de decremento e no Atraso de tempo é mostrado na Figura 5.27. Como se pode ver, o Fator de decremento diminui cerca de 30% com o aumento da espessura do enchimento de borracha na seção do teto de 12 para 25 cm. Esta redução do Fator de decremento, deve-se ao aumento da resistência térmica efetiva do teto que reduz a taxa de transferência de calor e conseqüentemente reduz o ganho de calor da montagem do teto. O desfasamento temporal é aumentado de 2,32 para 10,75 horas, o que corresponde a 363%.

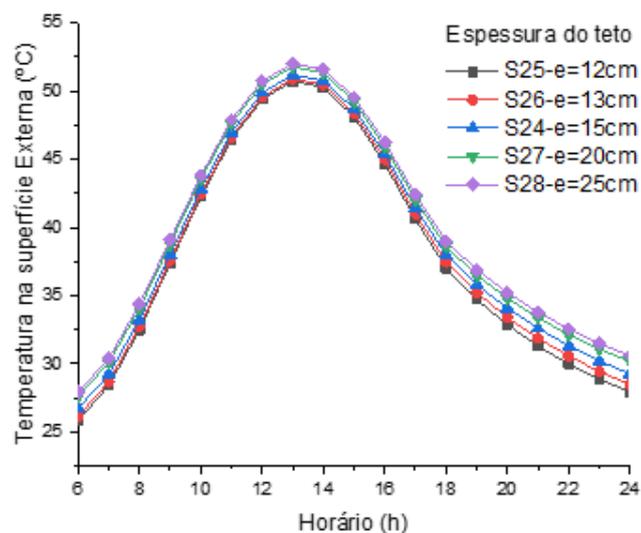


Figura 5.25 – Temperaturas da superfície externa das lajes de teto.

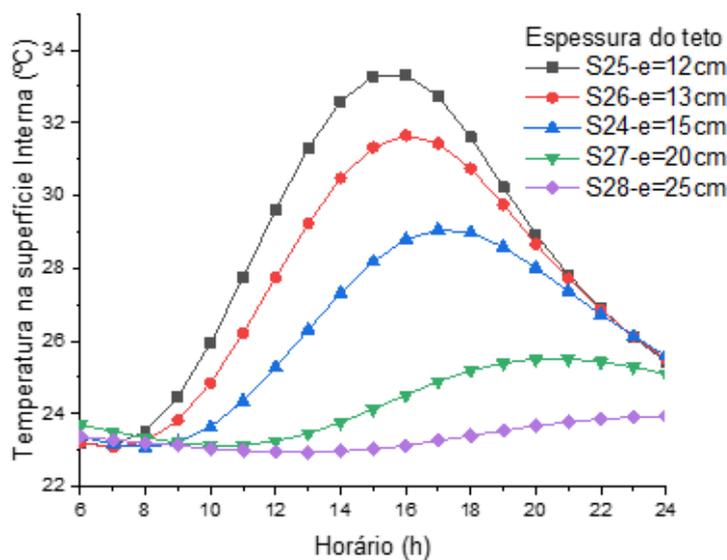


Figura 5.26 – Temperaturas da superfície interna das lajes de teto.

Tabela 5.22. Grupo-G7-Variação das Espessuras das Lajes de Teto.

Espessura (cm)	Dif. Temp. (°C)	Fator de decremento (Df)	Retardamento do pico de temperatura(TI)-(h)
12	17,40	0,657	2,32
13	19,32	0,621	2,84
15	22,19	0,567	4,01
20	26,75	0,492	7,28
25	26,32	0,460	10,75

Fonte: Próprio Autor.

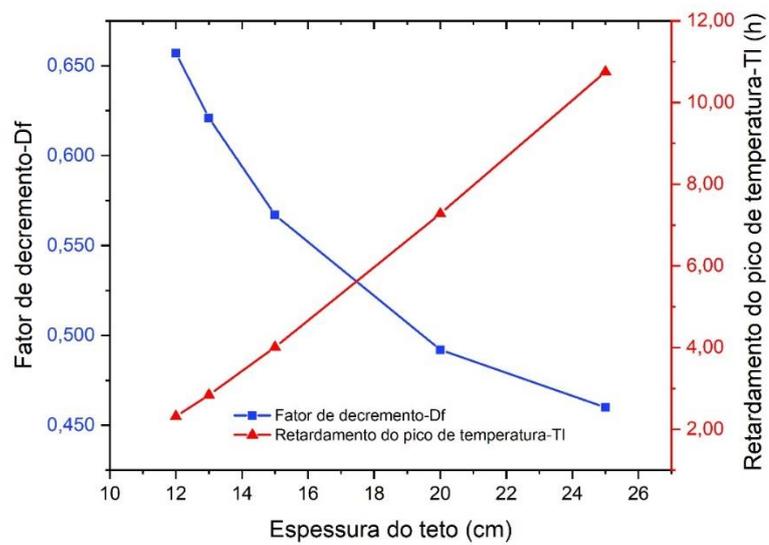


Figura 5.27 – Efeito da espessura do teto sobre o fator de decaimento e o desfasamento temporal

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS

6.1 Conclusões

Este estudo foi desenvolvido com dois objetivos principais. O primeiro é melhorar o desempenho térmico das paredes e telhados para alcançar o conforto térmico e reduzir o consumo de eletricidade, enquanto o segundo é utilizar pneus de automóvel usados como material de enchimento para as paredes e telhados e, conseqüentemente, aliviar um grave problema de gestão de resíduos. Nessa perspectiva, é concebida uma bancada experimental, fabricada, instrumentada para determinar a condutividade térmica da borracha triturada disposta em geometria plana e de diferentes tamanhos de partículas. O equipamento também foi utilizado para testar paredes modulares de diferentes configurações para determinar a resistência térmica global das paredes. Dos resultados conclui-se que a condutividade térmica da borracha cortada em grãos é de cerca de 0,25 W/m.K e está dentro da gama dos valores existentes de acordo com a literatura para materiais isolantes. A condutividade térmica global da parede composta escolhida é de cerca de 0,39 W/m.K. A variação da condutividade térmica com o tamanho das partículas de borracha está na faixa de 10% para a parede composta e 18%, ocorrendo especificamente na camada de borracha.

Para conduzir as simulações e investigação numérica foi desenvolvido e validado um código numérico, onde os resultados disponíveis mostrando um bom acordo. Este código foi utilizado juntamente com os valores experimentais da condutividade térmica da borracha granulada e testados arranjos de paredes para determinar os seus desempenhos térmicos em termos do Fator de Decremento e do Atraso no tempo. Os resultados indicam que o aumento do tamanho da borracha granulada e da espessura da camada cheia de borracha diminui o Fator de Decremento e aumenta o atraso. Por exemplo, o aumento da espessura do espaço preenchido com borracha granulada de 12 cm para 25 cm, diminui o Fator de Decremento e aumenta a defasagem de tempo em 24,5% e 264%, respectivamente. Verificou-se também que, a adição de biomassa na argamassa até 10% e paredes de cor clara como branco por exemplo, diminui o fator de decremento.

Considerando que o valor estimado da massa de borracha granulada por m² de parede é de 29,6 kg/m², então a massa necessária de pneus para uma casa de 100 m² de área construída é de cerca de 5.895 kg. Considerando uma massa média de pneu de automóvel de

6,25 kg e a de pneu de caminhão de 67,5 kg, então 943 pneus de automóvel e 88 pneus de caminhão, podem ser retirados do meio ambiente.

6.2 Sugestões para futuros trabalhos

O modelo apresentado deste trabalho, foi testado exaustivamente para valores de condutividade térmicas obtidas experimentalmente e valores das outras propriedades térmicas obtidas da literatura, onde foi levado em consideração o uso de paredes e tetos em ambientes não climatizados e sem ganhos internos. Como sugestão para futuros estudos, surgem propostas de trabalhos que possam:

Realizar um estudo experimental para determinação das demais propriedades térmicas da borracha de pneus, como: massa específica, calor específico, assim como a absorvidade e emissividade de paredes revestidas com esse material.

Determinação do fluxo de calor e carga térmica contabilizando o efeito da presença de sistemas auxiliares de aquecimento ou de refrigeração, avaliando nesse último a perda de energia elétrica se comparado a sistema não refrigerados.

Estudo de viabilidade econômica na construção da casa de 100m² apresentada, em comparação com a casa de alvenaria convencional, tomando como base, análise Termo-Econômica para um grupo de paredes experimentadas ou simuladas.

REFERÊNCIAS

- _____. NBR 10004: **Resíduos Sólidos** – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.
- _____. NBR 15220-1: **Desempenho térmico de edificações** - Parte 1: Definições, símbolos e unidades. Rio de Janeiro, 2005.
- _____. NBR 15270-1: Componentes cerâmicos – **Blocos e tijolos para alvenaria** - Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2017.
- _____. NBR 15270-2: Componentes cerâmicos – **Blocos e tijolos para alvenaria** - Parte 2: Métodos de ensaios. Rio de Janeiro, 2017.
- _____. NBR 16697: **Cimento Portland** – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.
- _____. NBR NM 248: **Agregados - Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 2003.
- _____. NBR NM 45: **Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios**. Rio de Janeiro, 2006.
- _____. NBR NM 46: **Agregados – Determinação do material fino que passa através da peneira 75 μm por lavagem**. Rio de Janeiro, 2003.
- _____. NBR NM 53: **Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água**. Rio de Janeiro, 2009.
- ABU-JDAYIL, B.; MOURAD, A.; HUSSAIN, A. **Thermal and physical characteristics of polyester–scrap tire composites**. Construction and Building Materials, v. 105, p. 472-479, 2016.
- ALIABDO, A. A.; ELMOATY, A. E. M. A; ABDELBASET, M. M. **Utilization of waste rubber in non-structural applications**. Construction and Building Materials, v. 91, p. 195-207, 2015.
- ALMEIDA JÚNIOR, A. F de. **Reaproveitamento de pneus inservíveis: determinação em laboratório das características do asfalto modificado SBS comparadas às do asfalto com pó de borracha**. Dissertação de Mestrado em Engenharia - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” de Bauru. 2012.
- ALMEIDA, M. M. de O.G. **Simulação térmica de edifícios com um modelo numérico de capacidade térmica variável**. 1994. 216p. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica-FEUP- Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto 1994.
- ALVAREZ, A. L. M. **Uso racional e eficiente de energia elétrica: metodologia para a determinação dos potenciais de conservação dos usos finais em instalações de ensino esimilares**. 1998. Dissertação de Mestrado em Engenharia - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1998.

ANDRADE, H. de S. **Pneus inservíveis: alternativas possíveis de reutilização** - Monografia de conclusão de curso – Universidade Federal de Santa Catarina. Centro Sócio-Econômico. Florianópolis, julho de 2007.

ANIP. **Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos** – Anip em números. Disponível em: <http://www.anip.com.br>. Acessado em: março de 2017.

ANSI/ASHRAE 41.1 – 1986 (reaffirmed 2013) - **Standard method for temperature measurement**. Approved by the ASHRAE Standards Committee on October 26, 1986, and reaffirmed on January 21, 2006; by the ASHRAE Board of Directors on December 12, 1986, and reaffirmed on January 26, 2006; and by the American National Standards Institute on February 18, 1987, and reaffirmed on January 27, 2006.

ARAÚJO, S. J. S. de; SILVA, N. dos S.; MELO, J. P. de; LIMA, E. V. **Análise do sistema de logística reversa de pneus na cidade de São Luís-Ma**. Universidade Estadual do Maranhão – UEMA. Artigo apresentado no XXII-Simpep-2015.

AREBOP - **Associação Nacional das Empresas de Reciclagem de Pneus e Artefatos de Borrachas**. Disponível em: <http://www.arebop.org.br/inservivel.asp>. Acessado em: 29 de outubro 2016.

ASAN, H. & SANCAKTAR, Y. S. **Effects of wall's thermos-physical properties on time lag and decrement factor**, Energy Buildings. 28: 159-166 (1998).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7211: Agregados para concreto - Especificação**. Rio de Janeiro, 2019.

ATAEI, H. **Experimental study of rubber tire aggregates effect on compressive and dynamic load-bearing properties of cylindrical concrete specimens**. Journal of Material Cycles and Waste Management, v. 18, n. 4, p. 665-676, 2016.

ATHENA® Environmental Impact Estimator (ATHENA® EIE) v5.2.0118. Disponível em: www.athenasmi.org

ÁVILA, J. **Estudo paramétrico de paredes térmicas compostas**. Dissertação de Mestrado em Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, Unicamp, – Campinas, SP: 2018.

BARTHOLOMEI, C. L. **Influência da vegetação no conforto térmico urbano e no ambiente construído**. 2003. Tese de Doutorado. Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

BETINI, B. **Onze mil toneladas de lixo foram retiradas do Tietê desde 2002**. Diário de São Paulo, São Paulo, 2002. Disponível em: <http://www.iace.org.br/manchete02.htm>. Acessado em 01 maio de 2017.

BNDES - Panorama da indústria de pneus no Brasil: ciclo de investimentos, novos competidores e a questão do descarte de pneus inservíveis. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n. 25, p. 107-130, mar. 2007. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/2529/1/BS%2025%20Panorama%20da%20ind%C3%BAstria%20de%20pneus%20no%20Brasil_P.pdf. Acessado em: 07 maio 2017.

BOCK, L. Cadeiras feitas com pneus. São Paulo, 10 abr. 2007. Disponível em: http://www.blogdoplaneta.globolog.com.br/archive_2007_05_08_8.html. Acessado em: 13 maio 2017

BONTEMPS, A.; AHMAD, M.; JOHANNÈS, K.; SALLÉE, H. Experimental and modeling study of twin cells with latent heat storage walls. Energy and Buildings n° 43 (2011) P,2456–2461.

BRIDGESTONE, Bridgestone do Brasil. Fabricante de pneus. Disponível em: http://www.pneuseguro.com.br/index.asp?page=partes_do_pneu. Acessado em 02 jan. 2017.

BRUNNER, E. J.; FORD, P. S.; MCNULTY, M. A.; THAYER, M. A. Compact fluorescent lighting and residential natural gas consumption: testing for interactive effects. 2010. Energy Policy, v. 38, p. 1288-1296.

CARBONARI, A.; GRASSI, M. de; PERNA, C. Di; PRINCIPI, P. Numerical and experimental analyses of PCM containing and wich panels for prefabricated walls. Energy and Buildings n° 38 (2006) P,472–483.

CARVALHO FILHO, A. de F. Modelagem e simulação de um sistema de refrigeração por adsorção à energia solar utilizando carvão ativado e etanol como par adsorptivo. Monografia (Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual do Maranhão, São Luis, Maranhão. 2016.

CASTELL, A.; MARTORELL, I.; MEDRANO, M.; PÉREZ, G.; CABEZA, L. F. Experimental study of using PCM in brick constructive solutions for passive cooling. Energy and Buildings, n° 42, 2010. P, 534–540.

CASTRO, J. N. Peredes térmicas. 1991. Tese de Doutorado. Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, Departamento de Engenharia de Térmica e Fluidos, Campinas, 1991.

CAVALCANTI, F. de M. Sá. Paredes trombe no Brasil: Análise do potencial de utilização para aquecimento e refrigeração. 2013. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo e Área de Concentração em Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia. Instituto de Arquitetura e Urbanismo da universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

CEMPRE – Compromisso Empresarial Para Reciclagem. <http://cempre.org.br/artigo-publicacao/ficha-tecnica/id/7/pneus>. Acessado em 27/09/2016.

ÇENGEL, Y. A. & AFSHIN, J. G. Transferência de calor e massa: uma abordagem prática. Porta Alegre, Editora Mc Graw Hill, 2012. 904p.

CIMINO, M. A. **Gerenciamento de pneumáticos inservíveis: análise crítica de procedimentos operacionais e tecnologias para minimização adotadas no território nacional**. 2004. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de São Carlos. São Carlos (SP). Disponível em: http://www.bdt.d.ufscar.br/tde_arquivos/11/TDE-2004-11-24T14:36:19Z-247/Publico/DissMAC.pdf. Acessado em 19 maio 2017.

CONAMA no. 416, de 30 de outubro de 2009. **Resoluções**. Disponível em <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=616>. Acessado em 10 jan. 2017.

CONAMA - **Resolução Nº 258**, 26 de Agosto de 1999 do Conselho Nacional do Meio Ambiente.

COSTA, Ê. da C. **Arquitetura ecológica: condicionamento térmico natural**. 2. ed. São Paulo: Blücher, 1982. 264 p.

DEWITT, D. P. & INCROPERA, F. P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 5ª Edição. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 2003. UERJ. Tradução de: Fundamentals of heat and mass transfer.

DJADOUNI, H; TROUZINE, H.; CORREIA, A. G.; MIRANDA, T. F. da S. **Life cycle assessment of retaining wall backfilled with shredded tires**. The International Journal of Life Cycle Assessment, v. 24, n. 3, p. 581-589, 2019.

DOE - United States of America Department of Energy (2012) **U. S. lighting market characterization**. Solid-State Lighting Program: U.S. Department of Energy. Disponível em: Disponível em: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/2010-lmc-final-jan-2012.pdf> . Acessado em: 11 jan. 2020.

DUFFIE, J. A. & BECKMAN, W. A. **Solar energy thermal processes**. 4. ed. New York, Wiley Interscience, 2013.

ENESCU, D. **A review of thermal comfort models and indicators for indoor environments**. 2017. Renew Sustain Energy Rev. 2017;79:1353–1379. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117308109> [[Crossref](#)], [[Web of Science](#)®], [[Google Scholar](#)]

ENRIQUEZ, E.; FUENTES, V.; CABRERA, M. J.; SEORES, J.; MUÑOZ, D.; MORE, W.; FERNANDEZ, J. F. **Model to evaluate the thermal comfort factor: Dynamic measurement of heat flow in building materials**. Journal of Building Engineering, Volume 20, November 2018, Pages 344-352.

FANGER, P. O. **Thermal confort**. New Work: McGraw-Hill Book Company, 1970.

FERRARI, B. **Uma luz no debate ambiental: a era das lâmpadas incandescentes está chegando ao fim e as novas tecnologias que estão despontando prometem reduzir a conta de luz e o impacto no meio ambiente**. 2012. Revista Exame, v. 46, n. 21, p. 120.

FORTES, R. da R.; CAMPOS JR., O. N. de; SANTIAGO, L. C.; SILVA, A. do C. **Estudo da destinação de pneus usados e inservíveis na Baixada Fluminense – Rj**. ,2009. Centro Federal de Educação Tecnológica (CEFET/RJ).

GALDINO, D. M. dos R. & MONTEIRO, M. do S. L. **Reciclagem de pneus procedimento adotado pelas autoridades teresinenses** - Revista Eletrônica informe econômico Ano 1, n. 1, ago. 2013.

GALLACI, F. **As alternativas para a reciclagem de pneus**. Agência Anhanguera. São Paulo, 2003. Disponível em: <http://www.web-resol.org/arquivoNot/Reciclagem%20de%20pneus%20velhos.htm>. Acessado em: 01 jun. 2017.

GIVONI, B. **Man, climate and architecture**. 2. ed. London, Applied Science Publishers, 1976.

GONÇALVES NETO, V. S & REBÊLO, J. M. M. **Aspectos epidemiológicos do dengue no Município de São Luís, Maranhão, Brasil, 1997-2002**. Cad. Saúde Pública, Vol. 20, n. 5, p. 1424-1431, 2004.

HALL, M. R.; NAJIM, K. B.; HOPFE, C. J. **Transient thermal behaviour of crumb rubber-modified concrete and implications for thermal response and energy efficiency in buildings**. Applied thermal engineering, v. 33, p. 77-85, 2012.

HALLIDAY, D.; KRANE, K. S.; RESNICK, R. **Física 2**. 2ª ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1996. p. 233-234.

ISMAIL, K. A. R. **Janelas térmicas: modelagem e aplicações**. Campinas, SP: Ed. do autor, 2010.

ISMAIL, K. A. R. **Técnicas experimentais em fenômenos de transferência**. Campinas, S.P: Editora do autor, 2000. 488p.

KAMIMURA, E. **Potencial dos resíduos de borracha de pneus pela indústria da construção civil**. 2004. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis.

KANAES, S. E. & JELLE, B. P. **Phase change materials and products for building applications: A state-of-the-art review and future research opportunities**. Energy and Buildings n° 94 (2015) P,150–176.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência energética na arquitetura**. São Paulo: PW Editores, 1997. 188 p.

LI, Y.; ZHANG, S.; WANG, R.; DANG, F. **Potential use of waste tire rubber as aggregate in cement concrete: A comprehensive review**. Construction and Building Materials, v. 225, p. 1183-1201, 2019.

LIMA, J. P. **Modelagem e teste de condutividade térmica em placa de gesso e fibra vegetal para uso na construção civil**. 2005. Trabalho Final de Mestrado Profissional. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.

LIMA, M. J. do R. F. & CARVALHO, R. C. **Estudo sobre o uso e descarte de pneus em São Luís, Maranhão**. Universidade Estadual do Maranhão. 64ª Reunião Anual da SBPC-2012. B. Engenharias - Engenharia de Produção

MARQUES, L. L. **Aplicação de conceitos de conforto térmico passivo na construção civil em São Luís**. 2007. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, 2007.

MARTINS, H. A F. **A utilização da borracha de pneus na pavimentação asfáltica**. 2004. Trabalho de Conclusão de Curso Universidade Anhembí Morumbi no âmbito do Curso de Engenharia Civil com ênfase Ambiental. São Paulo. Disponível em: <http://cursos.anhembí.br/uam/disc/tcc_2004/cd/15%20a%20utilizacao%20da%20borracha.pdf>. Acessado em: 09 jun. 2017.

MATTIOLI, L. M. L.; MONTEIRO, M. A.; FERREIRA, R. H. **Plano de Gerenciamento Integrado de Resíduos Pneumáticos - PGIRPN**. Colaboração Técnica: Rodolfo Carvalho Salgado Penido. Belo Horizonte, novembro de 2009

MEDINA, N. F.; MEDINA, D. F.; OLIVARES, F. H.; NAVACERRADA, M. A. **Mechanical and thermal properties of concrete incorporating rubber and fibres from tyre recycling**. Construction and building Materials, v. 144, p. 563-573, 2017.

MORELLI, D. D. de O. **Paredes verdes vegetação como qualidade ambiental no espaço construído**. 2009. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

MOROSINI, F. **A guerra dos pneus**. Artigo-Revista Casoteca-Latino-Americana de Direito e política pública. 2006 - www.casoteca.org.

MOTTA, F. G. **A cadeia de destinação dos pneus inservíveis – o papel da regulação e do desenvolvimento tecnológico**. Ambiente & Sociedade, Vol. XI, n. 1, p. 167-184, 2008.

NAVAJAS, L. **Adeus, lâmpadas incandescentes**. Revista Consumidor Moderno, São Paulo, 2016.

NAVARRO, L.; GRACIA, A. de; CASTELL, A.; ÁLVAREZ, S.; CABEZA, L. F. **PCM incorporation in a concrete core slab as a thermal storage and supply system: Proof of concept**. Energy and Buildings nº 103 (2015) P,70–82.

NORAIN, A. & KASSIM, U. **A review on thermal comfort assessment factors for Industrialised Building System (IBS) residences**. 2018. American Institute of Physics. AIP Conference Proceedings. <https://doi.org/10.1063/1.5066922>

OIKONOMOU, N. & MAVRIDOU, S. **The use of waste tyre rubber in civil engineering works**. In: Sustainability of construction materials. Wood head Publishing, 2009. p. 213-238.

OLIVEIRA, O. J. & CASTRO, R. **Estudo da destinação e da reciclagem de pneus inservíveis no Brasil**. XXVII Encontro Nacional. de Engenharia de Produção, 2007

ORSI, Álvaro & SIMON, Cristiana Liebel. **Asfalto borracha - uma alternativa ambiental para pneus em desuso**. Disponível em: <http://www.ufrgs.br/ensinodareportagem/meiob/asfaltob.html>. Acessado em 23-10-2016.

OSRAM Opto Semiconductors. **Life cycle assessment of illuminants: a comparison of light bulbs, compact fluorescent lamps and LED lamps**. 2009. Germany. p. 26.

OZEL, M. **Thermal performance and optimum insulation thickness of building walls with different structure materials**. Applied Thermal Engineering. 31, 3854-3863 (2011).

PATANKAR, S. V. **Numerical heat transfer and fluid flow**. Hemisphere Publishing Corporation, Taylor & Francis Group, New York, 1980.

PESSETE, J. B. & PELISSER, F. **Efeito da borracha reciclada de pneus na condutividade térmica de paredes de concreto**. Artigo submetido ao Curso de Engenharia Civil da UNESC (Universidade do Extremo Sul Catarinense) - como requisito parcial para obtenção do Título de Engenheiro Civil, 2012/02.

PINHEIRO, N.; SILVA, E. R.; CARVALHO, R.; LIMA, T. A.; COSTA, H. A. D. **Medição da carga térmica liberada por lâmpadas incandescentes medida em um calorímetro**. 63ª Reunião Anual da SBPC - 2011, Universidade Federal de Goiás, Goiânia.

PIRELLI. **Pneus, informações técnicas**. Disponível em: <http://www.pirelli.com.br/pr/pneumatici/infotek/index.htm>. Acessado em: 07 maio 2017.

PLANETA SUSTENTÁVEL. Disponível em: <http://planetasustentavel.abril.com.br/noticias/brasildescartou-9-anos-2-1-mi-toneladas-pneus-660505.shtml>. Aceso em 27 fev. 2012.

PREFEITURA DE SÃO LUIS. http://www.saoluis.ma.gov.br/projetos.asp?id_projeto=18. Acessado em: 10 de outubro de 2018.

RAJAGOPALAN, S.; SREEHARI, P.; MAHALINGGAM, B.; HANEEFA, K. M. **On mechanical and thermal properties of concretes with rubber as partial replacement to well-graded conventional aggregates**. In: Advances in Materials and Metallurgy. Springer, Singapore, 2019. p. 57-65.

RAMOS. Leonardo Sohn Nogueira. **A logística reversa de pneus inservíveis: o problema da localização dos pontos de coleta**. Dissertação de Mestrado. 2005, 99 p. Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Florianópolis.

SALINI, R. B. **Utilização de borracha reciclada de pneus em misturas asfálticas**. Dissertação de Mestrado, 2000, 120 p. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

SANDRONI, M. & PACHECO, E. B. A V. **O destino dos pneus inservíveis**. 2005. Disponível em: < <http://www.niead.ufrj.br/artigoelen.htm> >. Acessado em: 29 mar. 2017.

SHALABY, A. & KHAN, R.A. **Design of unsurfaced roads constructed with large-size shredded rubber tires: a case study**. Resour Conserv Recycl, 2005; 44:318-332.

SIDDIKA, A.; MAMU, A. AL; ALYOUSEF, R.; AMRAM, M.; ASLANI, F.; ALABDULJABBAR, H. **Properties and utilizations of waste tire rubber in concrete: A review**. Construction and Building Materials, v. 224, p. 711-731, 2019.

SIMPSON, R.S. **Lighting control: technology and applications**. 2008. Focal Press. p. 575.

TORRES, L. A.; SOUZA, M. C. de S. e; MENEZES, A. L. R. de; CABRAL, K. C. **Uso de resíduo de pneus inservíveis em substituição ao agregado fino em argamassa de revestimento**. Engineering Sciences, v. 5, n. 1, p. 14-23, 2017.

WANG, Q. & ZHAO, C. Y. **Parametric investigations of using a PCM curtain for energy efficient buildings**. Energy and Buildings 94 (2015) 33–42.

WANG, Z.; WANG, J.; HE, Y.; LIU, Y.; LIN, B.; HONG, T. **Dimension analysis of subjective thermal comfort metrics based on ASHRAE Global Thermal Comfort Database using machine learning**. Journal of Building Engineering n° 29, May 2020, 10112

WANG, Z.; ZHANG, H.; HE, Y.; LUO, M.; LI, Z.; HONG, T.; LIN, B. **Revisiting individual and group differences in thermal comfort based on ASHRAE Database**. Energy and Buildings, n° 219, July 2020, 110017.

YESILATA, B.; BULUT, H.; TURGUT, P. **Experimental study on thermal behavior of a building structure using rubberized exterior-walls**. Energy and Buildings, v. 43, n. 2-3, p. 393-399, 2011.

ZHANG, H.; YANG, R.; YOU, S.; ZHENG, W.; ZHENG, X.; YE, T. **The CPMV index for evaluating indoor thermal comfort in buildings with solar radiation**. Building and Environment, Volume 134, 15 April 2018, Pages 1-9.

ZHU, NA; HU, P.; LEI, YU; JIANG, Z. **Numerical study on ground source heat pump integrated with phase change material cooling storage system in office building**. Applied Thermal Engineering 87 (2015) 615 e 623.

APÊNDICES

APÊNDICE A – ENSAIO GRANULOMÉTRICOS DOS PNEUS
APÊNDICE A1 - CARACTERIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS GRÃOS
DE PNEUS-1,8cm³ - (25,7 mm)

CARACTERIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS GRÃOS DOS PNEUS (GRÃO NORMAL)					
ITEM	GRANULADO	DIMENSÕES (CM)			VOLUME (CM ³) (COMPxLARGxESP)
		COMPRIMENTO	LARGURA	ESPESSURA	
01	Amostra – 001	2,50	1,56	0,90	3,51
02	Amostra – 002	2,00	1,95	0,70	2,73
03	Amostra – 003	1,70	1,60	1,00	2,72
04	Amostra – 004	2,10	1,85	0,70	2,72
05	Amostra – 005	2,45	2,00	0,60	2,94
06	Amostra – 006	1,85	1,70	0,55	1,73
07	Amostra – 007	2,45	1,44	1,00	3,53
08	Amostra – 008	1,98	1,92	0,70	2,66
09	Amostra – 009	1,85	1,75	0,70	2,27
10	Amostra – 010	2,20	1,65	0,60	2,18
11	Amostra – 011	2,10	1,80	0,60	2,27
12	Amostra – 012	2,30	1,20	0,70	1,93
13	Amostra – 013	2,00	1,30	0,60	1,56
14	Amostra – 014	1,90	1,80	0,65	2,22
15	Amostra – 015	2,20	1,55	0,60	2,05
16	Amostra – 016	2,20	1,55	0,90	3,07
17	Amostra – 017	1,70	1,70	0,70	2,02
18	Amostra – 018	2,30	1,70	0,95	3,71
19	Amostra – 019	2,20	1,90	0,65	2,72
20	Amostra – 020	2,45	1,80	0,70	3,09
21	Amostra – 021	1,60	1,48	1,00	2,37
22	Amostra – 022	1,75	1,30	0,95	2,16
23	Amostra – 023	1,60	1,30	0,60	1,25
24	Amostra – 024	1,95	1,60	0,70	2,18
25	Amostra – 025	2,30	1,50	0,70	2,42
26	Amostra – 026	2,40	1,30	0,60	1,87
27	Amostra – 027	2,20	1,30	0,65	1,86
28	Amostra – 028	2,20	1,50	0,90	2,97
29	Amostra – 029	1,75	1,40	0,80	1,96
30	Amostra – 030	1,90	1,55	0,65	1,91
31	Amostra – 031	1,90	1,60	0,65	1,98
32	Amostra – 032	1,85	1,30	0,90	2,16
33	Amostra – 033	1,90	1,60	0,70	2,13
34	Amostra – 034	1,95	1,20	0,80	1,87
35	Amostra – 035	1,40	1,40	0,70	1,37

CARACTERIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS GRÃOS DOS PNEUS (GRÃO NORMAL)					
ITEM	GRANULADO	DIMENSÕES (CM)			VOLUME (CM ³) (COMPxLARGxESP)
		COMPRIMENTO	LARGURA	ESPESSURA	
36	Amostra – 036	1,50	1,50	0,60	1,35
37	Amostra – 037	1,80	1,65	0,85	2,52
38	Amostra – 038	1,60	1,30	0,55	1,14
39	Amostra – 039	1,85	1,60	0,40	1,18
40	Amostra – 040	1,60	1,55	0,50	1,24
41	Amostra – 041	2,00	1,60	0,80	2,56
42	Amostra – 042	2,00	1,30	0,60	1,56
43	Amostra – 043	1,70	1,40	0,70	1,67
44	Amostra – 044	1,90	1,40	0,60	1,60
45	Amostra – 045	1,50	1,45	0,70	1,52
46	Amostra – 046	1,90	1,60	0,90	2,74
47	Amostra – 047	1,50	1,40	0,90	1,89
48	Amostra – 048	1,90	1,60	0,75	2,28
49	Amostra – 049	1,30	1,30	0,60	1,01
50	Amostra – 050	1,80	1,40	0,60	1,51
51	Amostra – 051	1,90	1,50	0,60	1,71
52	Amostra – 052	1,65	1,45	0,30	0,72
53	Amostra – 053	1,60	1,60	0,65	1,66
54	Amostra – 054	1,70	1,40	0,60	1,43
55	Amostra – 055	1,80	1,40	0,70	1,76
56	Amostra – 056	1,75	1,60	0,60	1,68
57	Amostra – 057	1,80	1,60	0,60	1,73
58	Amostra – 058	1,50	1,30	0,50	0,98
59	Amostra – 059	1,60	1,30	0,75	1,56
60	Amostra – 060	1,60	1,55	0,55	1,36
61	Amostra – 061	2,20	1,60	0,90	3,17
62	Amostra – 062	2,10	1,40	0,50	1,47
63	Amostra – 063	1,60	1,35	0,70	1,51
64	Amostra – 064	1,80	1,60	0,90	2,59
65	Amostra – 065	2,10	1,80	0,50	1,89
66	Amostra – 066	1,50	1,30	1,00	1,95
67	Amostra – 067	1,70	1,10	1,00	1,87
68	Amostra – 068	2,00	1,70	0,60	2,04
69	Amostra – 069	1,55	1,40	0,80	1,74
70	Amostra – 070	2,30	1,60	0,80	2,94

CARACTERIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS GRÃOS DOS PNEUS (GRÃO NORMAL)					
ITEM	GRANULADO	DIMENSÕES (CM)			VOLUME (CM ³) (COMPxLARGxESP)
		COMPRIMENTO	LARGURA	ESPESSURA	
71	Amostra – 071	2,00	1,60	0,60	1,92
72	Amostra – 072	1,90	1,65	0,90	2,82
73	Amostra – 073	1,50	1,10	0,70	1,16
74	Amostra – 074	1,60	1,20	0,50	0,96
75	Amostra – 075	1,80	1,35	0,75	1,82
76	Amostra – 076	1,90	1,30	0,30	0,74
77	Amostra – 077	1,80	1,80	0,50	1,62
78	Amostra – 078	1,40	1,40	0,80	1,57
79	Amostra – 079	2,00	1,40	0,70	1,96
80	Amostra – 080	1,50	1,50	0,60	1,35
81	Amostra – 081	1,60	1,40	0,55	1,23
82	Amostra – 082	1,80	1,20	0,70	1,51
83	Amostra – 083	1,65	1,60	0,60	1,58
84	Amostra – 084	1,70	1,50	0,55	1,40
85	Amostra – 085	1,70	1,50	0,60	1,53
86	Amostra – 086	2,10	1,20	0,55	1,39
87	Amostra – 087	1,60	1,40	0,60	1,34
88	Amostra – 088	1,70	1,30	0,65	1,44
89	Amostra – 089	1,50	1,30	0,50	0,98
90	Amostra – 090	1,45	1,45	0,70	1,47
91	Amostra – 091	1,70	1,10	0,70	1,31
92	Amostra – 092	1,70	0,70	0,85	1,01
93	Amostra – 093	1,55	1,15	0,50	0,89
94	Amostra – 094	1,55	1,35	0,50	1,05
95	Amostra – 095	1,45	1,35	0,60	1,17
96	Amostra – 096	1,40	1,40	0,50	0,98
97	Amostra – 097	1,80	1,10	0,50	0,99
98	Amostra – 098	1,40	1,30	0,50	0,91
99	Amostra – 099	1,30	1,30	0,50	0,85
100	Amostra – 100	1,45	1,35	0,50	0,98
MÉDIA ARITMÉTICA ==>		1,82	1,47	0,67	1,80

**APÊNDICE A2 - CARACTERIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS GRÃOS
DE PNEUS-0,9cm³ - (12,8 mm)**

CARACTERIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS GRÃOS DOS PNEUS (1/2 GRÃO)					
ITEM	GRANULADO	DIMENSÕES (CM)			VOLUME (CM ³) (COMPxLARGxESP)
		COMPRIMENTO	LARGURA	ESPESSURA	
01	Amostra – 001	1,10	1,00	0,70	0,77
02	Amostra – 002	1,30	1,20	0,30	0,47
03	Amostra – 003	1,15	1,10	0,60	0,76
04	Amostra – 004	1,70	0,90	0,65	0,99
05	Amostra – 005	1,60	1,15	0,90	1,66
06	Amostra – 006	1,20	1,10	0,90	1,19
07	Amostra – 007	1,15	0,90	0,90	0,93
08	Amostra – 008	1,75	1,55	0,55	1,49
09	Amostra – 009	1,20	0,75	0,60	0,54
10	Amostra – 010	1,30	1,15	0,65	0,97
11	Amostra – 011	1,20	1,10	1,00	1,32
12	Amostra – 012	1,10	1,00	0,70	0,77
13	Amostra – 013	1,25	1,20	0,65	0,98
14	Amostra – 014	1,10	1,15	0,70	0,89
15	Amostra – 015	1,40	1,10	0,80	1,23
16	Amostra – 016	1,15	1,05	0,55	0,66
17	Amostra – 017	1,75	0,95	0,50	0,83
18	Amostra – 018	1,75	1,00	0,50	0,88
19	Amostra – 019	0,90	0,70	0,70	0,44
20	Amostra – 020	1,70	0,85	0,50	0,72
21	Amostra – 021	1,05	0,60	0,80	0,50
22	Amostra – 022	1,80	0,95	0,55	0,94
23	Amostra – 023	1,55	0,95	0,50	0,74
24	Amostra – 024	1,20	1,05	0,85	1,07
25	Amostra – 025	1,25	1,00	1,10	1,38
26	Amostra – 026	1,30	1,10	0,95	1,36
27	Amostra – 027	1,25	0,70	0,80	0,70
28	Amostra – 028	1,90	1,15	0,90	1,97
29	Amostra – 029	1,50	1,40	0,90	1,89
30	Amostra – 030	1,85	1,65	0,70	2,14
31	Amostra – 031	1,10	0,95	0,55	0,57
32	Amostra – 032	1,85	1,05	0,55	1,07
33	Amostra – 033	1,10	1,00	0,65	0,72
34	Amostra – 034	1,40	0,90	0,60	0,76
35	Amostra – 035	1,10	1,00	0,75	0,83

CARACTERIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS GRÃOS DOS PNEUS (1/2 GRÃO)					
ITEM	GRANULADO	DIMENSÕES (CM)			VOLUME (CM ³) (COMPxLARGxESP)
		COMPRIMENTO	LARGURA	ESPESSURA	
36	Amostra – 036	1,35	1,00	0,55	0,74
37	Amostra – 037	1,90	0,85	0,60	0,97
38	Amostra – 038	1,75	0,85	0,80	1,19
39	Amostra – 039	1,65	0,75	0,55	0,68
40	Amostra – 040	1,20	1,05	0,40	0,50
41	Amostra – 041	1,60	1,10	0,80	1,41
42	Amostra – 042	1,35	1,10	0,60	0,89
43	Amostra – 043	1,60	1,00	0,60	0,96
44	Amostra – 044	1,10	1,00	0,70	0,77
45	Amostra – 045	1,20	1,00	0,50	0,60
46	Amostra – 046	1,60	0,85	0,70	0,95
47	Amostra – 047	1,50	1,25	0,55	1,03
48	Amostra – 048	1,60	0,90	0,50	0,72
49	Amostra – 049	1,30	0,85	0,45	0,50
50	Amostra – 050	1,55	0,90	0,50	0,70
51	Amostra – 051	1,80	1,25	0,60	1,35
52	Amostra – 052	1,70	1,00	0,80	1,36
53	Amostra – 053	1,15	0,85	0,60	0,59
54	Amostra – 054	1,40	0,75	0,60	0,63
55	Amostra – 055	1,40	0,60	0,70	0,59
56	Amostra – 056	1,55	0,90	0,55	0,77
57	Amostra – 057	1,30	0,90	0,80	0,94
58	Amostra – 058	1,30	1,10	1,15	1,64
59	Amostra – 059	1,50	1,15	0,55	0,95
60	Amostra – 060	1,80	0,85	0,70	1,07
61	Amostra – 061	1,35	1,00	0,45	0,61
62	Amostra – 062	1,15	0,80	0,75	0,69
63	Amostra – 063	1,20	1,10	0,60	0,79
64	Amostra – 064	1,80	0,95	0,55	0,94
65	Amostra – 065	1,50	1,20	0,70	1,26
66	Amostra – 066	1,35	1,00	0,50	0,68
67	Amostra – 067	1,25	0,80	0,45	0,45
68	Amostra – 068	1,30	1,10	0,75	1,07
69	Amostra – 069	1,45	0,80	0,90	1,04
70	Amostra – 070	1,90	1,30	0,85	2,10

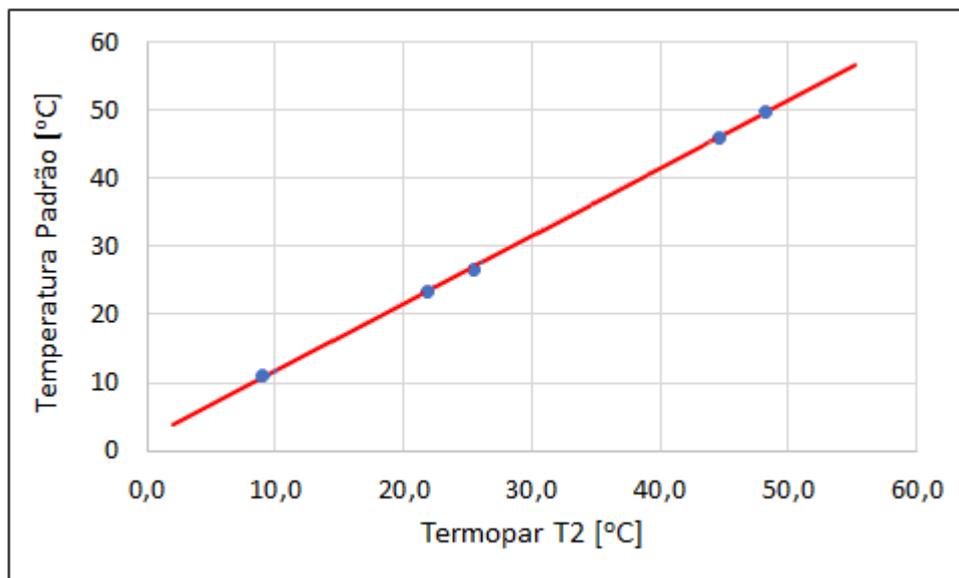
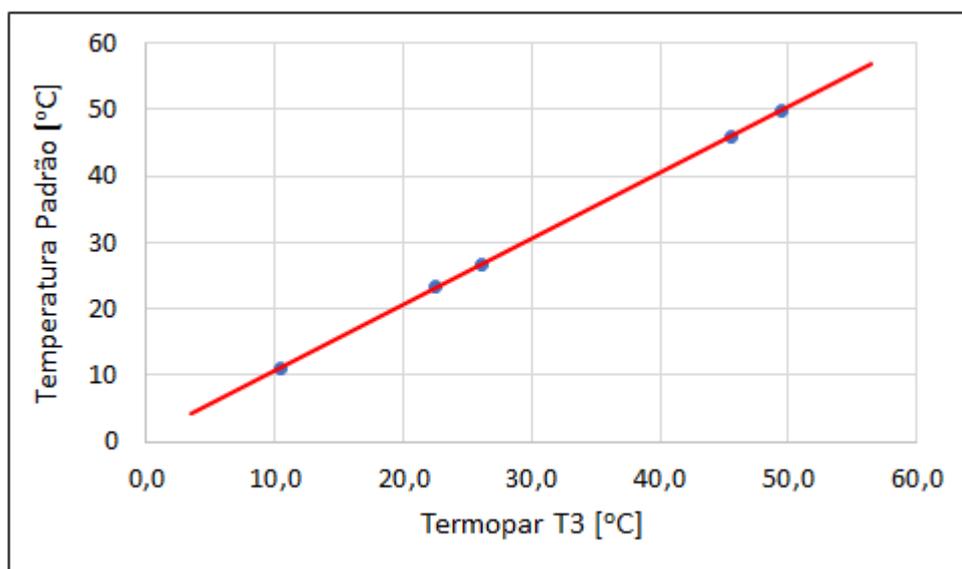
CARACTERIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS GRÃOS DOS PNEUS (1/2 GRÃO)					
ITEM	GRANULADO	DIMENSÕES (CM)			VOLUME (CM ³) (COMPxLARGxESP)
		COMPRIMENTO	LARGURA	ESPESSURA	
71	Amostra – 071	1,15	0,90	0,55	0,57
72	Amostra – 072	1,50	0,70	0,80	0,84
73	Amostra – 073	1,70	0,90	0,40	0,61
74	Amostra – 074	1,40	0,90	0,55	0,69
75	Amostra – 075	1,70	1,10	0,40	0,75
76	Amostra – 076	1,20	1,00	0,60	0,72
77	Amostra – 077	1,05	0,80	1,10	0,92
78	Amostra – 078	1,20	0,75	0,65	0,59
79	Amostra – 079	1,50	0,70	0,55	0,58
80	Amostra – 080	1,10	1,00	0,80	0,88
81	Amostra – 081	1,40	1,10	0,45	0,69
82	Amostra – 082	1,60	1,15	0,70	1,29
83	Amostra – 083	1,60	1,10	0,70	1,23
84	Amostra – 084	1,50	1,10	0,85	1,40
85	Amostra – 085	1,35	0,90	0,80	0,97
86	Amostra – 086	1,10	0,90	0,75	0,74
87	Amostra – 087	1,45	1,10	0,60	0,96
88	Amostra – 088	1,55	0,95	0,50	0,74
89	Amostra – 089	1,15	0,75	0,60	0,52
90	Amostra – 090	1,50	1,10	0,40	0,66
91	Amostra – 091	1,30	0,60	0,80	0,62
92	Amostra – 092	1,30	1,20	0,60	0,94
93	Amostra – 093	1,60	1,00	0,45	0,72
94	Amostra – 094	1,15	0,80	0,55	0,51
95	Amostra – 095	1,10	0,65	1,05	0,75
96	Amostra – 096	1,15	0,80	0,95	0,87
97	Amostra – 097	1,30	1,25	0,45	0,73
98	Amostra – 098	1,20	1,05	0,50	0,63
99	Amostra – 099	1,25	0,65	0,50	0,41
100	Amostra – 100	1,35	0,55	0,65	0,48
MÉDIA ARITMÉTICA ==>		1,40	0,98	0,66	0,90

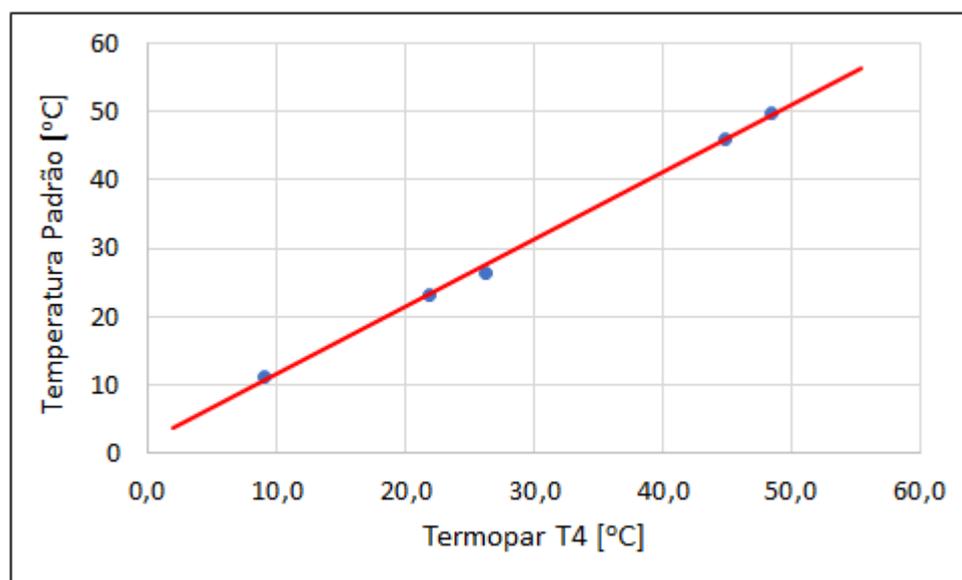
**APÊNDICE A3 - CARACTERIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS GRÃOS
DE PNEUS-0,45cm³ - (6,4 mm)**

CARACTERIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS GRÃOS DOS PNEUS (1/4 GRÃO)					
ITEM	GRANULADO	DIMENSÕES (CM)			VOLUME (CM ³) (COMPxLARGxESP)
		COMPRIMENTO	LARGURA	ESPESSURA	
01	Amostra – 001	0,80	0,75	0,60	0,36
02	Amostra – 002	1,15	0,85	0,60	0,59
03	Amostra – 003	0,85	0,90	0,60	0,46
04	Amostra – 004	1,00	0,85	0,55	0,47
05	Amostra – 005	0,90	0,90	0,50	0,41
06	Amostra – 006	1,25	0,75	0,65	0,61
07	Amostra – 007	1,35	0,70	0,70	0,66
08	Amostra – 008	0,80	0,60	0,65	0,31
09	Amostra – 009	0,85	0,60	0,55	0,28
10	Amostra – 010	1,35	0,85	0,50	0,57
11	Amostra – 011	0,80	0,85	0,60	0,41
12	Amostra – 012	1,00	0,75	0,60	0,45
13	Amostra – 013	1,20	0,80	0,70	0,67
14	Amostra – 014	0,75	0,90	0,60	0,41
15	Amostra – 015	1,00	0,60	0,80	0,48
16	Amostra – 016	0,80	0,85	0,60	0,41
17	Amostra – 017	0,95	0,80	0,70	0,53
18	Amostra – 018	1,00	0,70	0,50	0,35
19	Amostra – 019	0,85	0,70	0,50	0,30
20	Amostra – 020	1,15	0,60	0,55	0,38
21	Amostra – 021	1,30	0,60	0,60	0,47
22	Amostra – 022	1,00	0,65	0,60	0,39
23	Amostra – 023	1,10	0,80	0,60	0,53
24	Amostra – 024	0,85	0,75	0,60	0,38
25	Amostra – 025	1,00	0,75	0,50	0,38
26	Amostra – 026	1,00	0,70	0,50	0,35
27	Amostra – 027	1,35	0,90	0,60	0,73
28	Amostra – 028	0,75	0,75	0,60	0,34
29	Amostra – 029	1,25	0,75	0,50	0,47
30	Amostra – 030	0,85	0,65	1,05	0,58
31	Amostra – 031	0,85	0,75	0,95	0,61
32	Amostra – 032	0,95	0,70	0,50	0,33
33	Amostra – 033	1,00	0,80	0,50	0,40
34	Amostra – 034	0,90	0,90	0,55	0,45
35	Amostra – 035	0,95	0,85	0,65	0,52

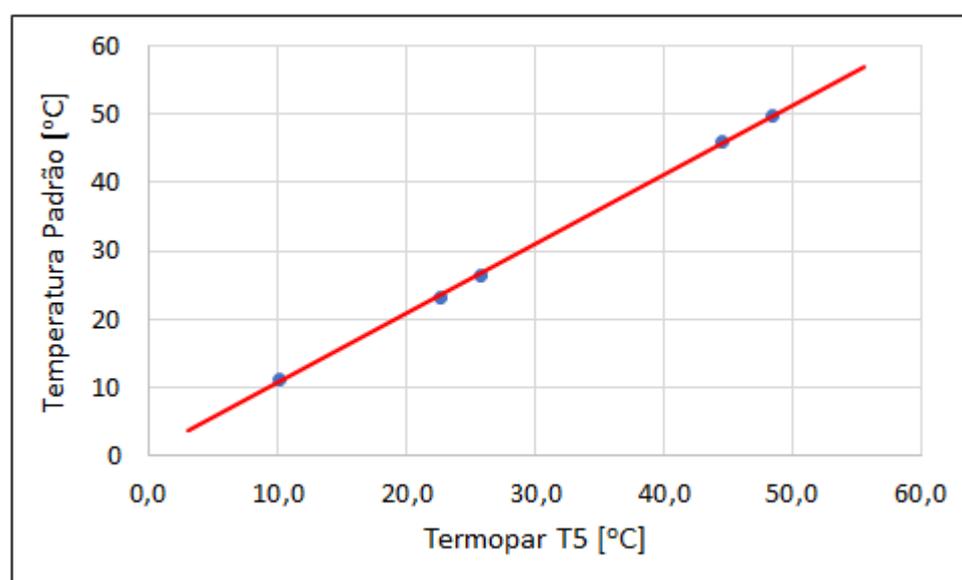
CARACTERIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS GRÃOS DOS PNEUS (1/4 GRÃO)					
ITEM	GRANULADO	DIMENSÕES (CM)			VOLUME (CM ³) (COMPxLARGxESP)
		COMPRIMENTO	LARGURA	ESPESSURA	
36	Amostra – 036	0,90	0,90	0,85	0,69
37	Amostra – 037	0,75	0,60	0,60	0,27
38	Amostra – 038	1,20	0,70	0,70	0,59
39	Amostra – 039	1,05	0,75	0,95	0,75
40	Amostra – 040	1,30	0,60	0,50	0,39
41	Amostra – 041	1,00	0,55	0,85	0,47
42	Amostra – 042	1,00	0,85	0,60	0,51
43	Amostra – 043	0,75	0,90	0,50	0,34
44	Amostra – 044	1,00	0,60	0,65	0,39
45	Amostra – 045	1,20	0,70	0,40	0,34
46	Amostra – 046	0,85	0,60	0,65	0,33
47	Amostra – 047	1,15	0,80	0,45	0,41
48	Amostra – 048	1,10	0,65	0,75	0,54
49	Amostra – 049	1,00	0,60	0,50	0,30
50	Amostra – 050	0,75	0,70	0,60	0,32
51	Amostra – 051	0,70	0,60	0,65	0,27
52	Amostra – 052	1,15	0,90	0,50	0,52
53	Amostra – 053	1,00	0,70	0,50	0,35
54	Amostra – 054	1,10	0,80	0,45	0,40
55	Amostra – 055	0,90	0,85	0,50	0,38
56	Amostra – 056	0,85	0,80	0,60	0,41
57	Amostra – 057	0,85	0,70	0,90	0,54
58	Amostra – 058	1,05	0,85	0,50	0,45
59	Amostra – 059	0,95	0,75	0,80	0,57
60	Amostra – 060	1,00	0,80	0,60	0,48
61	Amostra – 061	0,90	0,90	0,55	0,45
62	Amostra – 062	0,90	0,80	0,60	0,43
63	Amostra – 063	1,15	0,80	0,50	0,46
64	Amostra – 064	0,85	0,80	0,50	0,34
65	Amostra – 065	0,95	0,60	0,60	0,34
66	Amostra – 066	1,00	0,75	0,70	0,53
67	Amostra – 067	0,85	0,70	0,85	0,51
68	Amostra – 068	1,00	0,60	0,70	0,42
69	Amostra – 069	1,15	0,60	1,00	0,69
70	Amostra – 070	1,00	0,70	0,50	0,35

CARACTERIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS GRÃOS DOS PNEUS (1/4 GRÃO)					
ITEM	GRANULADO	DIMENSÕES (CM)			VOLUME (CM ³) (COMPxLARGxESP)
		COMPRIMENTO	LARGURA	ESPESSURA	
71	Amostra – 071	0,70	0,85	0,50	0,30
72	Amostra – 072	1,00	0,80	0,60	0,48
73	Amostra – 073	0,80	0,75	0,90	0,54
74	Amostra – 074	1,00	0,85	0,45	0,38
75	Amostra – 075	1,00	0,85	0,85	0,72
76	Amostra – 076	1,05	0,60	0,85	0,54
77	Amostra – 077	0,90	0,80	0,60	0,43
78	Amostra – 078	0,90	0,80	0,55	0,40
79	Amostra – 079	0,90	0,80	0,60	0,43
80	Amostra – 080	1,00	0,90	0,85	0,77
81	Amostra – 081	0,90	0,65	0,70	0,41
82	Amostra – 082	1,00	0,70	0,50	0,35
83	Amostra – 083	1,05	0,60	0,45	0,28
84	Amostra – 084	0,80	0,80	0,80	0,51
85	Amostra – 085	0,85	0,70	0,70	0,42
86	Amostra – 086	1,10	0,70	0,90	0,69
87	Amostra – 087	0,80	0,80	0,75	0,48
88	Amostra – 088	0,80	0,80	0,70	0,45
89	Amostra – 089	0,85	0,85	0,80	0,58
90	Amostra – 090	0,90	0,60	0,80	0,43
91	Amostra – 091	0,80	0,75	0,90	0,54
92	Amostra – 092	1,00	0,85	0,80	0,68
93	Amostra – 093	1,00	0,85	0,75	0,64
94	Amostra – 094	1,00	0,80	0,60	0,48
95	Amostra – 095	0,85	0,75	0,40	0,26
96	Amostra – 096	0,75	0,45	0,50	0,17
97	Amostra – 097	0,90	0,80	0,45	0,32
98	Amostra – 098	0,80	0,60	0,55	0,26
99	Amostra – 099	0,95	0,80	0,55	0,42
100	Amostra – 100	0,90	0,60	0,70	0,38
MÉDIA ARITMÉTICA =>		0,96	0,75	0,63	0,45

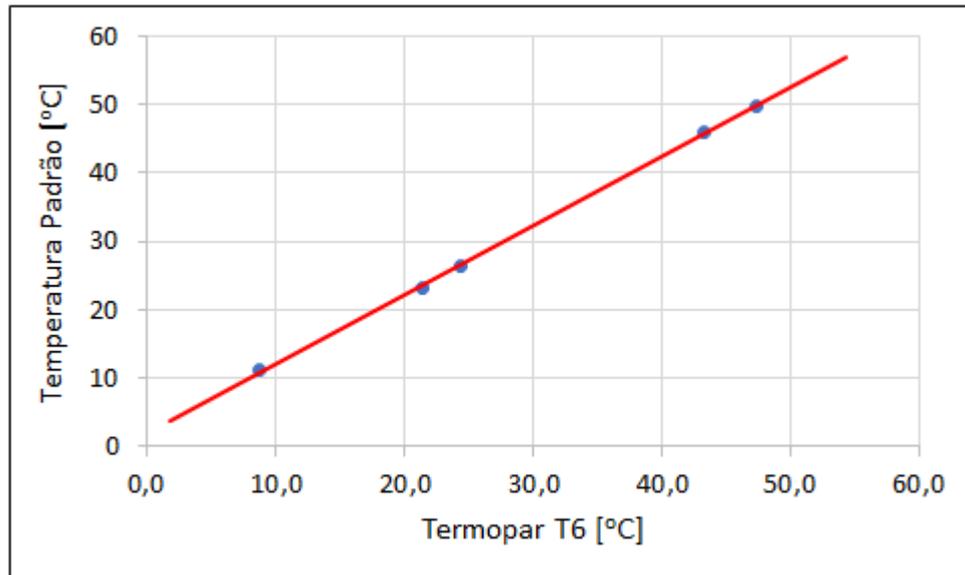
APÊNDICE B–CURVA DE CALIBRAÇÃO DOS TERMOPARES**B1 - CALIBRAÇÃO DO TERMOPAR – T2****B2 - CALIBRAÇÃO DO TERMOPAR – T3**



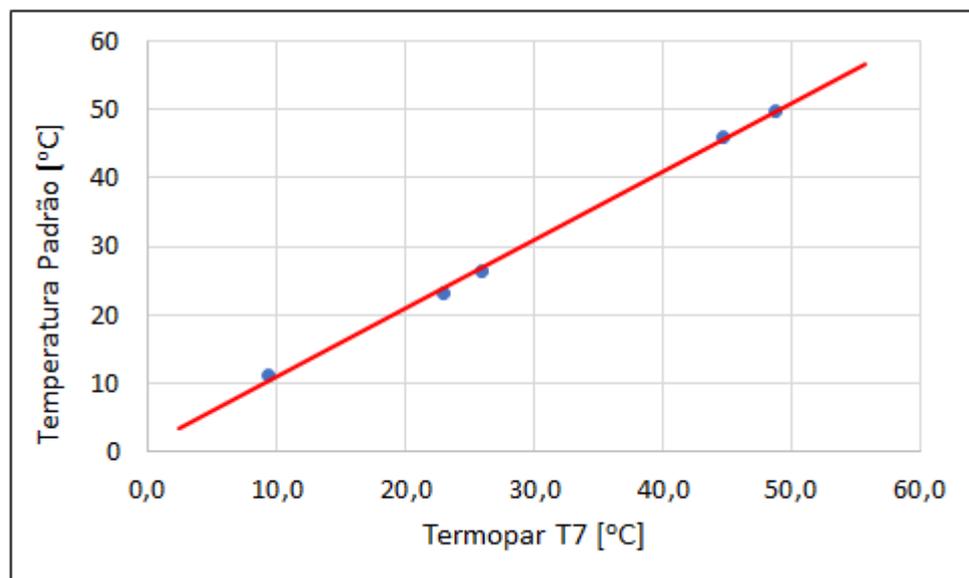
B3 - CALIBRAÇÃO DO TERMOPAR – T4



B4 - CALIBRAÇÃO DO TERMOPAR – T5



B5 - CALIBRAÇÃO DO TERMOPAR – T6



B6 - CALIBRAÇÃO DO TERMOPAR – T7

APÊNDICE C – RESUMO DE DADOS E RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

APÊNDICE C1 – RESUMO DE DADOS PARA AS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS DAS PAREDES E TETOS

RESUMO DE DADOS PARA AS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS DAS PAREDES-TRABALHO DE TESE													
TESE-UBIRACI SILVA NASCIMENTO-O-DINTER-UNICAMP													
SIMULAÇÃO	GRUPOS	DESCRIÇÃO DA PAREDE	ESPESURAS-(m)					total e	CONDUT. TÉRMICA-(W/m.K)				
			e1	e2	e3	e4	e5		k1	k2	k3	k4	k5
S1		PAREDE MISTA PADRÃO-P1-(1,8cm3)	0,025	0,025	0,05	0,025	0,025	0,15	0,72	0,72	0,25	0,72	0,72
S2	(G1)	PAREDE MISTA PADRÃO-P2-(0,9cm3)	0,025	0,025	0,05	0,025	0,025	0,15	0,72	0,72	0,26	0,72	0,72
S3	Granulometria	PAREDE MISTA PADRÃO-P3-(0,45cm3)	0,025	0,025	0,05	0,025	0,025	0,15	0,72	0,72	0,27	0,72	0,72
S4		PAREDE MISTA PADRÃO-P4-(3,2mm)	0,025	0,025	0,05	0,025	0,025	0,15	0,72	0,72	0,28	0,72	0,72
S5		PAREDE MISTA PADRÃO-P5-(2,0mm)	0,025	0,025	0,05	0,025	0,025	0,15	0,72	0,72	0,30	0,72	0,72
S6		PAREDE SIMPLES CONVENCIONAL-P6	0,025	0,025	0,05	0,025	0,025	0,15	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72
S7		PAREDE MISTA PADRÃO-P1-e=12cm	0,025	0,025	0,02	0,025	0,025	0,12	0,72	0,72	0,25	0,72	0,72
S8	(G2)	PAREDE MISTA PADRÃO-P1-e=13cm	0,025	0,025	0,03	0,025	0,025	0,13	0,72	0,72	0,25	0,72	0,72
S1	Espessura	PAREDE MISTA PADRÃO-P1-e=15cm	0,025	0,025	0,05	0,025	0,025	0,15	0,72	0,72	0,25	0,72	0,72
S9		PAREDE MISTA PADRÃO-P1-e=20cm	0,025	0,025	0,10	0,025	0,025	0,20	0,72	0,72	0,25	0,72	0,72
S10		PAREDE MISTA PADRÃO-P1-e=25cm	0,025	0,025	0,15	0,025	0,025	0,25	0,72	0,72	0,25	0,72	0,72
S11		PAREDE PADRÃO-P1-BRANCA	0,025	0,025	0,05	0,025	0,025	0,15	0,72	0,72	0,25	0,72	0,72
S12	(G3)	PAREDE PADRÃO-P1-VERDE	0,025	0,025	0,05	0,025	0,025	0,15	0,72	0,72	0,25	0,72	0,72
S1	Cores	PAREDE PADRÃO-P1-NATURAL	0,025	0,025	0,05	0,025	0,025	0,15	0,72	0,72	0,25	0,72	0,72
S13		PAREDE PADRÃO-P1-VERMELHO	0,025	0,025	0,05	0,025	0,025	0,15	0,72	0,72	0,25	0,72	0,72
S14		PAREDE PADRÃO-P1-PRETA	0,025	0,025	0,05	0,025	0,025	0,15	0,72	0,72	0,25	0,72	0,72
S16	(G4)	PAREDE PADRÃO-P1-MADEIRA	0,025	0,025	0,05	0,025	0,025	0,15	0,19	0,19	0,25	0,19	0,19
S1	Material de	PAREDE PADRÃO-P1-ALVENARIA	0,025	0,025	0,05	0,025	0,025	0,15	0,72	0,72	0,25	0,72	0,72
S17	Construção	PAREDE PADRÃO-P1-CONCRETO	0,025	0,025	0,05	0,025	0,025	0,15	1,40	1,40	0,25	1,40	1,40
S15		PAREDE PADRÃO-P1-GESSO	0,025	0,025	0,05	0,025	0,025	0,15	0,81	0,81	0,25	0,81	0,81
S18		PAREDE PADRÃO-P1-ARG.0%BIOM.	0,025	0,025	0,05	0,025	0,025	0,15	0,53	0,53	0,25	0,53	0,53
S19	(G5)	PAREDE PADRÃO-P1-ARG.5%BIOM.	0,025	0,025	0,05	0,025	0,025	0,15	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
S20	Biomassa	PAREDE PADRÃO-P1-ARG.10%BIOM.	0,025	0,025	0,05	0,025	0,025	0,15	0,18	0,18	0,25	0,18	0,18
S21		PAREDE PADRÃO-P1-ARG.20%BIOM.	0,025	0,025	0,05	0,025	0,025	0,15	0,20	0,20	0,25	0,20	0,20
S22		PAREDE PADRÃO-P1-ARG.30%BIOM.	0,025	0,025	0,05	0,025	0,025	0,15	0,19	0,19	0,25	0,19	0,19
S23	(G6)-Paredes	PAREDE SIMPLES REB. EXPERIMENT.	0,025	0,025	0,05	0,025	0,025	0,15	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92
S25		LAJE-BORRAC.,REVEST.CINZA e=12cm	0,01	0,02	0,03	0,03	0,03	0,12	0,92	0,25	1,40	1,40	1,40
S26	(G7)	LAJE-BORRAC.,REVEST.CINZA e=13cm	0,01	0,03	0,03	0,03	0,03	0,13	0,92	0,25	1,40	1,40	1,40
S24	Teto-Laje	LAJE-BORRAC.,REVEST.CINZA e=15cm	0,01	0,05	0,03	0,03	0,03	0,15	0,92	0,25	1,40	1,40	1,40
S27	Espessura	LAJE-BORRAC.,REVEST.CINZA e=20cm	0,01	0,10	0,03	0,03	0,03	0,20	0,92	0,25	1,40	1,40	1,40
S28		LAJE-BORRAC.,REVEST.CINZA e=25cm	0,01	0,15	0,03	0,03	0,03	0,25	0,92	0,25	1,40	1,40	1,40

RESUMO DE DADOS PARA AS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS DAS PAREDES-TRABALHO DE TESE												
TESE-UBIRACI SILVA NASCIMENTO-O-DINTER-UNICAMP												
SIMULAÇÃO	MASSA ESPECÍFICA-(Kg/m3)					CALOR ESPECÍFICO-(J/Kg.K)					ABSOR	EMISS
	p1	p2	p3	p4	p5	c1	c2	c3	c4	c5	alfa	epsilon
S1	1922	1922	1100	1922	1922	835	835	2010	835	835	0,63	0,93
S2	1922	1922	1100	1922	1922	835	835	2010	835	835	0,63	0,93
S3	1922	1922	1100	1922	1922	835	835	2010	835	835	0,63	0,93
S4	1922	1922	1100	1922	1922	835	835	2010	835	835	0,63	0,93
S5	1922	1922	1100	1922	1922	835	835	2010	835	835	0,63	0,93
S6	1922	1922	1922	1922	1922	835	835	835	835	835	0,63	0,93
S7	1922	1922	1100	1922	1922	835	835	2010	835	835	0,63	0,93
S8	1922	1922	1100	1922	1922	835	835	2010	835	835	0,63	0,93
S1	1922	1922	1100	1922	1922	835	835	2010	835	835	0,63	0,93
S9	1922	1922	1100	1922	1922	835	835	2010	835	835	0,63	0,93
S10	1922	1922	1100	1922	1922	835	835	2010	835	835	0,63	0,93
S11	1922	1922	1100	1922	1922	835	835	2010	835	835	0,26	0,90
S12	1922	1922	1100	1922	1922	835	835	2010	835	835	0,40	0,92
S1	1922	1922	1100	1922	1922	835	835	2010	835	835	0,63	0,93
S13	1922	1922	1100	1922	1922	835	835	2010	835	835	0,74	0,93
S14	1922	1922	1100	1922	1922	835	835	2010	835	835	0,98	0,98
S16	545	545	1100	545	545	2385	2385	2010	2385	2385	0,59	0,90
S1	1922	1922	1100	1922	1922	835	835	2010	835	835	0,63	0,93
S17	2300	2300	1100	2300	2300	880	880	2010	880	880	0,60	0,88
S15	800	800	1100	800	800	1090	1090	2010	1090	1090	0,35	0,93
S18	1159	1159	1100	1159	1159	2168	2168	2010	2168	2168	0,68	0,93
S19	1031	1031	1100	1031	1031	2623	2623	2010	2623	2623	0,68	0,93
S20	943	943	1100	943	943	1817	1817	2010	1817	1817	0,68	0,93
S21	598	598	1100	598	598	3064	3064	2010	3064	3064	0,68	0,93
S22	458	458	1100	458	458	3718	3718	2010	3718	3718	0,68	0,93
S23	1922	1922	1922	1922	1922	835	835	835	835	835	0,63	0,93
S25	1922	1100	2300	2300	2300	835	2010	880	880	880	0,75	0,95
S26	1922	1100	2300	2300	2300	835	2010	880	880	880	0,75	0,95
S24	1922	1100	2300	2300	2300	835	2010	880	880	880	0,75	0,95
S27	1922	1100	2300	2300	2300	835	2010	880	880	880	0,75	0,95
S28	1922	1100	2300	2300	2300	835	2010	880	880	880	0,75	0,95

RESUMO DE DADOS PARA AS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS DAS PAREDES E TETOS - TRABALHO DE TESE											
TESE-UBIRACI SILVA NASCIMENTO-O-DINTER-UNICAMP											DATA
SIMULAÇÃO	Temper. Máx-(oC		Tempo Tmáx-(h)		Dif.Tempe. (oC)	Fator Decrem. RT*	Dif.Tempo(Ret (h)	Referências Cengel	04/03/2020		
	P.ext.	P.int.	P.ext.	P.int.					gráfico		
S1	50,94	27,24	12,88	17,71	23,70	0,535	4,83	Tab-A5;A8;A19,Exp.	OK		
S2	50,87	27,35	12,88	17,66	23,52	0,538	4,78	Tab-A5;A8;A19,Exp.	OK		
S3	50,80	27,45	12,88	17,61	23,35	0,540	4,73	Tab-A5;A8;A19,Exp.	OK		
S4	50,73	27,55	12,87	17,56	23,18	0,543	4,69	Tab-A5;A8;A19,Exp.	OK		
S5	50,61	27,73	12,87	17,47	22,88	0,548	4,60	Tab-A5;A8;A19,Exp.	OK		
S6	49,58	30,08	12,84	16,28	19,50	0,607	3,44	Tab-A5;A8;A19,Exp.	OK		
S7	50,39	30,36	12,86	15,90	20,03	0,603	3,04	Tab-A5;A8;A19,Exp.	OK		
S8	50,63	29,12	12,87	16,50	21,51	0,575	3,63	Tab-A5;A8;A19,Exp.	OK		
S1	50,94	27,24	12,88	17,71	23,70	0,535	4,83	Tab-A5;A8;A19,Exp.	OK		
S9	51,38	24,63	12,90	21,04	26,75	0,479	8,14	Tab-A5;A8;A19,Exp.	OK		
S10	51,55	23,43	12,92	24,00	28,12	0,455	11,08	Tab-A5;A8;A19,Exp.	OK		
S11	38,21	24,75	13,40	18,34	13,46	0,648	4,94	Tab-A18;A19,Exp.	OK		
S12	43,04	25,70	13,11	17,98	17,34	0,597	4,87	Tab-A18;A19,Exp.	OK		
S1	50,94	27,24	12,88	17,71	23,70	0,535	4,83	Tab-A18;A19,Exp.	OK		
S13	54,69	27,97	12,82	17,64	26,72	0,511	4,82	Tab-A18;A19,Exp.	OK		
S14	62,21	29,44	12,71	17,52	32,77	0,473	4,81	Tab-A18;A19,Exp.	OK		
S16	53,34	23,96	12,39	19,47	29,38	0,449	7,08	Tab-A5;A8;Exp.	OK		
S1	50,94	27,24	12,88	17,71	23,70	0,535	4,83	Tab-A5;A8;Exp.	OK		
S17	48,74	27,98	13,28	17,70	20,76	0,574	4,42	Tab-A5;A8;Exp.	OK		
S15	41,88	25,92	13,00	16,82	15,96	0,619	3,82	Tab-A5;A8;Exp.	OK		
S18	51,95	26,24	12,91	19,37	25,71	0,505	6,46	Lima(2005)/Ávila(2017)	OK		
S19	54,04	24,39	12,62	21,56	29,65	0,451	8,94	Lima(2005)/Ávila(2017)	OK		
S20	56,20	23,93	12,40	20,54	32,27	0,426	8,14	Lima(2005)/Ávila(2017)	OK		
S21	55,74	24,14	12,44	20,50	31,60	0,433	8,06	Lima(2005)/Ávila(2017)	OK		
S22	56,05	24,06	12,40	20,35	31,99	0,429	7,95	Lima(2005)/Ávila(2017)	OK		
S23	48,60	31,50	12,93	15,90	17,10	0,648	2,97	Tab-A5;A8;A19,Exp.	OK		
S25	50,79	33,39	13,24	15,56	17,40	0,657	2,32	Tab-A5;A8;A18-19,Exp.	OK		
S26	50,97	31,65	13,26	16,10	19,32	0,621	2,84	Tab-A5;A8;A18-19,Exp.	OK		
S24	51,26	29,07	13,25	17,26	22,19	0,567	4,01	Tab-A5;A8;A18-19,Exp.	OK		
S27	51,84	25,52	13,24	20,52	26,32	0,492	7,28	Tab-A5;A8;A18-19,Exp.	OK		
S28	52,09	23,94	13,25	24,00	28,15	0,460	10,75	Tab-A5;A8;A18-19,Exp.	OK		