

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CAMPUS DO SERTÃO
UNIDADE EDUCACIONAL SEDE DELMIRO GOUVEIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

MARIA JAINE BATALHA DANTAS

**AVALIAÇÃO DO USO DAS EMBALAGENS DE CAIXA TETRA PAK PARA
AUMENTO DO CONFORTO TÉRMICO DE PAREDES DE ALVENARIA NO
SERTÃO ALAGOANO**

Delmiro Gouveia - AL
2022

MARIA JAINE BATALHA DANTAS

**AVALIAÇÃO DO USO DAS EMBALAGENS DE CAIXA TRETA PAK PARA
AUMENTO DO CONFORTO TÉRMICO DE PAREDES DE ALVENARIA NO
SERTÃO ALAGOANO**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharelado em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Ms. Alexandre Nascimento de Lima.

Coorientador: Prof. Dr. Raniere Henrique P. Lira.

Delmiro Gouveia - AL

2022

Catalogação na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca do Campus Sertão
Sede Delmiro Gouveia

Bibliotecária responsável: Renata Oliveira de Souza CRB-4/2209

D192a Dantas, Maria Jaine Batalha

Avaliação do uso das embalagens de caixa Tetra Park para aumento do conforto térmico de paredes de alvenaria no sertão alagoano / Maria Jaine Batalha Dantas. - 2022.

82 f. : il.

Orientação: Alexandre Nascimento de Lima.

Coorientação: Raniere Henrique Pereira Lira.

Monografia (Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas. Curso de Engenharia Civil. Delmiro Gouveia, 2022.

1. Conforto térmico. 2. Isolante térmico. 3. Caixa Tetra Park. 4. Reuso. 5. Sustentabilidade. 6. Parede de alvenaria. I. Lima, Alexandre Nascimento de. II. Lira, Raniere Henrique Pereira. III. Título.

CDU: 621.186.4

FOLHA DE APROVAÇÃO

MARIA JAINE BATALHA DANTAS

Avaliação do uso das embalagens de caixa Tetra Pak para aumento do conforto térmico de paredes de alvenaria no sertão alagoano

Monografia submetida à banca examinadora do curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas e aprovada em 5 de dezembro de 2022.

Alexandre Nascimento de Lima

Professor Msc. Alexandre Nascimento de Lima – UFAL (Orientador)

Raniere Henrique Pereira Lira

Prof. Dr. Raniere Henrique Pereira Lira – UFAL (Coorientador)

Banca examinadora:

Viviane Regina Costa Sá

Profa. Dra. Viviane Regina Costa Sá – UFAL (Examinadora Interna)

Jéssica Beatriz da Silva

Jéssica Beatriz da Silva (Examinadora Externa)

Dedico este trabalho a Deus, por sempre me dá
forças e, a minha mãe Maria da Saúde, que
nunca mediu esforços para que este momento
chegasse.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por ter me dado todas as forças necessárias para conseguir concluir este curso tão sonhado por mim e por todos os meus.

Agradeço aos meus pais, em especial a minha mãe que apesar de todas as dificuldades, sempre esteve ao meu lado dando todo suporte possível.

Agradeço as minhas irmãs e ao meu irmão, que durante toda a graduação foram meus grandes incentivadores.

Agradeço a minha avó em memorial, que enquanto estava conosco, sempre demonstrava seu interesse em saber como estava meus estudos e torcia muito pelo meu sucesso profissional.

Agradeço aos meus professores orientadores, prof. Alexandre e prof. Raniere, que com grande maestria me deram todo o auxílio necessário para o acontecimento deste trabalho.

Agradeço a todos os meus professores que contribuíram significativamente para meu crescimento acadêmico e profissional ao longo do curso, em especial, professor Rogério de Jesus, professora Jéssica Beatriz, professor Dayvson Almeida e professor Rogério Mendes, que seja por meio de uma carta de recomendação, um artigo publicado juntos, ou uma orientação de monitoria, sempre demonstraram que acreditam no meu potencial enquanto profissional.

Agradeço aos meus colegas de curso, Saul Oliveira, Verônica Carvalho, Kimberlly Gianne, Rafaela Gianne, Joyce Edra, Allyson Maciel, Jeferson Gabriel, Emanuel Victor, Guilherme Lisboa, Ítalo Barbosa, Mateus Barros, Edton Costa, Clécio Araújo, Raiana Porfirio e Marcos Lins por todo auxílio ao longo da graduação.

Em especial, agradeço a Allyson Maciel, Raiana Porfirio e Salaniel Zacarias que, enquanto estagiários do Laboratório de Materiais do Campus UFAL Sertão, contribuíram diretamente na pesquisa do presente trabalho.

“Na natureza nada se cria, nada se perde, tudo se transforma.” (Lavoisier, 1743-1794).

RESUMO

Este trabalho apresenta o estudo de placas produzidas a partir da junção de caixas Tetra Pak, recortadas e lavadas, com o objetivo de reutilizá-las como isolante térmico em paredes de alvenaria, com materiais diversos, no Sertão Alagoano. As placas foram confeccionadas por colagem com o aquecimento de ferro elétrico. Após isso, elas foram instaladas como isolante térmico em duas paredes pequenas, uma delas de bloco de concreto com área de 0,32 m² e a outra de solo-cimento com argila expandida com área de 0,204 m². Um segundo experimento foi feito na sala de descanso dos motoristas da UFAL – Campus Sertão, onde foram instaladas duas placas, uma com área de 6,7 m² e outra menor, com área de 0,57 m². Além disso, um terceiro passo foi feito: a simulação de um modelo semelhante as condições da sala de descanso dos motoristas, em software de fluidodinâmica: ANSYS WORKBENCH e, comparados os resultados obtidos com os resultados experimentais para a confiabilidade dos valores. Com a análise dos experimentos e da simulação, observou-se que as caixas de leite Tetra Pak possuem comportamento de material isolante, podendo assim serem utilizadas para fins de conforto térmico em paredes de alvenaria em regiões semiáridas.

Palavras-chave: caixa de leite Tetra Pak; reuso; material isolante; sustentabilidade; conforto térmico.

ABSTRACT

This work presents the study of plates produced from the junction of Tetra Pak boxes, cut and washed, with the objective of reusing them as thermal insulation in masonry walls, with different materials, in Sertão Alagoano. The plates were made by gluing with the heating of an electric iron. After that, they were installed as a thermal insulator on two small walls, one made of concrete block with an area of $0,32\text{ m}^2$ and the other of soil-cement with expanded clay with an area of $0,204\text{ m}^2$. A second experiment was carried out in the drivers' break room at UFAL - Campus Sertão, where two plates were installed, one with an area of $6,7\text{ m}^2$ and the other smaller, with an area of $0,57\text{ m}^2$. In addition, a third step was carried out: the simulation of a model similar to the conditions of the drivers' break room, in the fluid dynamics software: ANSYS WORKBENCH and, comparing the results obtained with the experimental results for the reliability of the values. With the analysis of the experiments and the simulation, it was observed that the Tetra Pak milk cartons have an insulating material behavior, thus being able to be used for thermal comfort purposes in masonry walls in semi-arid regions.

Keywords: Tetra Pak milk carton; reuse; insulating material; sustainability; thermal comfort.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Zona bioclimática 8.	21
Figura 2.2 – Localização do município de Delmiro Gouveia – AL.	22
Figura 2.3 – Cidade de Delmiro Gouveia – AL.	22
Figura 2.4 - Transmissão de calor por condução.	25
Figura 2.5 - Troca de calor por convecção.	27
Figura 2.6 - PPD em função de PMV.	33
Figura 2.7 - Seções de um componente com camadas homogêneas e não homogêneas.	36
Figura 2.8 - Resistência térmica superficial interna e externa.	37
Figura 2.9 - Material das embalagens cartonadas da Tetra Pak.	38
Figura 3.1 - Montagem das placas de caixa Tetra Pak.	43
Figura 3.2 - Placa de caixas de leite ajustada na parede de blocos de concreto.	44
Figura 3.3 - Soprador térmico e alvenaria de blocos de concreto com placa de Tetra Pak (face do alumínio voltado para parede).	45
Figura 3.4 - Soprador térmico e alvenaria de blocos de concreto com placas de Tetra Pak (face do alumínio para área externa).	45
Figura 3.5 - Parede recebendo o calor direto do soprador térmico.	46
Figura 3.6 - Medição da temperatura na alvenaria de bloco de concreto.	47
Figura 3.7 - Temperatura externa da parede exposta ao sol, sem placa na superfície interna (1° medição).	48
Figura 3.8 - Temperatura interna da parede sem o revestimento térmico (2° medição).	49
Figura 3.9 - Placas de caixa de leite aderidas a parede do quarto em estudo.	49
Figura 3.10 - Temperatura externa da parede exposta ao sol (3° medição).	50
Figura 3.11 - Temperatura interna da parede com o revestimento térmico (4° medição).	50
Figura 3.12 - Temperatura externa da parede exposta ao sol (5° medição).	51
Figura 3.13 - Temperatura interna da parede com o revestimento térmico (6° medição).	51
Figura 3.14 – Geometria da simulação.	52
Figura 3.15 – Malha da Simulação.	53
Figura 3.16 – Condições de contorno da geometria.	53
Figura 3.17 – Expressões conforme a NBR 15220.	54
Figura 3.18 - Cálculo numérico das equações diferenciais parciais.	55
Figura 4.1 - Foto registrada no minuto 14.	57

Figura 4.2 - Foto registrada no minuto 5.....	58
Figura 4.3 - Foto registrada no minuto 3.....	60
Figura 4.4: foto registrada no minuto 3.....	61
Figura 4.5 - Dimensões do tijolo utilizado na parede da sala dos motoristas.	65
Figura 4.6 - Camadas do bloco cerâmico.	66
Figura 4.7 – Variação de temperatura ao longo da parede na simulação.	73

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 4.1 – Análise na alvenaria de blocos de concreto.....	58
Gráfico 4.2 – Análise na alvenaria de solo-cimento com argila expandida.	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Tradução da escala de sensação e preferência térmica sugerida pelo PMV.	31
Tabela 2.2 - Valores de metabolismo para várias atividades.	34
Tabela 2.3 - Resistência térmica do vestuário.	34
Tabela 2.4 - Condutividade térmica de materiais de construções (adaptado).	35
Tabela 2.5 - Transmitância Térmica máximas em paredes externas.	38
Tabela 3.1 - Temperatura medida da Alvenaria de Bloco de concreto (°C).	47
Tabela 3.2 - Temperatura medida da Alvenaria de tijolos de solo-cimento com argila expandida.	48
Tabela 4.1 - Parede de blocos de concreto com o alumínio encostado na parede.	56
Tabela 4.2 - Parede de blocos de concreto com o alumínio para a face externa.	57
Tabela 4.3 - Parede de tijolos ecológicos com argila expandida, com o alumínio encostado na parede.	59
Tabela 4.4 - Parede de tijolos ecológicos com argila expandida, com o alumínio para a área externa.	60
Tabela 4.5 – Temperaturas na parede do quarto de descanso dos motoristas da UFAL.	63
Tabela 4.6 – Resultados para a Condutividade Térmica de 0,54 W / (m. K).	70
Tabela 4.7 – Resultados da temperatura interna.	72
Tabela 4.8 – Resultados da simulação para a Condutividade Térmica de 0,54 W / (m. K). ...	73

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 - Exemplos de índices empíricos e analíticos de conforto térmico. 30

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
UFAL	Universidade Federal de Alagoas
ONU	Organização das Nações Unidas
PMV	Voto Médio Estimado
PPD	Porcentagem de Pessoas Desconfortáveis
MDF	Medium Density Fiberboard
MEF	Método dos Elementos Finitos
NBR	Norma Brasileira
ISO	International Organization for Standardization

LISTA DE SÍMBOLOS

$^{\circ}\text{C}$	Celsius
W	Parcela da taxa metabólica destinada ao trabalho mecânico
cm	Centímetro
m^2	Metro quadrado
M	Taxa metabólica, em função da atividade desempenhada (W/m^2)
Q_{res}	Taxa total de perda de calor pela respiração (W/m^2)
Q_{sk}	Taxa total de perda de calor pela pele (W/m^2)
E_{sk}	Taxa de perda de calor total por evaporação do suor (W/m^2)
C_{res}	Taxa de perda de calor latente por convecção (W/m^2)
E_{res}	Taxa de perda de calor latente por evaporação (W/m^2)
k	Condutividade térmica do material, em ($\text{W}/\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C}$)
q	Intensidade de fluxo de calor (W/m^2)
Q	Intensidade total de fluxo de calor ($\text{W}(\text{J}/\text{s})$)
E	Energia (calor) (J)
Δt	Intervalo de tempo
A	Área atravessada pelo fluxo de calor (m^2)
L	Espessura da parede (m)
T_p	Temperatura da superfície (K) ou ($^{\circ}\text{C}$)
T_{∞}	Temperatura do fluido (K) ou ($^{\circ}\text{C}$)
h	Coeficiente de troca de calor por convecção ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$)
Q	Taxa de transferência de calor por convecção (W)
A	Área de troca de calor na superfície sólida (m^2)
E_b	Poder emissivo do corpo negro (W/m^2)
σ	Constante de Stefan-Boltzamann
T	Temperatura absoluta do corpo emissor (K)
λ	Comprimento de onda
c	Velocidade da luz no vácuo
ε	Emissividade
G	Irradiação total
α	Absorvidade
ρ	Reflectividade

τ	Transmissividade
t_{rm}	Temperatura radiante média
t_a	Temperatura do ar
p_a	pressão parcial do vapor de água (KPa)
f_{cl}	Razão entre área do corpo vestido e do corpo nu, adimensional
t_{cl}	Temperatura da superfície externa das roupas, ($^{\circ}C$);
h_c	Coeficiente de transferência de calor por convecção, (W/m^2)
M	Taxa metabólica de produção de calor em função da atividade, (W/m^2)
L	Carga térmica atuando sobre o corpo, (W/m^2);
HR	Humidade relativa
p_{vap}	Pressão parcial do vapor de água
R	Resistência térmica do elemento ($m^2 \cdot K/W$)
e	espessura da camada (m)
k	coeficiente de condutividade térmica do material ($W/m \cdot K$)
U	Transmitância térmica
R_T	Resistência total do elemento

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
1.1 JUSTIFICATIVA	18
1.2 OBJETIVOS GERAIS	18
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
2. REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1 PREVENIR GANHOS DE CALOR	20
2.1.1 Localização e características climáticas do município em estudo: Delmiro Gouveia -AL	22
2.2 CONFORTO TÉRMICO.....	23
2.2.1 Condução	25
2.2.2 Convecção	26
2.2.3 Radiação	27
2.3 VOTO MÉDIO ESTIMADO (PMV) E PERCENTAGEM DE PESSOAS DESCONFORTÁVEIS (PPD) 30	
2.3.1 Parâmetros ambientais	32
2.3.2 Parâmetros individuais	34
2.4 CONDUTIVIDADE TÉRMICA E RESISTÊNCIA TÉRMICA.....	35
2.5 TRANSMITÂNCIA TÉRMICA OU COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR	37
2.6 A CAPACIDADE DE ISOLANTE TÉRMICO DAS CAIXAS TETRA PAK.....	38
2.7 PAREDES DE BLOCO DE CONCRETO E DE TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO COM ARGILA EXPANDIDA	41
2.8 MÉTODOS DOS ELEMENTOS FINITOS PARA ANÁLISE TÉRMICA COM SOFTWARE DE FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL	41
3 MATERIAIS E MÉTODOS	43
3.1 ETAPA 1: PROCEDIMENTOS NAS PAREDES DE BLOCO DE CONCRETO E TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO COM ARGILA EXPANDIDA	44
3.1.1 Resultados da pesquisa de Romão (2019) e Vieira (2021)	46
3.2 ETAPA 2: PROCEDIMENTOS NAS PAREDES DO QUARTO DE DESCANSO DOS MOTORISTAS DA UFAL – CAMPUS SERTÃO	48
3.3 ETAPA 3: PROCEDIMENTOS EM SOFTWARE ANSYS WORKBENCH.....	51
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	56
4.1 ANÁLISE NA PAREDE DE BLOCO DE CONCRETO E TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO COM ARGILA EXPANDIDA	56
4.2 ANÁLISE NA PAREDE DO QUARTO DE DESCANSO DOS MOTORISTAS DA UFAL – CAMPUS SERTÃO.....	62
4.2.1 Cálculo da Resistência Térmica e da Transmitância Térmica	65
4.2.1.1 Cálculo sem a placa de caixa de leite	65
4.2.1.2 Cálculo com a placa de caixa de leite.....	68
4.3 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO.....	71
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	75

1. INTRODUÇÃO

O Brasil é um dos maiores produtores de leite do mundo. Conforme dados do IBGE (2021), nos meses que se referem a abril, maio e junho de 2021 foram cerca de 6000 mil litros de leite industrializados produzidos em todo território nacional. O que, consequentemente, gera uma grande quantidade de caixas de leite para possibilitar a comercialização e distribuição desse produto.

Esta grande produção acarreta no aumento da geração de lixo que é descartado diariamente pela população. Conforme a ONU Meio Ambiente, cerca de 541 mil toneladas/dia de lixo são geradas no Brasil. Fato este que implica no país da América Latina que mais produz resíduos sólidos, representando 40% do total gerado na região (SOUZA, 2019).

O grupo fornecedor das caixas Tetra Pak, caixas que conservam o leite por mais tempo, está presente no Brasil desde 1957, o país está em segundo lugar em volume de vendas como também de faturamento de todo o Grupo Tetra Pak, ficando atrás somente da China. As embalagens Tetra Pak estão presentes em 94,7% dos lares brasileiros segundo a Kantar Worldpanel (empresa de pesquisas de consumo domiciliar da América Latina) (UEMURA, 2015).

Nesse contexto, se houver o descarte inadequado desse material, pode gerar sérios problemas para o planeta, em virtude do seu alto consumo pela população, problemas estes como: alagamentos e inundações em períodos de chuva, impedindo o percurso da água para o sistema de esgotamento sanitário, além da poluição visual. A proliferação de doenças também pode ser uma consequência, sabendo que o acúmulo de lixo atrai mosquitos, insetos, ratos que podem causar danos à saúde pública, prejuízo ao turismo, aumento de gastos públicos com a limpeza urbana, contaminação dos solos e dos lençóis freáticos.

Ademais, observando a problemática que é recorrente no Sertão Alagoano são as altas temperaturas vigentes o ano inteiro. Nas regiões litorâneas, as temperaturas são mais amenas variando em média entre 23°C e 28°C, por outro lado, no sertão as temperaturas chegam a atingir em média 17°C e 33°C, já sendo registrado temperaturas de 40°C em alguns municípios (BARROS *et al.*, 2012).

O Estado de Alagoas, devido a sua localização geográfica, tem como característica climática uma precipitação pluviométrica irregular e pouca variação sazonal da radiação solar, o que provoca as altas temperaturas. A sua proximidade com a Linha do Equador é um fator importante para essa peculiaridade, condicionando um número elevado de horas com bastante

incidência solar por ano e índices elevados de evapotranspiração (BARROS *et al.*, 2012).

1.1 Justificativa

Sabendo que o leite é um alimento consumido em grande quantidade pela população, e observando a problemática das altas temperaturas, a presente pesquisa contribuirá de forma eficaz para o conforto térmico das construções, ao mesmo tempo que trará benefícios sustentáveis para o meio ambiente, permitindo uma reutilização adequada desse material, sem haver custos elevados para o seu reuso. Deste modo, fazendo-se proveito das características térmicas, sem precisar fazer separação dos componentes, é uma alternativa barata e vantajosa para um mundo mais sustentável.

1.2 Objetivos Gerais

A presente pesquisa visa analisar qualitativamente e quantitativamente a capacidade de isolante térmico de caixas Tetra Pak utilizadas para armazenagem de leite, de modo a trazer conforto térmico e inovação com métodos construtivos sustentáveis.

1.3 Objetivos Específicos

- I. Analisar a capacidade de isolante térmico das caixas Tetra Pak por meio de ensaios experimentais;
- II. Calcular o índice de Resistência Térmica e Transmitância Térmica conforme a NBR 15220;
- III. Desenvolver um modelo computacional que simule a transferência de calor em uma parede usando caixas Tetra Pak com software de fluidodinâmica, e comparar com os resultados experimentais.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

O conforto térmico das edificações é algo extremamente relevante para o bem-estar dos indivíduos que frequentam ou habitam determinado local, seja um ambiente de trabalho, escritórios, academias, escolas, casas unifamiliares, entre outros, todos esses lugares precisam ser projetados de modo tal que o ambiente esteja propício para o bem-estar daqueles que ocupam aquele espaço, de modo a projetar o arquitetônico utilizando o máximo de ventilação natural possível. Além disso, utilizar-se de métodos construtivos que evitem a entrada excessiva de calor (no caso de lugares com a climatologia quente), o que contribui tanto para o conforto, quanto para trazer economia energética, uma vez que não terá gastos desnecessários com resfriamento do ambiente.

Principalmente em regiões com o clima quente e seco, como é o caso da região semiárida do Nordeste, os projetos arquitetônicos são feitos com um objetivo principal de resfriamento, quase não havendo necessidade de aquecimento, o conforto térmico nessas construções depende primordialmente do movimento de ar e a prevenção de ganhos de calor. Nesse contexto, o conforto térmico é definido como “a situação de satisfação psicofisiológica com as condições térmicas de um ambiente, onde a manutenção da homeostase humana é obtida” (BITTENCOUT; CÂNDIDO, 2008).

Desta maneira, o conceito de conforto térmico não está vinculado à necessidade de sentir calor e nem frio, mas sim um contentamento com a sensação térmica daquele espaço, o que pode diferenciar de pessoa para pessoa e de espaço para espaço. Pessoas que viveram boa parte de suas vidas em lugares quentes (lugares mais próximos a Linha do Equador) tendem a achar mais confortáveis ambientes com uma temperatura mais quente do que fria, o oposto ocorre com pessoas que viveram mais em ambientes com temperaturas mais amenas, localizadas mais distantes da Linha do Equador (BITTENCOUT; CÂNDIDO, 2008).

Além disso, a sensação de conforto térmico é relativa, pois depende ainda de diversos fatores, tais como roupas, intensidade do vento para que fique um ambiente confortável, o tipo de atividade que está sendo executada no ambiente, entre outros. Assim, se as pessoas tendem a se movimentar menos no determinado lugar da edificação, tendem a sentir menos calor, como em atividades de escritório, por outro lado, se for um lugar que as pessoas se movimentem bastante, como sala de jogos, academia, cozinhas é necessário haver um ambiente mais fresco.

2.1 Prevenir Ganhos de Calor

Em climas quentes, antes de aplicação de técnicas de resfriamento, é importante prevenir ganhos de calor provindos da incidência de radiação solar que atinge a parte externa da construção, assim, garantir um estado de neutralidade térmica é essencial, pois de um modo geral, o equilíbrio no balanço térmico pode causar a sensação de conforto, desse modo, em ambientes quentes, a prevenção da entrada de calor, pode provocar essa neutralidade.

Segundo Lamberts (2016), a situação de neutralidade térmica é um fator necessário, mas que não é o suficiente para o estado de conforto térmico, ou seja, um indivíduo pode estar exposto a um campo assimétrico de radiação, em temperaturas extremas e opostas, compreende-se assim que este indivíduo está em neutralidade térmica, mas não significa dizer que ele está confortável naquela situação.

Para Frota e Schiffer (2001) o ser humano está em condições de conforto térmico quando perde calor para o ambiente em que está inserido sem haver a necessidade de nenhum mecanismo de termorregulação, ou seja, quando o calor gerado pelo metabolismo é equivalente com o que o indivíduo está executando.

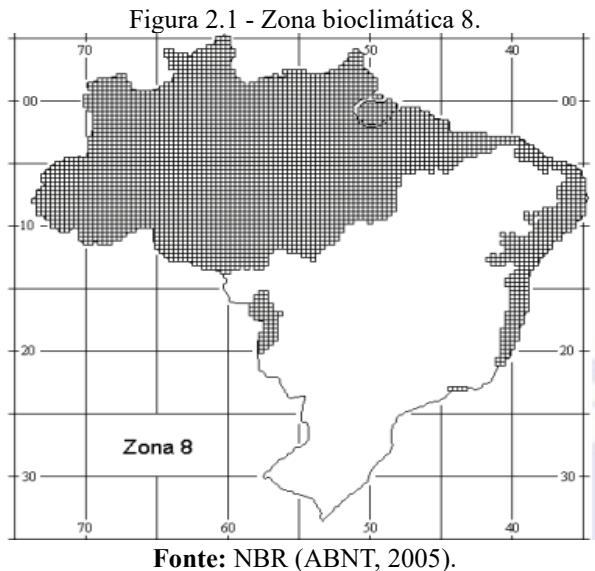
Nesse contexto, entende-se que a neutralidade térmica está diretamente ligada ao funcionamento do organismo humano com o meio ao seu redor, sabendo-se que a temperatura interna do corpo humano deve estar entre um intervalo muito estreito de 36,1 e 37,2°C, sendo o 32°C o limite inferior e 42°C o limite superior para que o ser humano sobreviva em estado de enfermidade (FROTA; SCHIFFER, 2001). Dessa forma, o ambiente ao seu redor deve estar dentro de uma temperatura tão qual que traga o equilíbrio térmico para manter a temperatura do corpo humano constante.

O corpo humano adquire energia através do metabolismo, onde cerca de 20% dessa energia é convertida para trabalho e os outros 80% torna-se calor, este calor deve se dissipar para que o organismo se mantenha em estado de equilíbrio, é importante ressaltar que tanto o calor produzido como o dissipado dependem da atividade que o indivíduo desenvolve, por exemplo, em repouso absoluto, o calor cedido do corpo para o ambiente está por volta de 75 W (FROTA; SCHIFFER, 2001).

Em virtude disso, em lugares naturalmente quentes, a prevenção do calor no interior das edificações contribui consideravelmente para o equilíbrio térmico, e consequintemente para o conforto térmico dos usuários do imóvel, torna-se assim portanto, o primeiro aspecto a ser estudado para fins de conforto térmico em edificações localizados próximos a Linha do

Equador.

A NBR 15220-3 (ABNT, 2005) determina diretrizes construtivas para a otimização do desempenho térmico das edificações. A norma dividiu o Brasil em oito zonas bioclimáticas, a divisão da região em estudo (alto Sertão Alagoano) ficou na divisão de número 8, conforme Figura 2.1.



Para a construção das alvenarias, a norma recomenda paredes leves refletoras nessa zona bioclimática, com o objetivo de dissipar mais facilmente a radiação advinda do sol, especificando as características geométricas dos blocos que realizam essa vantagem, como também, determina as diretrizes para as coberturas de modo a garantir melhor conforto térmico:

- Parede de tijolos de 6 ou 8 furos quadrados (espessura = 14 cm)
- Parede de tijolos de 8 ou 6 furos circulares (espessura = 15 cm)
- Parede de tijolos de 4 furos circulares (espessura 14,5 cm)
- Parede de tijolos de 3 furos circulares (espessura = 18 cm)
- Parede de blocos de cerâmicos 2 furos circulares (espessura = 19 cm)
- Parede de tijolos de 2 furos circulares (espessura = 17,5 cm)
- Parede de tijolos de 21 furos circulares (espessura = 17 cm)

Por sua vez, as diretrizes para as coberturas são: as telhas de cobertura leve isolada, como telhas cerâmicas ou de fibrocimento com forro de concreto (espessura de 3 cm).

2.1.1 Localização e características climáticas do município em estudo: Delmiro Gouveia - AL

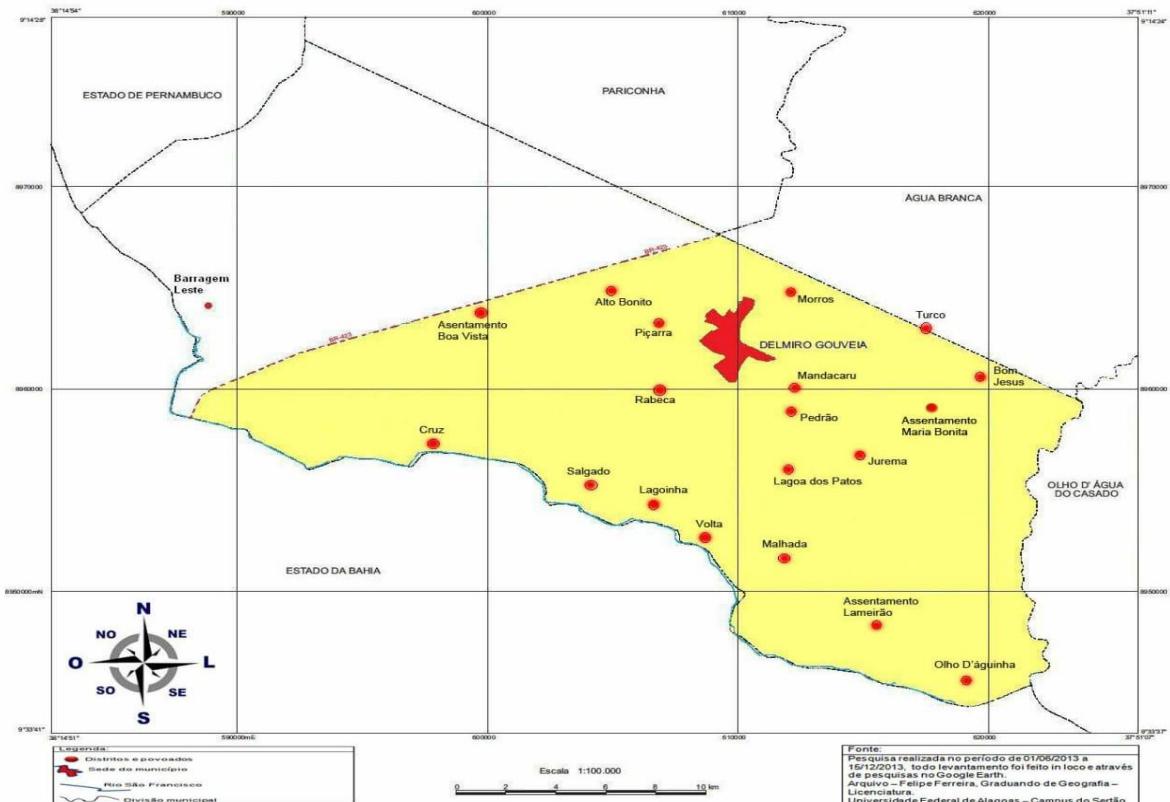
A cidade em que foi feito o experimento *in loco*, encontra-se situado no Alto Sertão Alagoano, no extremo oeste de Alagoas, a cidade faz parte do município de Delmiro Gouveia, conforme a Figura 2.2 e Figura 2.3.

Figura 2.2 – Localização do município de Delmiro Gouveia – AL.



Fonte: IBGE (2022).

Figura 2.3 – Cidade de Delmiro Gouveia – AL.



Fonte: Ferreira (2013).

Conforme Silva *et al.* (2022), o clima da cidade de Delmiro Gouveia é o semi-árido, as chuvas ocorrem com mais frequência entre os meses de março a julho, ou seja no período entre o outono e inverno, e as temperaturas são mais baixas durante essa época do ano.

Segundo os autores citados anteriormente, a temperatura média anual na cidade supracitada varia de 24 a 26°C, sendo que o mês mais frio corresponde a julho, com temperatura média superior a 18°C.

Weather Spark, site meteorológico que mostra as condições meteorológicas das cidades, aponta que, na cidade de Delmiro Gouveia, “a estação quente permanece por 5,3 meses, de 5 de outubro a 15 de março, com temperatura máxima média acima de 35°C. O mês mais quente do ano em Delmiro Gouveia é dezembro, com a máxima de 36°C e mínima de 22°C, em média”.

Por outro lado, segundo o mesmo site, a estação mais fria ocorre por volta de 2,4 meses, entre 6 de julho a 17 de agosto, com temperatura máxima diária em média de 31°C e, o mês mais frio do ano é julho, com mínima de 18°C e máxima de 29°C, em média.

Com efeito, a prevenção de ganhos de calor no interior das edificações existentes na cidade de Delmiro Gouveia, é o primeiro requisito para alcançar o conforto térmico.

2.2 Conforto Térmico

De modo geral, existem 6 (seis) fatores que influenciam o conforto térmico: 1) a temperatura do ar; 2) a umidade do ar; 3) a velocidade do ar; 4) temperatura radiante; 5) taxa metabólica; 6) nível de vestimenta. Os 4 (quatro) primeiros podem ser controlados por meio do projeto e são de cunho climático, enquanto que os 2 (dois) últimos são peculiares de cada ser humano, sendo assim fatores individuais (ASHRAE, 2010).

Neste contexto, estes 6 (seis) fatores devem ser trabalhados juntos para alcançar o que pesquisadores chamam da satisfação psicofisiológica do indivíduo com o meio térmico que o circunda, de modo a trazer a neutralidade térmica, no sentido de o corpo humano estar tão à vontade termicamente, a ponto de não precisar utilizar de mecanismos de termorregulação para sentir essa satisfação (ASHRAE, 2010).

A neutralidade térmica também pode ser compreendida pela equação de balanço térmico adotada por Fanger (1972) *apud* Lyra (2007):

$$M - W = Q_{res} + Q_{sk} = (C + R + E_{sk}) + (C_{res} + E_{res}) \quad (2.1)$$

Em que:

M = taxa metabólica, em função da atividade desempenhada, (W/m^2);

W = parcela da taxa metabólica destinada ao trabalho mecânico, igual a 0 W/m^2 na maioria dos casos;

Q_{res} = taxa total de perda de calor pela respiração, (W/m^2);

Q_{sk} = taxa total de perda de calor pela pele, (W/m^2);

$C + R$ = perda de calor sensível pela pele (perda por convecção e radiação), (W/m^2);

E_{sk} = taxa de perda de calor total por evaporação do suor, (W/m^2);

C_{res} = taxa de perda de calor latente por convecção, (W/m^2);

E_{res} = taxa de perda de calor latente por evaporação, (W/m^2);

Conforme Frota e Schiffer (2001, p.27), Conforto Térmico pode ser dividido em 3 (três) índices:

- 1) 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;
- 2) 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;
- 3) Índices subjetivos: que se baseiam nas sensações subjetivas de conforto experimentadas em condições em que os elementos de conforto térmico variam.

À vista disso, comprehende-se a partir da linha de pensamento de Frota e Schiffer (2001), que o conceito da satisfação de indivíduo com relação à temperatura ao seu redor está dependendo de três fatores distintos entre si, mas que interferem diretamente no conforto térmico nos ocupantes de determinado espaço.

Assim, na presente pesquisa, os índices que podemos levar em consideração para controlar e assim se obter o conforto necessário, seria os índices biofísicos e índices fisiológicos, sabendo que os índices biofísicos se baseiam nas trocas de calor entre o corpo e o ambiente, é importante compreender que ao se prevenir ganhos de calor no espaço em estudo, as trocas de calor entre o corpo e o ambiente se reduzirão, uma vez que a sensação de conforto térmico acontece quando o organismo perde para o ambiente calor produzido compatível com sua atividade, sem recorrer a nenhum mecanismo de termorregulação (OLIVEIRA; RIBAS, 1995).

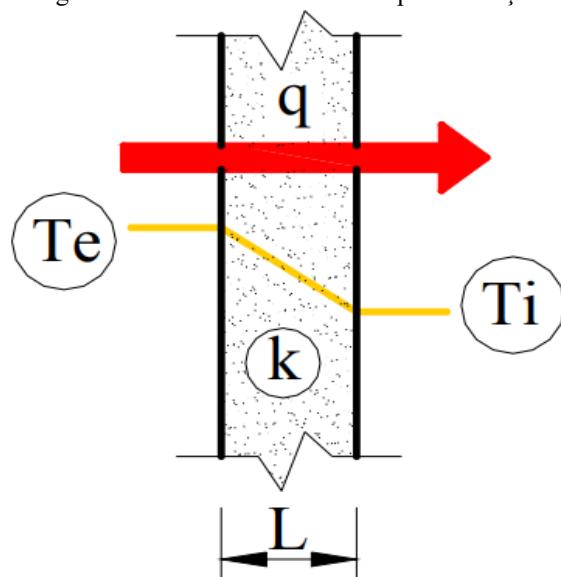
Por outro lado, segundo Gonçalves, Valle e Garcia (2001, p.2) *apud* Lyra (2007), os índices de conforto térmico já podem ser divididos em dois grandes grupos; os subjetivos e os biofísicos. Nos índices subjetivos, os resultados tanto subjetivos como fisiológico são empregadas como variáveis dependentes, ou seja, que estão associadas à individualidade de cada um, por outro lado os índices biofísicos são fundamentados em princípios físicos de transferência de calor: condução, convecção e radiação.

2.2.1 Condução

Segundo Rodrigues (2003), a condução acontece pela transmissão de calor molécula a molécula, por meio de um meio material, ocorrendo sempre de um ponto de maior potencial energético (maior temperatura) para um de menor potencial (menor temperatura).

É experimentalmente verificado que a quantidade de calor que flui através de um elemento opaco é em função do material que o constitui, como também da espessura do elemento e do gradiente de temperatura. Existe uma grandeza física que indica se o material é melhor ou pior condutor de calor, denominado condutividade térmica (k) (RODRIGUES, 2003). Na figura 2.2 é possível ver uma ilustração do comportamento da transmissão de calor por condução.

Figura 2.4 - Transmissão de calor por condução.



Fonte: Rodrigues, 2003.

Este comportamento pode ser descrito pelas seguintes equações:

$$q = k \cdot \frac{\Delta T}{L} \quad (2.2)$$

$$Q = A \cdot k \cdot \frac{\Delta T}{L} \quad (2.3)$$

$$E = S \cdot k \cdot \frac{\Delta T}{L} \cdot \Delta t \quad (2.4)$$

Em que:

q = intensidade de fluxo de calor (W/m^2),

Q = intensidade total de fluxo de calor, ($W(J/s)$),

E = energia (calor) (J);

k = condutividade térmica do material, em ($W/m \cdot ^\circ C$);

Δt = intervalo de tempo;

A = área atravessada pelo fluxo de calor (m^2);

L = espessura da parede (m).

2.2.2 Convecção

A convecção é causada quando ocorre a troca de calor por um corpo sólido e um fluido em movimento, podendo ser convecção natural ou forçada.

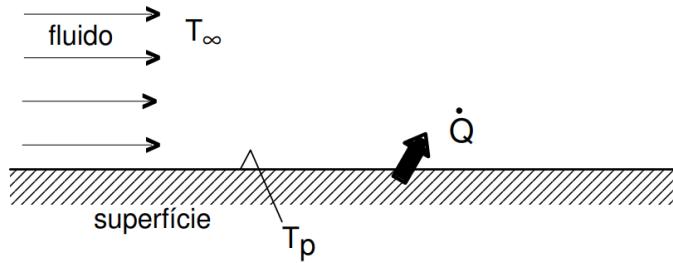
Segundo Neto (2010), a convecção forçada acontece quando a movimentação do fluido se dá por meios artificiais (ventilador, abanador, o próprio movimento da superfície que está trocando calor, etc.), e a convecção natural acontece quando a movimentação do fluido se dá por meios naturais, ou seja, pelo próprio aquecimento do fluido.

Assim, as condições para que ocorra convecção são:

- Um fluido em movimento;
- Uma superfície de troca de calor;
- Uma diferença de temperatura entre a superfície e o fluido.

Conforme a representação esquemática:

Figura 2.5 - Troca de calor por convecção.



Fonte: Neto, 2010.

A equação da Lei do Resfriamento de Newton descreve a expressão para o cálculo do fluxo de calor por convecção, dada abaixo:

$$\dot{Q} = h \cdot (T_p - T_\infty) \quad (2.5)$$

Em que:

\dot{Q} = fluxo de calor por convecção (W/m^2)

T_p = temperatura da superfície (K) ou ($^\circ\text{C}$)

T_∞ = temperatura do fluido (K) ou ($^\circ\text{C}$)

h = coeficiente de troca de calor por convecção ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$)

Por sua vez, para o cálculo da taxa de transferência de calor, usa-se a seguinte expressão:

$$Q = h \cdot A \cdot (T_p - T_\infty) \quad (2.6)$$

Em que:

Q = taxa de transferência de calor por convecção (W)

A = área de troca de calor na superfície sólida (m^2).

2.2.3 Radiação

Conforme Rodrigues (2003), a transmissão de energia radiante acontece quando existe um meio transparente a essa onda. As ondas eletromagnéticas propagam-se no vácuo à velocidade constante de 300.000km/s, sendo pouco menor a sua velocidade no ar da atmosfera terrestre.

Segundo o autor, duas teorias são adotadas para explicar os fenômenos de transmissão de calor na ausência de meio físico para propagação (diferentemente do que ocorre na condução e convecção):

- Que a transmissão tem natureza ondulatória, dando-se por meio de ondas eletromagnéticas;
- Que a transmissão tem corpuscular, dando-se meio de partículas, chamados fótons.

Hoje é plenamente aceito no meio científico a dualidade da natureza da luz, ora sendo considerada como radiação eletromagnética, ora como fótons (RODRIGUES, 2003).

Oliveira (2014) assegura que a radiação, no contexto da transmissão de calor, consiste no transporte de energia por meio de ondas eletromagnéticas.

A Lei de Stefan-Boltzamann descreve o fluxo radiante total emitido por um corpo ideal, demominado corpo negro, em que absorve toda a radiação incidente e emite o máximo de radiação possível.

$$E_b = \sigma T^4 \quad (2.7)$$

Em que:

E_b = poder emissivo do corpo negro (W/m^2)

σ = constante de Stefan-Boltzamann, $\sigma = 5.670 \times 10^{-8} (\text{W}/\text{m}^2 \text{K}^4)$

T = temperatura absoluta do corpo emissor (K).

A Lei da distribuição de Plank (Equação 2.8) descreve o poder emissivo espectral do corpo negro no vácuo, em que é uma radiação emitida por unidade de tempo, de área e de comprimento de onda, em torno do comprimento de onda λ (μm), sabendo que $\mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$.

$$E_b = \sigma T^4 E_{b\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5 (e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1)} [\text{W}/(\text{m}^2 \mu\text{m})] \quad (2.8)$$

As duas constantes são:

$$C_1 = 2\pi h c^2 = 3.742 \times 10^8 (\text{W} \mu\text{m}^4/\text{m}^2)$$

$$C_2 = hc/k = 1.439 \times 10^4 (\text{K} \mu\text{m}).$$

Em que c é a velocidade da luz no vácuo, $h = 1.439 \times 10^{-34} (\text{J s})$ é a constante de Plank e $k = 1.381 \times 10^{-23} (\text{J/K})$ a constante de Boltzmann.

Conforme Oliveira (2014), as propriedades da radiação e da interação entre radiação e matéria são complexas, pois podem depender da temperatura (da superfície receptora e da fonte emissora), do comprimento de onda (propriedades espectrais) e da direção (propriedades direcionais). Com efeito, na engenharia fazem-se aproximações aceitáveis, que permitem simplificar e tornar tratáveis os problemas envolvendo radiação.

Radiação difusa: independente da direção (valores direcionais são indicados com índice θ).

Emissividade ε : razão entre a radiação (total) emitida por uma superfície real e a radiação de corpo negro à mesma temperatura.

$$\varepsilon(T) = \frac{E(T)}{E_b(T)} \quad (2.9)$$

$$E(T) = \varepsilon(T)E_b(T) \quad (2.10)$$

Emissividade espectral ε_λ , relação entre essas radiações para um dado comprimento de onda:

$$\varepsilon_\lambda(T) = E_\lambda(T)/E_{b\lambda}(T) \quad (2.11)$$

Superfície cinzenta: ε não depende do comprimento de onda, ou seja, $\varepsilon_\lambda = \text{Cte}$.

Superfície difusa: ε não depende da direção, ou seja $\varepsilon_\theta = \text{Cte}$.

Irradiação G : radiação incidente numa superfície, por unidade de área e de tempo (W/m^2).

Se parte da irradiação numa superfície for difusa (G_d) e outra parte directa (G_D , segundo um ângulo θ com a normal à superfície), a irradiação total é:

$$G = G_d + G_d \cos\theta \quad (W/m^2) \quad (2.12)$$

A radiação incidente pode ser absorvida, refletida e transmitida,

$$G = G_{abs} + G_{ref} + G_{tran} \quad (2.13)$$

$$1 = G_{abs}/G + G_{ref}/G + G_{tran}/G \quad (2.14)$$

O que permite definir o coeficiente de absorção (a absorvidade, α), o coeficiente de reflexão (a reflectividade, ρ) e o coeficiente de transmissão (a transmissividade, τ):

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (2.15)$$

A reflexão pode ser: 1) especular: o ângulo de reflexão é igual ao ângulo de incidência (como num espelho); 2) difusa: espelhada igualmente em todas as direções.

Pela Lei de Kirchoff, em determinadas condições, a absorsividade é igual à emissividade:

$$\alpha = \varepsilon \quad (2.16)$$

Coeficientes totais, $\varepsilon(T) = \alpha(T)$ (assume que a temperatura T da superfície emissora é igual à temperatura T da fonte de irradiação).

Coeficientes espectrais/direcccionais, $\varepsilon_{\lambda\theta}(T) = \alpha_{\lambda\theta}(T)$ (válida sem restrições).

2.3 Voto Médio Estimado (PMV) e Percentagem de Pessoas Desconfortáveis (PPD)

Outra classificação de índices de conforto térmico foi apresentada por Lima *et al.* (2005) *apud* Lyra (2007), em que divide os índices em analíticos, que são feitos a partir de análise matemática e empíricos, que são obtidos a partir de feitos experimentais (Quadro 2.1).

Quadro 2.1 - Exemplos de índices empíricos e analíticos de conforto térmico.

TIPO	ANO	ÍNDICE	SIGLA	AUTOR
ÍNDICES ANALÍTICOS	1945	Razão de aceitação Térmica	RAT	US-Quartremaster General-EUA
	1947	Taxa de Sudação Prevista em 4h	TSP4	McArdle
	1955	Índice de Esforço Térmico	IET	Belding e Hatch
	1958	Índice de Tensão Térmica	ITT	Lee
	1963	Índice de Tensão Relativa	ITR	Lee e Henschel
	1963	Índice de Fadiga Térmica	IFT	Givoni
	1969	Índice de Sensação Térmica	IST	Gagge
	1971	Nova Temperatura Efetiva	TE*	Gagge
	1972	Voto Médio Estimado	PMV	Fanger
	1976	Temperatura Subjetiva	TS	McIntyre
ÍNDICES EMPÍRICOS	1977	Temperatura Efetiva Padrão	TEP	Nishi e Gagge
	1923	Temperatura Efetiva	TE	Houghten e Yaglou
	1932	Temperatura Efetiva Corrigida	TEC	Vernon e Wamer
	1932	Temperatura Equivalente	TEq	Dufton

	1936	Calor Equivalente	CE	Bedford
	1937	Temperatura Operativa	TO	Winslow, Herrington e Gagge
	1948	Temperatura Resultante	TR	Missenard
	1957	Temperatura de Globo de Bulbo Úmido	TGBU	Yaglou e Minard
	1960	Índice de Conforto Equatorial	ICE	Webb
	1987	Índice de Verão Tropical	IVT	C.B. Research Institute - Índia

Fonte: Lima *et al.* (2005) apud Lyra (2007).

No Quadro 2.1, é apresentado em índices analíticos o Voto Médio Estimado (PMV), em que através dele é possível definir o conforto térmico dos indivíduos, este índice foi proposto em 1972 por Fanger, e possibilita a análise do conforto térmico em um ambiente fechado, esta avaliação prever a sensação térmica para qualquer combinação no que se refere as variáveis já mencionadas anteriormente, as individuais: nível de atividade de uma pessoa (Met), a vestimenta (Clo), e as variáveis que dependem do clima: temperatura do ar (°C), temperatura de globo (°C), velocidade do ar (m/s) e umidade relativa do ar (%) (LYRA, 2007).

No Voto Médio Estimado (PMV), a escala utilizada para descrever a sensação fisiológica de um indivíduo é de -3 (frio) a +3 (quente), passando por zero, que simboliza a posição de neutralidade (conforto térmico). A tradução de cada número da escala foi feita por Xavier em 1999, apresentado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Tradução da escala de sensação e preferência térmica sugerida pelo PMV.

Muito Quente	+3
Quente	+2
Levemente quente	+1
Neutro	0
Levemente Frio	-1
Frio	-2
Muito Frio	-3

Fonte: Xavier (1999).

O PMV pode ser calculado por meio da Equação 2.17 desenvolvida por Xavier (1999):

$$PMV = [0,303 \cdot e^{-0,036 \cdot M} + 0,028] \cdot L \quad (2.17)$$

Em que:

PMV = voto médio estimado, ou sensação analítica de conforto térmico, adimensional;

M = Taxa metabólica de produção de calor em função da atividade, (W/m^2);

L = carga térmica atuando sobre o corpo, (W/m^2);

A carga térmica é calculada pela equação 2.18, definida por Fanger *apud* Xavier (1999):

$$\begin{aligned}
 L = & M - 3,05 \cdot (5,73 - 0,007 \cdot M - p_a) - 0,42 \cdot (M - 58,15) \\
 & - 0,0173 \cdot M \cdot (5,87 - p_a) - 0,0014 \cdot M \cdot (34 - t_a) \\
 & - 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (t_{rm} + 273)^4] \\
 & - f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a)
 \end{aligned} \tag{2.18}$$

t_{rm} = temperatura radiante média, ($^{\circ}\text{C}$);

t_a = temperatura do ar, ($^{\circ}\text{C}$);

p_a = pressão parcial do vapor de água, (KPa)

f_{cl} = razão entre área do corpo vestido e do corpo nu, adimensional;

t_{cl} = temperatura da superfície externa das roupas, ($^{\circ}\text{C}$);

h_c = coeficiente de transferência de calor por convecção, (W/m^2).

2.3.1 Parâmetros ambientais

Por sua vez, ao que se refere aos parâmetros ambientais a ISO 7730 (2005), determina que: 1) a temperatura do ar corresponde a temperatura seca do ar; 2) para a humidade do ar, as equações de balanço energético são fundamentadas com base na pressão parcial do vapor de água no ar. Definido o estado higroscópico do ar (o quanto que o ar absorve a umidade), em termos da temperatura seca, T em $^{\circ}\text{C}$, e a humidade relativa, HR entre 0 e 1, a pressão parcial do vapor de água, p_{vap} em Pa , é obtida pela seguinte equação:

$$p_{vap} = HR \cdot p_{sat}(T) \tag{2.19}$$

Em que:

$$p_{vap} = 1000 \cdot e^{16.6536 \frac{4030.183}{T-235}} \tag{2.20}$$

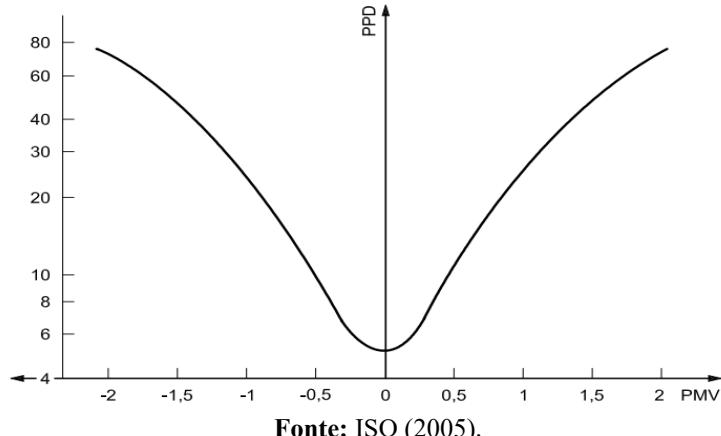
Como também, tem-se a 3) temperatura média radiante a qual corresponde à temperatura média das superfícies opacas visíveis que participam no balanço radiativo com a superfície exterior do vestuário. Este termo é, conforme a ISO 7730 (2005), é de difícil definição, em virtude da dificuldade em avaliar corretamente os fatores de forma, haja vista a influência da componente refletiva.

Uma vez conhecido o PMV, a ISO 7730 indica também a análise do PPD, que é a percentagem de pessoas desconfortáveis termicamente, seu cálculo é obtido por meio da seguinte equação:

$$PPD = 100 - 95 \cdot e^{(-0,03353 \cdot PMV^4 - 0,2179 \cdot PMV^2)} \quad (2.21)$$

Com efeito, a ISO 7730 admite como aceitáveis ambientes térmicos em que $-0,5 < PMV < 0,5$, ou seja, a margem de desconforto para os ocupantes está dentro de não mais de 10% do total de indivíduos presentes naquele espaço. A Figura 2.4 descreve a relação entre o PPD e o PMV.

Figura 2.6 - PPD em função de PMV.



Fonte: ISO (2005).

Logo, por meio deste índice (Voto Médio Estimado), é possível obter resultados analíticos para o cálculo do Conforto Térmico, e assim obter parâmetros mais precisos para a análise da presente pesquisa, para verificar o desempenho do material em estudo.

2.3.2 Parâmetros individuais

Para a obtenção da taxa metabólica, a ISO 7730 (ISO, 2005) traz parâmetros que relaciona a atividade e o metabolismo, o metabolismo é expresso em W/m^2 , como forma de simplificar, foi constituída uma unidade de medida denominada Met, para a análise do metabolismo, em que indica que 1 met corresponde ao metabolismo de uma pessoa sentada a descansar, assim 1 met equivale a $58,15 W/m^2$. A Tabela 2.2 apresenta alguns valores de metabolismo para tipos de atividades diferentes.

Tabela 2.2 - Valores de metabolismo para várias atividades.

Tipo de atividade	Metabolismo (W/pessoa)	Metabolismo (met)	Metabolismo (W/m²)
Deitado	85	0,8	47
Sentado a descansar	104	1,0	58
Atividade sedentária	126	1,2	70
De pé, atividade leve	167	1,6	93
De pé, atividade média	210	2,0	117
Grande atividade	315	3,0	175

Fonte: ISO (2005).

No que diz respeito a vestimenta, esta por sua vez é caracterizada por sua resistência térmica, nas unidades de m^2k/W , da mesma forma que foi definido uma unidade para o metabolismo, também o vestuário apresenta uma unidade própria denominada Clo, a qual corresponde à resistência térmica de $0,155 m^2k/W$. A Tabela 2.3 traz alguns valores de resistência térmica de vestimentas.

Tabela 2.3 - Resistência térmica do vestuário.

VESTUÁRIO	RESISTÊNCIA TÉRMICA (Ivest) (Clo)	RESISTÊNCIA TÉRMICA(Ivest) (m²K/W)
Nu	0	0
Calções	0,1	0,016
Vestuário tropical	0,3	0,047
Vestuário leve de verão	0,5	0,078

Vestuário de trabalho	0,7	0,124
Vestuário de inverno		
para ambiente interior	1,0	0,155
Fato completo	1,5	0,233

Fonte: ISO (2005).

2.4 Condutividade Térmica e Resistência Térmica

Conforme a NBR 15220-1 (ABNT, 2005) a condutividade térmica é a propriedade física de um material homogêneo e isótropo, no qual se verifica um fluxo de calor constante, com densidade de $1W/m^2$, quando submetido a um gradiente de temperatura uniforme de 1 Kelvin por metro.

Na Tabela 2.4, é apresentado a condutividade térmica de alguns materiais usados em construções.

Tabela 2.4 - Condutividade térmica de materiais de construções (adaptado).

Material	Condutividade $k(\frac{W}{m} \cdot K)$	Massa específica $\rho(\frac{kg}{m^3})$	Calor específico $(\frac{J}{kg} \cdot K)$
Bloco cerâmico maciço	0,81	1600	920
Bloco cerâmico furado	0,67	1250	880
Bloco de concreto furado	0,91	1700	1005
Bloco de solo-cimento	0,78	2000	576
Argamassa de cimento-areia	1,15	2000	880

Fonte: Rodrigues (2003).

A resistência térmica total conforme a NBR 15220-1 (ABNT, 2005), por sua vez, é dada pelo somatório do conjunto de resistências térmicas correspondentes às camadas de um elemento ou componente, incluindo as resistências superficiais interna e externa.

A resistência térmica de um elemento pode ser calculada pela relação entre sua espessura e condutividade térmica (Equação 2.22).

$$R = e/k \quad (m^2 \cdot K/W) \quad (2.22)$$

Em que:

R = resistência térmica do elemento ($m^2 \cdot K/W$);

e = espessura da camada (m)

k = coeficiente de condutividade térmica do material (W/m.K).

Para o cálculo da resistência de superfície a superfície, a NBR 15220-2 estabelece a equação 2.23.

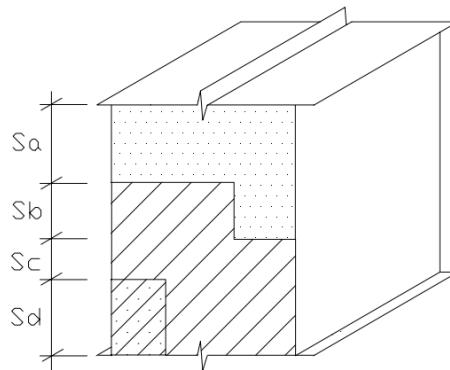
$$R_t = \frac{A_a + A_b + \dots + A_n}{\frac{A_a}{R_a} + \frac{A_b}{R_a} + \dots + \frac{A_n}{R_n}} \quad (2.23)$$

Em que:

R_a, R_b, \dots, R_n são as resistências térmicas de superfície a superfície para cada seção (a, b, ..., n), determinadas pela expressão 2.22;

A_a, A_b, \dots, A_n são as áreas de cada seção;

Figura 2.7 - Seções de um componente com camadas homogêneas e não homogêneas.



Fonte: NBR 15220-2 (ABNT, 2008).

A resistência total, também chamada pela NBR 15220-2 por resistência térmica de ambiente a ambiente, é expressa pela equação 2.24.

$$R_T = R_{si} + R_t + R_{se} \quad (2.24)$$

Em que:

R_t é a resistência térmica de superfície a superfície, determinada pela expressão 2.23;

R_{se} e R_{si} são as resistências superficiais externa e interna, respectivamente, obtidas pela Figura 2.6.

Figura 2.8 - Resistência térmica superficial interna e externa.

R_{si} ($m^2 \cdot K$)/W			R_{se} ($m^2 \cdot K$)/W		
Direção do fluxo de calor			Direção do fluxo de calor		
Horizontal	Ascendente	Descendente	Horizontal	Ascendente	Descendente
0,13	0,10	0,17	0,04	0,04	0,04

2.5 Fonte: NBR 15220-2 (ABNT, 2008).

2.5 Transmitância Térmica ou Coeficiente Global de Transferência de Calor

Segundo Fiegenbaum (2018) apud Frota e Shiffer (2007), a transmitância térmica tem por definição as trocas térmicas superficiais que ocorrem por convecção e radiação, e as trocas térmicas através do material que ocorrem por condução. Assim, abrange as trocas de calor que estão relacionadas a um determinado material segundo a espessura da lâmina, o coeficiente de condutividade térmica, a posição horizontal ou vertical, e ainda, o sentido do fluxo.

Para o presente estudo, os procedimentos de cálculos serão feitos com base na NBR 15220-2 (ABNT, 2008) que define a transmitância térmica como o inverso da resistência térmica total, que tem como simbologia a letra U (Equação 2.25).

$$U = \frac{1}{R_T} \quad (\frac{W}{m^2 \cdot K}) \quad (2.25)$$

Em que:

U = transmitância térmica;

R_T = resistência total do elemento.

Ademais, a NBR 15575-4 (ABNT, 2013), traz critérios que determinam os limites satisfatórios de Transmitância Térmica em função da quantidade de absorbância à radiação solar da superfície externa da parede (Tabela 2.5).

Tabela 2.5 - Transmitância Térmica máximas em paredes externas.

Transmitância Térmica $U \left(\frac{W}{m^2 \cdot K} \right)$	
Zonas 1 e 2	Zonas 3,4,5,6,7 e 8
$U \leq 2,5$	$\alpha^1 \leq 0,6$
	$U \leq 3,7$

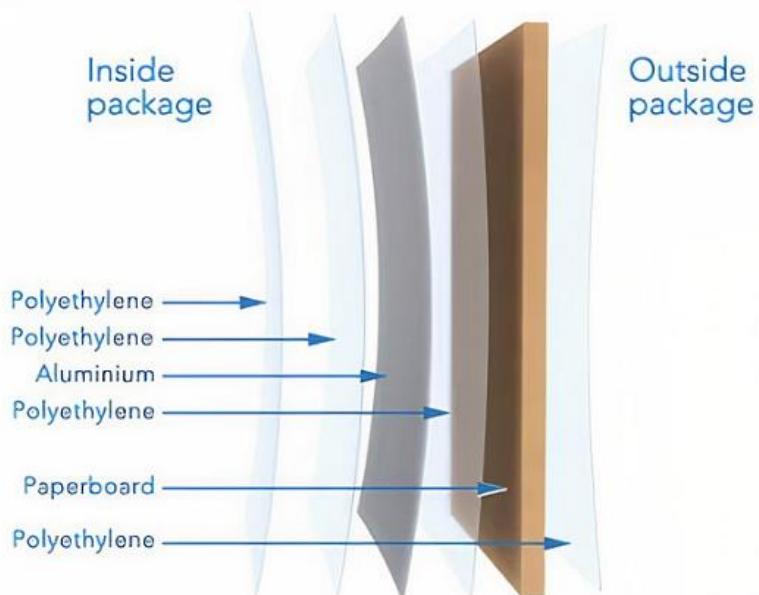
¹ α é absorvância à radiação solar da superfície externa da parede.

Fonte: NBR 15575-4 (ABNT 2013).

2.6 A Capacidade de Isolante Térmico das Caixas Tetra Pak

O processo de reciclagem desse material é feito a partir da separação dos materiais que normalmente são constituídos de 75% de papel, 20% de plástico e 5% de alumínio, sendo assim a embalagem é composta de dentro para fora por 2 (duas) camadas de polietileno, 1 (uma) de alumínio, 1 de polietileno, 1 de papel-cartão e uma de polietileno (Figura 2.7) (Tetra Pak, 2022).

Figura 2.9 - Material das embalagens cartonadas da Tetra Pak.



Fonte: Tetra Pak (2022).

Conforme a empresa Tetra Pak, cada camada possui a seguinte funcionalidade:

1. Polietileno (plástico): Protege a camada de papel e contra a umidade exterior;
2. Papel: Possui função de sustentação da embalagem, descrição das informações sobre o produto, marca e fabricante;
3. Polietileno (plástico): Camada de aderência;
4. Alumínio: Evitar a passagem do oxigênio vindo do meio ambiente, bem como da luz e a contaminação do meio externo;
5. Polietileno (plástico): Camada de aderência;
6. Polietileno (plástico): Proteger o produto e evitar contato com as demais camadas.

Dessa forma, percebe-se que as embalagens são de material 100% reciclável, contudo, para a sua reciclagem é necessário fazer separação desses materiais, o que não se torna um processo fácil e acessível em todos os lugares, dessa forma, encontrar formas de reutilizá-lo de forma rápido se torna uma alternativa vantajosa tanto economicamente quanto para o meio ambiente.

Diversos trabalhos já foram desenvolvidos visando a característica de isolante térmico das caixas Tetra Pak. O projeto Domus, desenvolvido pelo Time Enactus Campus São Carlos - SP, faz uso das embalagens cartonadas no revestimento interno de moradias do acampamento Capão das Antas, este acampamento é localizado na periferia da cidade de São Carlos, e as casas são construídas de forma irregular, com materiais de baixa qualidade, como a madeira serrada/MDF (Medium-Density Fiberboard), resultando em diversas frestas na parede, o que causa baixa retenção da temperatura e dificulta vedação contra intempéries (MATHEUS *et al.*, 2020).

Segundo os autores do projeto Domus, a camada de alumínio promove o isolamento térmico e a reflexão do calor, o que mantém a residência aquecida durante o inverno e com temperaturas mais amenas durante o verão, isso pode ser explicado por meio da troca de gradiente de temperatura, nas diferentes épocas do ano (MATHEUS *et al.*, 2020).

Outro trabalho também foi feito por Fernandes *et al.* (2014), em que revestiram o teto de residências na cidade de Videira-SC, com o intuito de isolá-las termicamente. As caixinhas Tetra Pak devido a sua face aluminizada, impede que o calor seja transmitido para o interior (ou exterior no caso do inverno) pelo processo de radiação, pois reflete cerca de 95% do calor (FERNANDES; DANIELEWICZ; SECCO, 2014). Os autores do projeto afirmam que as famílias beneficiadas com o forro de Tetra Pak expressaram unanimidade de opinião no que diz

respeito a satisfação do material, afirmando que existe o aumento de temperatura em dias mais frios, e a diminuição de temperatura em dias mais quentes. Vale ressaltar que as residências por serem de baixa renda, eram cobertas por telhas de fibrocimento de 4 mm, que, quando expostas ao sol, aquecem demasiadamente, chegando à mais de 40 °C na superfície inferior (ABREU *et al.*, 2011 *apud* FERNANDES; DANIELEWICZ; SECCO, 2014).

Além disso, em outra pesquisa feita por Cembranel *et al.* (2019), foi analisado as embalagens Tetra Brik Aseptic (TBA), como subcoberturas em telhados, atuando como isolante térmico. Eles desenvolveram um protótipo dividido em três compartimentos, este protótipo foi feito de madeira, com forro de PVC e cobertura de fibrocimento, simulando uma edificação residencial. Em cada compartimento foi aplicado um tratamento diferente: no primeiro, eles utilizaram o isolante térmico confeccionado a partir das embalagens TBA sobre o forro; no segundo, foi utilizado isolante térmico comercial sobre o forro; no terceiro, não foi utilizado isolante térmico.

A partir das avaliações feitas, constatou-se que o isolante térmico desenvolvido com as embalagens usadas de Tetra Pak, possuíram, estatisticamente, a mesma condição de isolamento térmico que o isolante comercial.

Conforme Cunha (2011), as Placas Recicladas de Embalagens Longa Vida podem ser favoráveis no desempenho de proteção da condução do calor, entretanto, afirma que o desempenho pode variar de acordo com o conjunto de materiais que estiverem compondo a envolvente do edifício.

Conforme testes em laboratório desenvolvida pela autora supracitada, a Condutividade Térmica das caixas Tetra Pak está por volta de 0,8099 W/ (m.K), e o Calor Específico correspondente a 931,3583 J/kg.K.

Outra pesquisa sobre as propriedades das embalagens Longa Vida foi feito por Barata (2008), em que apresentou valores diferentes para a Condutividade Térmica e Calor Específico: 0,54 W/ (m.K) e 6,53 Kj/(Kg.K), respectivamente.

Cunha (2011) ainda afirma que os dados das propriedades térmicas das caixas Tetra Pak podem variar de um ensaio para outro, considerando que os equipamentos utilizados nos ensaios de sua pesquisa são próprios para outros tipos de materiais e, portanto, foram adaptados para ensaiar com as placas de caixas Longa Vida.

2.7 Paredes de Bloco de Concreto e de tijolos de solo-cimento com argila expandida

Romão (2019), desenvolveu uma pesquisa comparando paredes de blocos de concreto, paredes de solo-cimento com argila expandida (em destaque na sua pesquisa), paredes de blocos cerâmicos e tijolo de solo-cimento, sua comparação se deu em analisar qual delas se comportava como melhor isolante térmico.

De acordo com os resultados apresentados por ele, a parede de bloco de concreto demonstrou a melhor condutividade térmica, ou seja, se comportou como pior isolante.

Outra pesquisa foi feita por Vieira (2021), em que realizou um ensaio em laboratório de forma similar a desenvolvida por Romão (2019). Foi utilizada a alvenaria de tijolo de solo-cimento com argila expandida, mas por sua vez, com o acréscimo de gesso como revestimento, além de alvenarias de blocos de concreto e parede sanduíche com núcleo em EPS.

O foco da pesquisa de Vieira (2021) se encontrava em analisar a capacidade de isolante térmico da parede sanduíche com núcleo em EPS em comparação com a alvenaria de blocos de concreto e a alvenaria de tijolos de solo-cimento com a adição de argila expandida.

2.8 Métodos dos Elementos Finitos para análise térmica com software de Fluidodinâmica Computacional

Diversos trabalhos já foram desenvolvidos utilizando uma poderosa ferramenta de simulação: o ANSYS.

Uma pesquisa desenvolvida pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como programa de pós graduação, utilizou o software ANSYS 19.1 para análise de estruturas de concreto em situações de incêndio, com base no Método dos Elementos Finitos (MEF). O modelo realizado contemplou o comportamento estrutural sob altas temperaturas, visando analisar a resistência dos pilares quando submetidos a este tipo de situação, pois é sabido que a temperatura elevada reduz significativamente a resistência dos materiais (FERREIRA, 2019).

Feita a análise em software, os resultados foram confrontados e validados com resultados oriundos de ensaios laboratoriais, evidenciando boa correlação entre o campo numérico e o experimental. Ao final do estudo, constatou-se que tanto a análise térmica quanto

a termomecânica do pilar em estudo na pesquisa, estão em conformidade com o dimensionamento feito pela NBR 6118:2014 em conjunto com a NBR 15200:2012, o que garante a segurança requerida, protegendo o aço frente ao aumento de temperatura e resistindo ao incêndio sem atingir o colapso estrutural (FERREIRA, 2019).

Outro trabalho foi feito por Vieira e Coelho (2020) em que analisaram através do Método dos Elementos Finitos com a utilização do software ANSYS WORKBENCH o comportamento térmico de elementos simples de concreto. Assim, o trabalho deles apresentou as variações térmicas coletadas em uma parede de uma chaminé e em um bloco de concreto, ambas nos estados estático e transiente, levando em consideração as características de cada material, sua condutividade térmica, calor e massa específicos, coeficientes de dilatação térmicos e suas condições iniciais e de contornos.

Para validação dos dados, os resultados da simulação foram comparados com as soluções analíticas, além de confrontarem também com outros resultados da literatura, de forma a contribuir com a produção científica já existente na área. Os resultados encontrados mostraram-se de acordo com o esperado em relação à utilização do MEF nas aplicações térmicas analisadas (VIEIRA; COELHO, 2020).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Visando trazer conforto térmico para esta região, o presente trabalho busca analisar a eficiência das caixas longa vida, como forma de isolamento térmico em paredes de alvenaria. O escopo é utilizar a composição das caixas de leite: papel, polietileno e alumínio, como isolante térmico, reduzindo a transferência de calor excessiva, proporcionando um ambiente interno mais frio.

O estudo experimental foi realizado no município de Delmiro Gouveia-AL, situado no sertão alagoano. Estes dados foram comparados com a simulação em uma ferramenta computacional de fluidodinâmica com ênfase na transferência de calor, onde foi criado uma camada de material que simulou a condutividade térmica da parede e da caixa Tetra Pak.

Para a presente pesquisa, utilizou-se caixas de leite vazias, após a separação de pouco mais de 100 de caixas de leite, elas foram lavadas e recortadas, feito isso foram lavadas novamente, ambas as vezes com detergente.

Com o auxílio de um ferro de passar roupa foram construídas as placas para serem postas nas paredes (Figura 3.1), o calor do ferro aquece as camadas de polietileno presentes nas caixas de leite, o que provoca a fusão desse material, seu ponto de fusão está em torno de 110°C a 115°C (COUTINHO *et al.*, 2003), assim foi possível ligar as extremidades de cada caixa recortada. Após o processo de resfriamento do polietileno, criou-se uma ligação eficientemente resistente, resultando nas placas que foram usadas como isolante térmico.

Figura 3.1 - Montagem das placas de caixa Tetra Pak.



Fonte: Autora (2022).

A presente metodologia encontra-se estruturada em 3 (três) partes:

1. Foi feito um experimento com placas de $80 \times 40 \text{ cm}$ e $60 \times 34 \text{ cm}$ usadas como isolante térmico em paredes de blocos de concreto e paredes de tijolos de solo-cimento com argila expandida.
2. O segundo experimento foi feito em uma parede de um quarto que já está em utilização, o quarto é usado como descanso para os motoristas do Campus Sertão - UFAL, o revestimento foi posto do lado interno da parede que recebe insolação durante toda a tarde. Os motoristas relataram que o quarto aquece bastante, principalmente pela localização em que se encontra: voltado para o poente.
3. Na última etapa foi feita a simulação de um modelo, com as mesmas condições existentes na parede da sala dos motoristas para possível comparação entre os resultados experimentais e da simulação. O modelo é um corte transversal da parede em estudo, revestida com a caixa Tetra Pak na superfície interna da alvenaria.

3.1 Etapa 1: Procedimentos nas paredes de bloco de concreto e tijolos de solo-cimento com argila expandida

Na 1^a etapa, para fixar as placas nas paredes foram utilizados barbantes e amarrados de forma que as placas ficassem o mais próximo possível das paredes em análise (Figura 3.2), de modo a existir o menor vazio possível, com isso, pôde-se obter resultados mais precisos.

Figura 3.2 - Placa de caixas de leite ajustada na parede de blocos de concreto.



Fonte: Autora (2022).

Para verificação do desempenho como material isolante, foi posto um soprador térmico em uma distância de 38 cm das paredes em análise, essa distância foi definida para que se obtivesse as mesmas condições de ensaios para realização da comparação com os resultados de Romão (2019) e Vieira (2021) que utilizaram distância semelhante em suas pesquisas (Figura 3.3).

Figura 3.3 - Soprador térmico e alvenaria de blocos de concreto com placa de Tetra Pak (face do alumínio voltado para parede).



Fonte: Autora (2022).

Figura 3.4 - Soprador térmico e alvenaria de blocos de concreto com placas de Tetra Pak (face do alumínio para área externa).



Fonte: Autora (2022).

Da mesma forma, para posterior comparação com os resultados encontrados por Romão (2019) e Vieira (2021) a coleta dos dados foi feita a cada 1 minuto no tempo total de 20 minutos, com a temperatura ambiente variando ao longo dos ensaios, conforme o que será apresentado nos resultados.

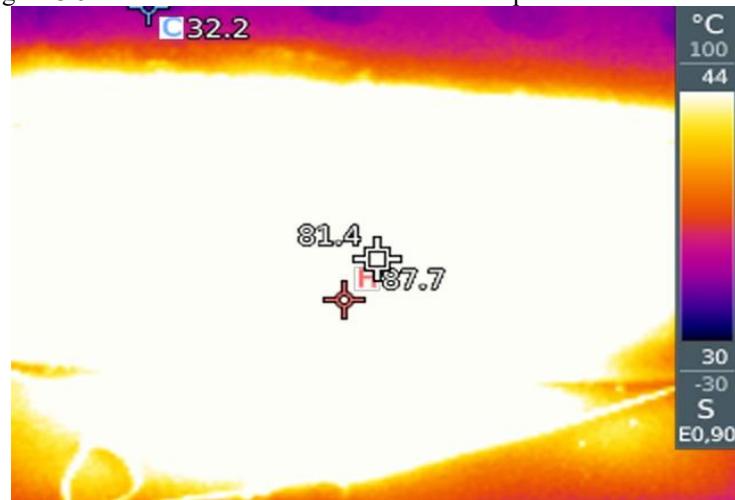
A captura da temperatura foi feita por meio de uma câmera térmica, posicionada para a superfície oposta da alvenaria de onde estava localizado o soprador térmico, de modo a capturar

a temperatura do calor transferido através da parede em análise e da placa de caixa de leite. A temperatura ambiente também foi registrada, esta por sua vez, com o auxílio de um termômetro digital.

Inicialmente, conforme demonstrado na Figura 3.3, foi feita a averiguação na parede de bloco de concreto, com a placa de caixa voltada tanto com o alumínio (face interna da caixa) em contato com a parede, quanto com o polietileno (face externa da caixa), voltada para a parede, de modo a verificar qual face permite a maior transferência de calor. Posteriormente, foi feita a mesma análise para a parede de tijolos de solo-cimento com argila expandida.

A temperatura na superfície da parede em que recebeu a corrente de ar quente do soprador térmico, o qual se manteve em temperatura e velocidade constante durante todo o ensaio foi de 81,4°C (Figura 3.5).

Figura 3.5 - Parede recebendo o calor direto do soprador térmico.



Fonte: A autora (2022).

Como já supracitado, os resultados obtidos com o acréscimo da placa da caixa Tetra Pak foram comparados com os resultados obtidos pela pesquisa do Romão (2019), com suas medições feitas na alvenaria de bloco de concreto, e com a pesquisa da Vieira (2021), com sua medição na parede de tijolo de solo-cimento com argila expandida, juntamente com um revestimento de gesso.

3.1.1 Resultados da pesquisa de Romão (2019) e Vieira (2021)

Conforme Romão (2019) os blocos de concreto possuem condutividade térmica alta, de

acordo com dados apresentados por ele, a alvenaria de bloco de concreto apresentou o pior desempenho ao que se refere a capacidade de isolante térmico.

A medição de temperatura foi feita dentro de um intervalo de 20 minutos, a cada 1 minuto. A alvenaria de bloco de concreto teve variação equivalente a $36,8^{\circ}\text{C} - 25,8^{\circ}\text{C} = 11^{\circ}\text{C}$ (Tabela 3.1).

Tabela 3.1 - Temperatura medida da Alvenaria de Bloco de concreto ($^{\circ}\text{C}$).

Tempo (minutos)	Temp. ($^{\circ}\text{C}$)						
1	25,8	6	27,9	11	32,6	16	35
2	26	7	28,8	12	32,9	17	35
3	26,1	8	29,6	13	33	18	35,3
4	27	9	30,1	14	33,2	19	35,6
5	27,3	10	30,7	15	34,1	20	36,8

Fonte: Adaptado de Romão (2019).

A medição foi feita com o auxílio de uma câmera térmica, e a fonte de calor foi provinda de um soprador térmico (Figura 3.6), similar ao que foi feito na presente pesquisa.

Figura 3.6 - Medição da temperatura na alvenaria de bloco de concreto.



Fonte: Romão (2019).

Na pesquisa feita por Vieira (2021), a medição foi realizada de forma similar na alvenaria de tijolo de solo-cimento com argila expandida, com o acréscimo de gesso. A análise foi feita no intervalo de 23 minutos a cada 1 minuto. Os resultados encontrados estão apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Temperatura medida da Alvenaria de tijolos de solo-cimento com argila expandida.

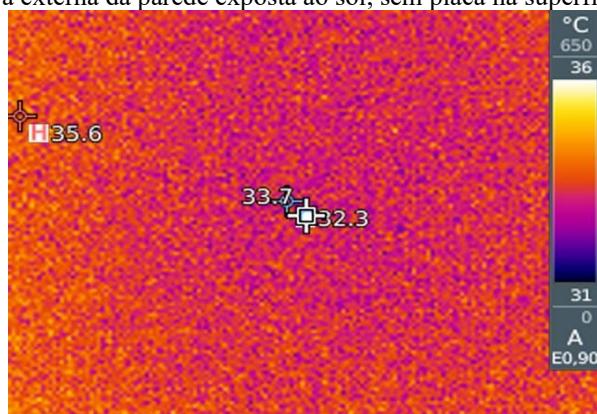
Tempo (minutos)	Temp. (°C)	Tempo (minutos)	Temp. (°C)	Tempo (minutos)	Temp. (°C)	Tempo (minutos)	Temp. (°C)
1	30,6	7	31,2	13	31,7	19	32,5
2	30,8	8	31,3	14	31,8	20	32,5
3	30,4	9	31,4	15	31,7	21	32,6
4	30,4	10	31,3	16	32	22	32,6
5	30	11	31,5	17	32,4	23	32,7
6	30,4	12	31,5	18	32,4		

Fonte: Vieira (2021).

3.2 Etapa 2: Procedimentos nas paredes do quarto de descanso dos motoristas da UFAL – Campus Sertão

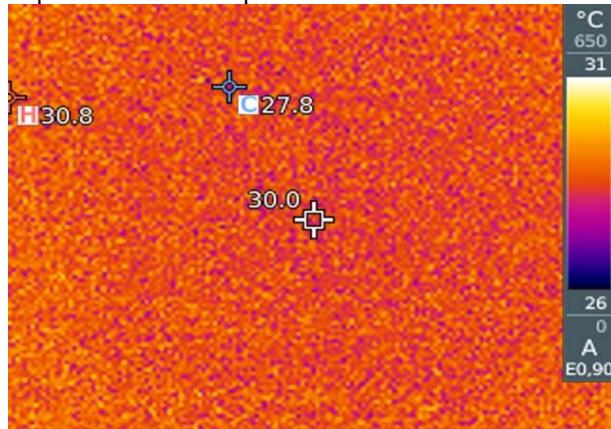
Na 2^a etapa, foram utilizadas 1 (uma) placa de área de $6,7 \text{ m}^2$ e 1 (uma) placa de área $0,57 \text{ m}^2$ aderidas a parede por meio de cola quente. As temperaturas das superfícies das paredes foram capturas com o auxílio de uma câmera térmica e a temperatura ambiente foi registrada por meio de um termômetro digital. Inicialmente foi capturada a temperatura sem as placas de caixa de leite, registrando a temperatura externa da parede exposta ao sol de $33,7^\circ\text{C}$ (Figura 3.7), e a temperatura interna de $30,0^\circ\text{C}$ (Figura 3.8), a temperatura ambiente externa apresentou $25,9^\circ\text{C}$ e a interna $26,1^\circ\text{C}$ (registrada às 14 horas 50 minutos em um dia considerado frio no sertão alagoano, com pancadas de chuva).

Figura 3.7 - Temperatura externa da parede exposta ao sol, sem placa na superfície interna (1° medição).



Fonte: A autora (2022).

Figura 3.8 - Temperatura interna da parede sem o revestimento térmico (2º medição).



Fonte: A autora (2022).

Feito isso, foram colocadas as 2 (duas) placas de caixa de leite na parede localizada para o poente, as caixas foram aderidas a parede pela superfície externa da caixa, de modo que a face do alumínio ficou exposta para os usuários do quarto (Figura 3.9). Esta posição do isolante térmico foi escolhida com base no ensaio anterior (1ª etapa), onde constatou-se que quando a face do alumínio não está em contato com a parede, o ambiente interno fica mais frio, conforme o que será melhor explanado no próximo capítulo.

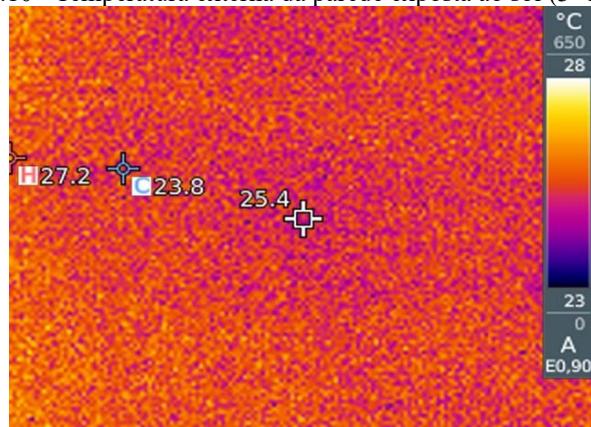
Figura 3.9 - Placas de caixa de leite aderidas a parede do quarto em estudo.



Fonte: A autora (2022).

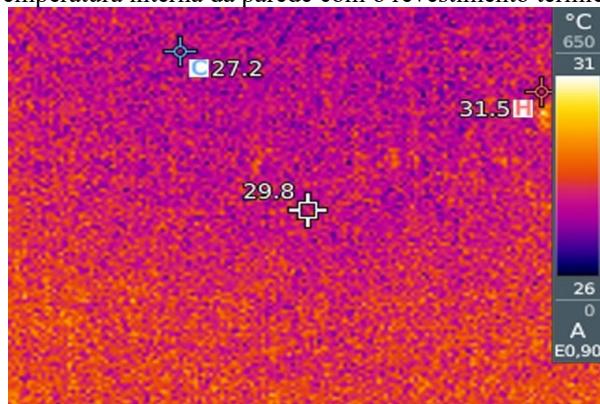
No mesmo dia, foi registrado a temperatura às 17 horas já com o isolante térmico, a superfície externa da parede neste momento apresentou temperatura de 25,4°C (Figura 3.10), e a temperatura da superfície interna da parede foi registrada 29,8°C (Figura 3.11). A temperatura ambiente externa neste horário (17h), estava de 23,5°C e a interna de 23,9°C.

Figura 3.10 - Temperatura externa da parede exposta ao sol (3º medição).



Fonte: A autora, 2022.

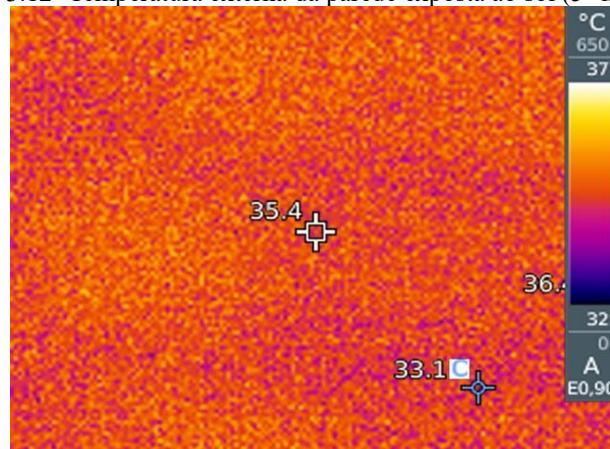
Figura 3.11 - Temperatura interna da parede com o revestimento térmico (4º medição).



Fonte: A autora, 2022.

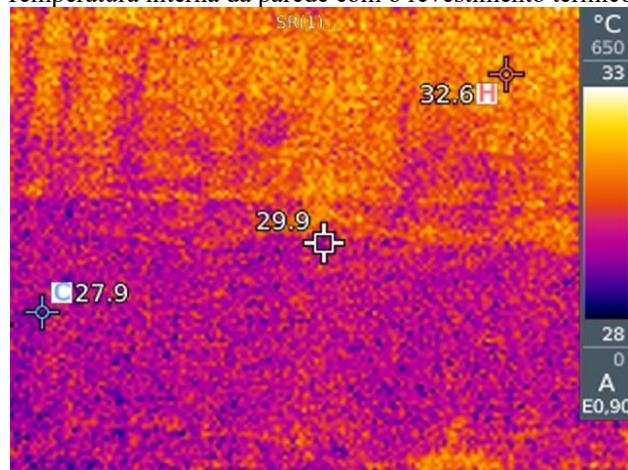
O mesmo ensaio experimental foi feito em um dia ainda durante o inverno, mas com temperatura um pouco superior, com céu aberto, a temperatura ambiente externa estava de 29,2°C e temperatura ambiente interna de 28,9°C, a temperatura externa da parede apresentou 35,4°C (Figura 3.12), e a temperatura interna 29,9°C (Figura 3.13). É importante ressaltar que essa temperatura foi medida às 15 horas, horário aproximado a medição de temperatura realizada sem o revestimento térmico.

Figura 3.12 - Temperatura externa da parede exposta ao sol (5º medição).



Fonte: A autora, 2022.

Figura 3.13 - Temperatura interna da parede com o revestimento térmico (6º medição).



Fonte: A autora, 2022.

Outra medição foi feita em um dia de primavera, com temperatura ambiente superior as outras, com temperatura ambiente externa de 32,5°C e temperatura ambiente interna de 31,5°C. A temperatura da parede exposta ao sol foi de 39,6°C, e da temperatura interna da parede dentro da sala com revestimento térmico foi de 32,9°C.

Outras medições também foram realizadas na parede, tanto sem as placas quanto com as placas, os valores obtidos serão abordados no próximo capítulo.

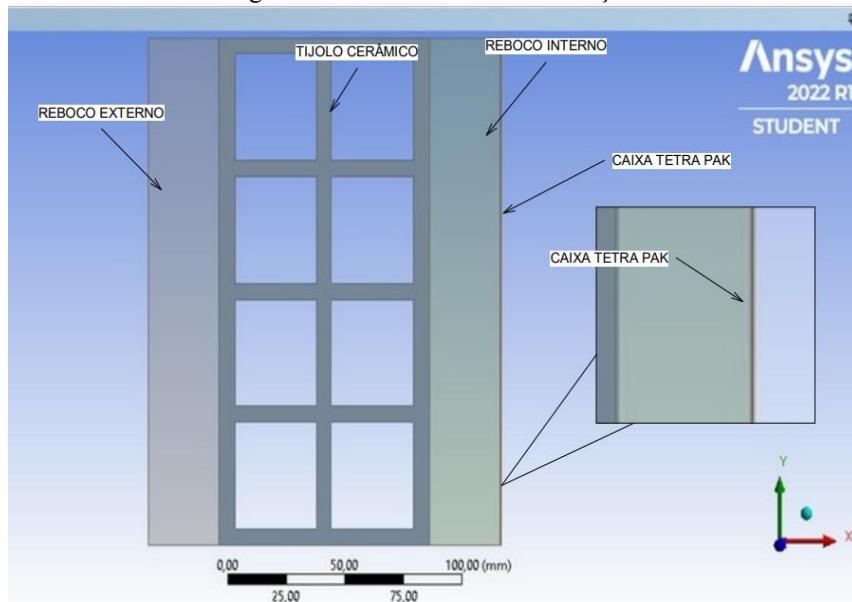
3.3 Etapa 3: Procedimentos em software ANSYS WORKBENCH

Na 3^a etapa, foi feita a simulação no software *CFX* do pacote *WORKBENCH* 2022 R1 (Versão Acadêmica), em que possui 5 passos para realização da simulação.

Na aba *Fluid Flow (CFX)*, tem- se as 5 etapas da simulação:

1. *Geometry*: Neste momento, foi criada uma geometria representando um corte transversal de uma parede. Os domínios desenvolvidos foram: camada do reboco externa (3 cm de espessura), um tijolo de 8 (oito) furos (9 cm de espessura), mais o reboco interno (3 cm de espessura), e por último a camada de caixa Treta Pak (0,5 mm de espessura) (Figura 3.14). A geometria foi feita com base nas condições reais da parede existente na sala de descanso dos motoristas para possível comparação entre os resultados experimentais e os da simulação. É notável na Figura 3.14, a fina camada da caixa Treta Pak na extremidade direita.

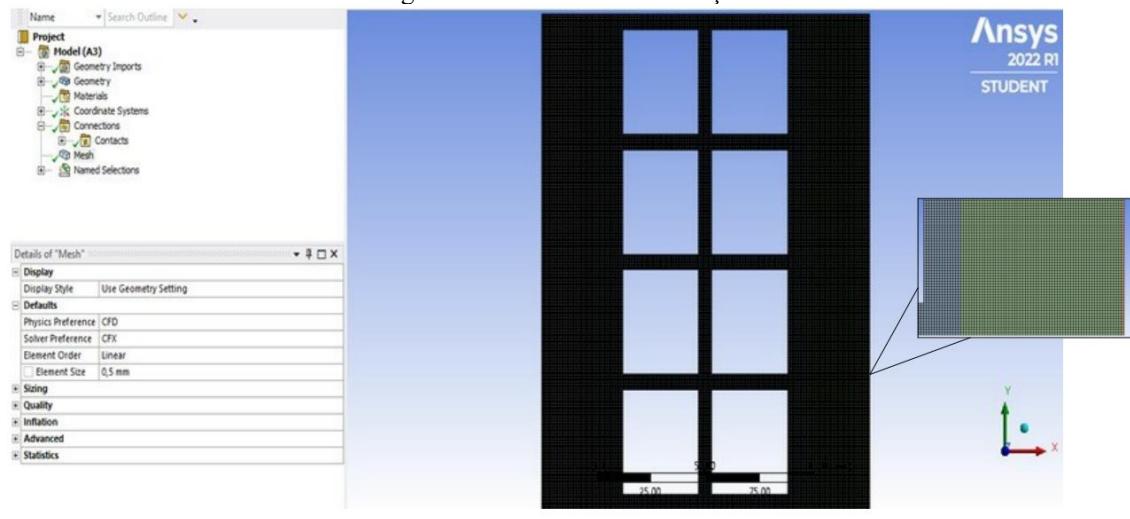
Figura 3.14 – Geometria da simulação.



Fonte: A autora (2022).

2. *Mesh*: A malha foi feita com elementos de dimensões de 0,5 mm, sua funcionalidade é fazer a análise conforme o Método dos Elementos Finitos, os quais quanto menos possível, resulta em melhores aproximações dos resultados.

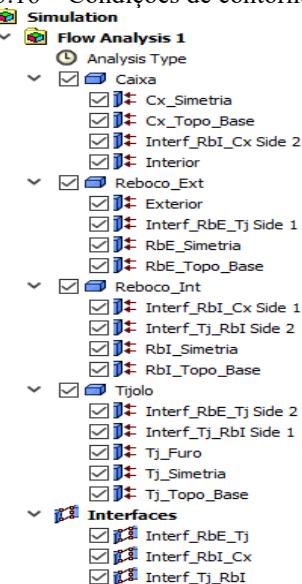
Figura 3.15 – Malha da Simulação.



Fonte: A autora (2022).

3. *Setup*: Nesta etapa foram definidas as condições de contorno para a presente simulação. Foram estabelecidos o que é cada parte da geometria (Figura 3.16), e as propriedades dos materiais, como a condutividade térmica e a espessura de cada camada, além da descrição das expressões dadas pela NBR 15220, para o cálculo da resistência térmica e da transmitância térmica dos componentes em análise (Figura 3.17).

Figura 3.16 – Condições de contorno da geometria.



Fonte: A autora (2022).

Figura 3.17 – Expressões conforme a NBR 15220.

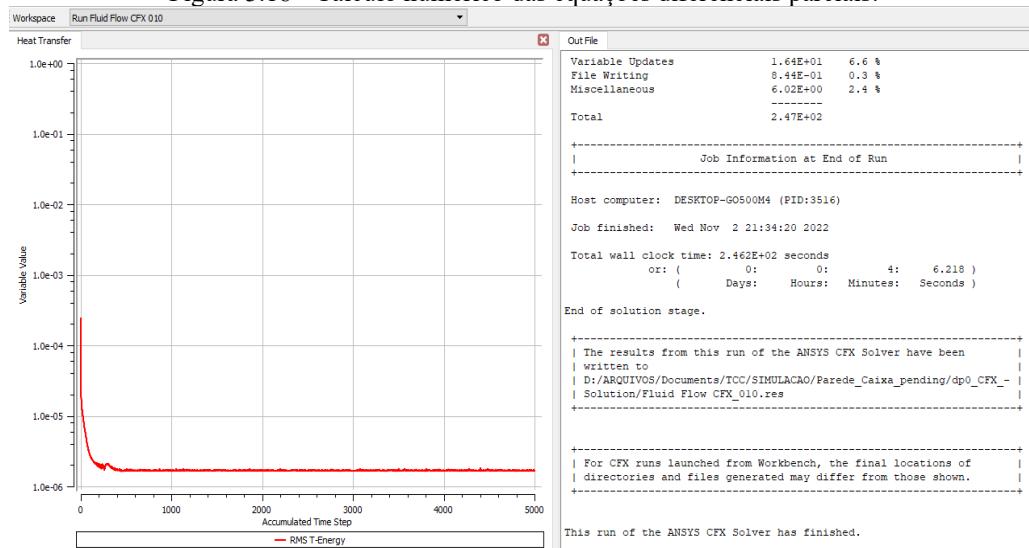
Expressions	
Accumulated Time Step	5500
AreaA	0.001333 [m ²]
AreaB	0.0076 [m ²]
AreaC	0.00114 [m ²]
Current Phase Position	0
Current Time Step	500
K cx	0.54 [W m ⁻¹ K ⁻¹]
K reboco	1.15 [W m ⁻¹ K ⁻¹]
K tijolo	0.67 [W m ⁻¹ K ⁻¹]
L cx	0.5 [mm]
L reboco	30 [mm]
L tijolo	90 [mm]
L tijolo1	7 [mm]
L tijolo2	6 [mm]
L tijolo3	7 [mm]
Phase	Current Phase Position
R camada de ar	0.16 [m ² K / W]
R cx	L cx / K cx
R reboco	L reboco / K reboco
R tijolo	L tijolo / K tijolo
R tijolo1	L tijolo1 / K tijolo
R tijolo2	L tijolo2 / K tijolo
R tijolo3	L tijolo3 / K tijolo
RA	R reboco + R tijolo + R reboco + R cx
RB	R reboco + R tijolo1 + R camada de ar + R tijolo2 + R camada de ar + R tijolo3 + R reboco + R cx
RC	R reboco + R tijolo + R reboco + R cx
Rt parede	(2*AreaA + 4*AreaB + 3*AreaC)/(2*AreaA/RA + 4*AreaB/RB + 3*AreaC/RC)
Rt total	0.13 [m ² K W ⁻¹] + Rt parede + 0.04 [m ² K W ⁻¹]
Sequence Step	5500
T Ar int	31.5 [C]
T Ext	39.6 [C]

Fonte: A autora (2022).

Para obtenção dos resultados, nas expressões é colocado a temperatura de entrada, que equivale a temperatura presente na superfície da parede externa, além disso, também é colocado a temperatura ambiente interna, registrado durante os ensaios experimentais. O Ansys Workbench, seguindo o Método dos Elementos Finitos, calcula a temperatura na superfície da parede interna, revestida com a caixa Treta Pak. Para fins da simulação, utilizou-se a condutividade térmica de 0,54 W/(m.K) nas propriedades da caixa Longa Vida.

4. *Solution:* Nesta etapa, ocorre o processo do cálculo da simulação, onde foram calculadas as equações diferenciais parciais (Figura 3.18). Para a sua resolução, o software se utiliza dos pequenos elementos que foram discretizados na etapa *Mesh*. Por meio da integração da equação diferencial que governa cada volume de controle da malha, obtém-se os resultados da simulação.

Figura 3.18 - Cálculo numérico das equações diferenciais parciais.



Fonte: A autora (2022).

5. *Results*: Nesta parte é apresentado os resultados obtidos, que serão abordados no próximo capítulo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentadas as análises realizadas em cada parte mencionada no Capítulo 3.

4.1 Análise na parede de bloco de concreto e tijolos de solo-cimento com argila expandida

O ensaio 1 foi realizado na parede de blocos de concreto com a face do alumínio encostado na parede, com uma temperatura ambiente no início do ensaio de 25,5°C.

O cálculo da variação de temperatura em cada ensaio se deu por meio da equação 4.1.

$$Variação = Minuto\ final - Minuto\ inicial \quad (4.1)$$

A Tabela 4.1 mostra a variação de temperatura durante o tempo de 20 minutos.

Tabela 4.1 - Parede de blocos de concreto com o alumínio encostado na parede.					
Tempo (min)	T (°C)	Tempo (min)	T (°C)	Tempo (min)	T (°C)
1	27,7	8	29,5	15	30,3
2	28,7	9	29,6	16	30,0
3	28,9	10	29,7	17	30,3
4	29,0	11	30,3	18	30,7
5	29,0	12	30,3	19	30,6
6	29,2	13	30,5	20	30,7
7	29,4	14	30,4		
				Variação	3,0

Fonte: Autora (2022).

A Figura 4 mostra a temperatura capturada pela câmera térmica no minuto 14 do ensaio realizado, com a temperatura correspondente a 30,4°C.

Figura 4.1 - Foto registrada no minuto 14.



Fonte: Autora (2022).

Outrossim, o ensaio 2 foi realizado na parede de blocos de concreto, mas por sua vez, com a face do alumínio para o lado externo, a temperatura ambiente no início do ensaio foi de 29,7 °C. A Tabela 4.2 mostra a temperatura registrada a cada minuto durante o tempo total de 20 minutos, semelhante ao feito anteriormente.

Tabela 4.2 - Parede de blocos de concreto com o alumínio para a face externa.

Tempo (min)	T (°C)	Tempo (min)	T (°C)	Tempo (min)	T (°C)
1	31,0	8	31,3	15	31,4
2	31,0	9	31,6	16	31,6
3	31,1	10	31,6	17	31,7
4	31,2	11	31,4	18	31,6
5	31,3	12	31,4	19	31,7
6	31,1	13	31,5	20	31,8
7	31,2	14	31,4		
				Variação	0,8

Fonte: Autora (2022).

A Figura 4.2 mostra a temperatura registrada no minuto 5, com a temperatura correspondente a 31,3 °C.

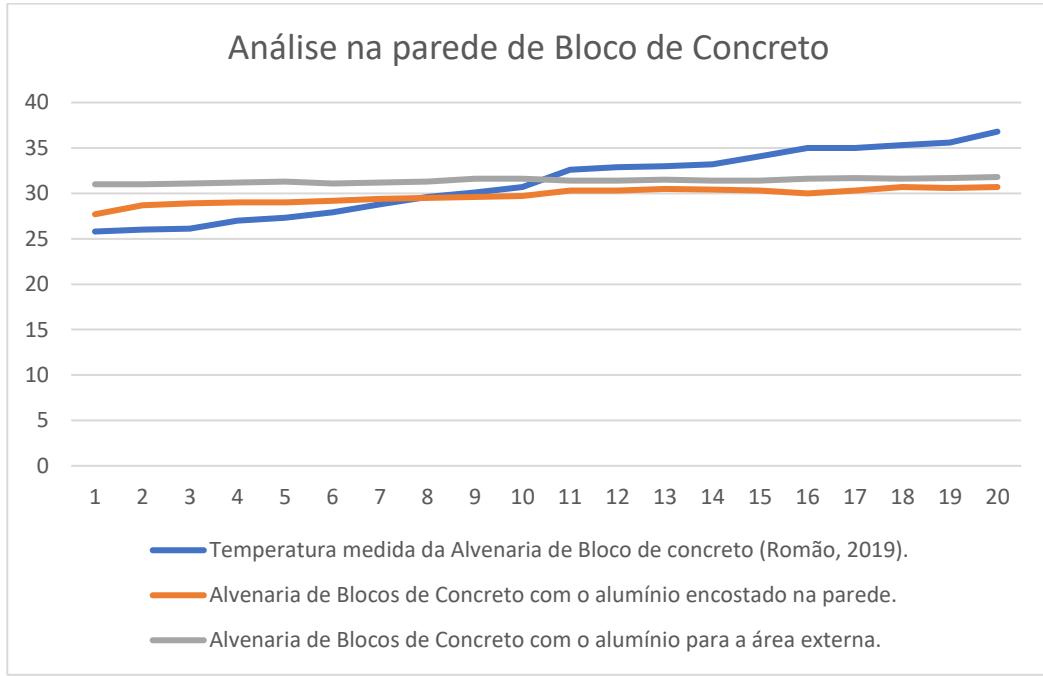
Figura 4.2 - Foto registrada no minuto 5.



Fonte: Autora (2022).

O Gráfico 4.1 apresenta o comportamento da curva produzida ao longo dos 20 minutos durante a análise na alvenaria de blocos de concreto.

Gráfico 4.1 – Análise na alvenaria de blocos de concreto.



Fonte: Autora (2022).

É perceptível que na parede de blocos de concreto a menor variação de temperatura se deu com o alumínio para parte externa. Conforme apresentado no gráfico 4.1, a curva referente a alvenaria de blocos de concreto com o alumínio para essa posição, apresentou maior linearidade, ou seja, a transferência de energia térmica por condução foi quase constante.

Por outro lado, evidentemente, com o alumínio encostado na parede, a curva foi menos linear, mostrando que nessa posição a caixa Tetra Pak pode aquecer mais. Este fato pode ser explicado em virtude das propriedades do alumínio, isto é, pode-se dizer que com este material em contato com a parede que recebe calor diretamente do soprador térmico, ele acumula calor

facilmente, este metal é um excelente condutor de energia térmica, conforme a Associação Brasileira do Alumínio:

Essa característica é um importante meio de transferência de energia térmica, tanto no aquecimento, como no resfriamento. Assim, os trocadores ou dissipadores de calor em alumínio são comuns nas indústrias alimentícia, química, petrolífera, aeronáutica, etc. O alumínio é também um excelente refletor de energia radiante devido ao grande alcance dos comprimentos de onda desde os raios ultravioletas, através dos espectros visíveis, até os raios infravermelhos e ondas de calor, tanto quanto ondas eletromagnéticas de rádio e radar (ABA, 2007).

Com efeito, devido ao contato quase direto com a parede aquecida, separados somente por duas finas camada de polietileno, conforme o que pode ser visto na Figura 2.7 do Capítulo 2, o alumínio acumulou este calor mais facilmente que a face que possui a camada de polietileno juntamente com a camada de papel-cartão, provocando assim maior aquecimento e consequentemente maior variação de temperatura.

O ensaio 3, deu-se na parede de tijolos ecológicos com argila expandida (Tabela 4.3), com o alumínio encostado na parede, a temperatura ambiente no início do ensaio foi de 24,9 °C.

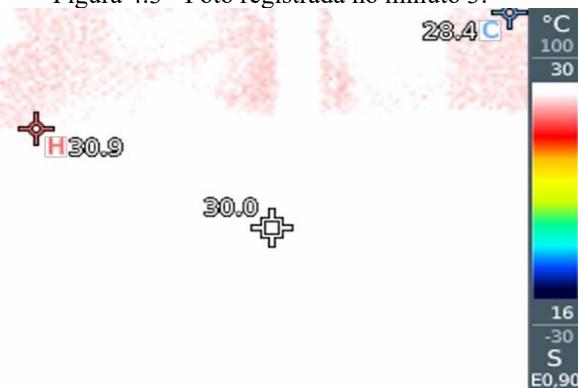
Tabela 4.3 - Parede de tijolos ecológicos com argila expandida, com o alumínio encostado na parede.

Tempo (min)	T (°C)	Tempo (min)	T (°C)	Tempo (min)	T (°C)
1	29,9	8	30,6	15	30,8
2	29,9	9	30,7	16	30,9
3	30,0	10	30,8	17	31,0
4	30,1	11	30,7	18	31,0
5	30,3	12	30,6	19	31,3
6	30,6	13	30,8	20	31,2
7	30,4	14	30,9		
				Variação	1,3

Fonte: Autores (2022).

A Figura 4.3 mostra a captura de temperatura no minuto 3, temperatura correspondente a 30,0 °C.

Figura 4.3 - Foto registrada no minuto 3.



Fonte: Autores (2022).

Dá mesma forma, o ensaio 4 (Tabela 4.4) foi desenvolvido na parede de tijolos ecológicos com argila expandida, com o alumínio voltado para a área externa, a temperatura ambiente no início do ensaio foi de 28,3 °C.

Tabela 4.4 - Parede de tijolos ecológicos com argila expandida, com o alumínio para a área externa.

Tempo (min)	T (°C)	Tempo (min)	T (°C)	Tempo (min)	T (°C)	Variação	
1	30,3	8	31,5	15	30,7		
2	30,3	9	31,0	16	31,1		
3	30,7	10	31,5	17	31,3		
4	30,9	11	31,0	18	31,5		
5	30,9	12	31,3	19	31,6		
6	30,9	13	31,3	20	31,5		
7	31,1	14	31,1				
							1,2

Fonte: Autora (2022).

A Figura 4.4 mostra a temperatura no minuto 3, correspondente a 30,7 °C.

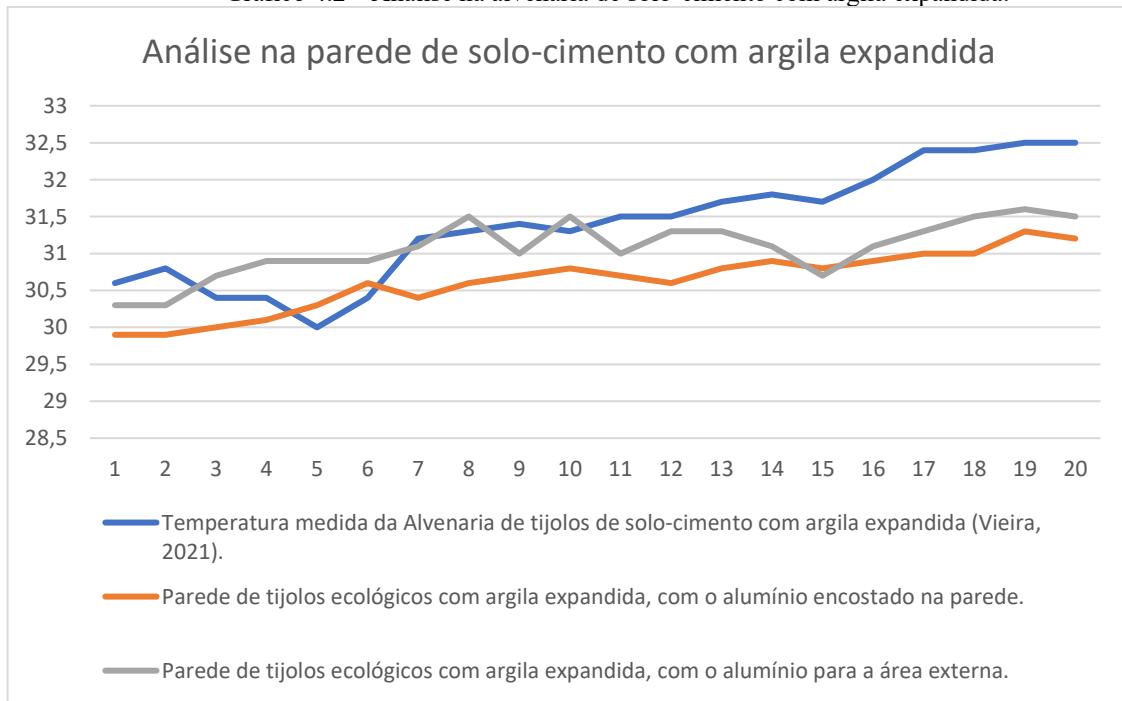
Figura 4.4: foto registrada no minuto 3.



Fonte: Autora (2022).

O Gráfico 4.2 apresenta o comportamento da curva produzida ao longo dos 20 minutos durante a análise na alvenaria de solo-cimento com argila expandida.

Gráfico 4.2 – Análise na alvenaria de solo-cimento com argila expandida.



Fonte: Autora (2022).

É notável que o material da parede de solo-cimento com argila expandida se mostrou mais eficaz no quesito de conforto térmico, conforme o que mostra a Tabela 3.2, em comparação com a alvenaria de blocos de concreto (Tabela 3.1), ambas no Capítulo 3, fato confirmado pela pesquisa do Romão (2019).

Somando a camada de caixa Tetra Pak, obteve-se um resultado satisfatório, pois sem a placa de caixa Tetra Pak a variação de temperatura na alvenaria de solo-cimento com argila expandida foi de 1,9 °C, com a adição da placa, observando a variação com o alumínio tanto

encostado na parede quanto para a área externa, houve uma variação de apenas 1,3 °C, ou seja, a caixa Tetra Pak conseguiu reter 0,7 °C nessa situação.

Por outro lado, sem a adição da placa de Tetra Pak, a alvenaria de blocos de concreto apresentou resultados com grande variação de temperatura, equivalente a 11°C (Tabela 3.1). Contudo, com o acréscimo da camada de caixa Tetra Pak, conforme foi visto anteriormente nas Tabelas 4.1 e 4.2, as variações foram de 3,0°C e 0,8°C respectivamente nesta parede. O que permite afirmar que nesta parede, o acréscimo da camada de caixa Tetra Pak fez uma diferença bastante considerável.

Além disso, vale mencionar que a menor variação também ocorreu com o alumínio voltado para a área externa, visto que a variação foi a mesma na parede de tijolo de solo-cimento com argila expandida, mas na parede de bloco de concreto a menor variação foi obtida com a posição do alumínio não estando em contato com a alvenaria.

Outrossim, conforme visto na Figura 3.5, a temperatura da parede que recebia o calor direto do soprador térmico, sem nenhum meio de interferência de energia térmica, apresentou temperatura bastante elevada, equivalente a 81,4°C, assim, tendo em vista que o maior valor de energia térmica transferida foi de 31,8°C (temperatura na alvenaria de blocos de concreto com o alumínio para o lado externo, no minuto 20), permite afirmar que o material objeto da presente pesquisa, conseguiu manter uma temperatura muito inferior na superfície oposta da parede e quase que constante em todos os ensaios, apesar de estar recebendo uma fonte de calor tão alta.

4.2 Análise na parede do quarto de descanso dos motoristas da UFAL – Campus Sertão

A temperatura neste caso foi capturada em estado real, considerando a temperatura ambiente externa e interna, como também realizando as capturas de temperatura pela câmera térmica tanto na parede exposta ao sol, quanto na face interna da parede do quarto, conforme o que já foi mencionado no capítulo anterior. As temperaturas capturadas são apresentadas na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Temperaturas na parede do quarto de descanso dos motoristas da UFAL.

Horário	Temperatura externa da parede exposta ao sol (sem placa na face interna)	Temperatura interna da parede sem placa	Temperatura da parede exposta ao sol (com placa na face interna)	Temperatura da parede interna	Temperatura ambiente externa	Temperatura ambiente interna
15h	33,7°C	30,0°C	-	-	25,9°C	26,1°C
15h	-	-	35,4°C	29,9°C	29,2°C	28,9°C
17h	-	-	25,4°C	29,8°C	23,5°C	23,9°C
15h	-	-	39,6°C	32,9°C	32,5°C	31,5°C
17h	-	-	39,2°C	33,3°C	29,9°C	28,3°C
15h	41,0°C	39,6°C	-	-	33,2°C	31,3°C
17h	33,2°C	31,8°C	-	-	29,7°C	26,5°C

Fonte: A autora (2022).

As temperaturas foram medidas em 2 (dois) horários diferentes: às 15 horas, considerado uns dos horários mais quentes do dia, e às 17 horas, quando a temperatura diminui um pouco mais.

As temperaturas sem a placa de caixa Tetra Pak foram medidas em dois dias distintos quanto a estação do ano, o primeiro dia foi medido em um dia de inverno às 15 horas, com temperatura ambiente externa de 25,9°C e interna 26,1°C. A temperatura na superfície da parede exposta ao sol foi de 33,7°C e a temperatura da fase interna foi de 30,0°C.

O segundo dia foi medido em um dia de primavera: às 15 horas, a temperatura ambiente externa estava de 33,2°C e a temperatura ambiente interna de 31,3°C, neste horário a face exposta ao sol apresentou temperatura correspondente a 41,0°C e a face interna da parede teve temperatura de 39,6°C.

Às 17 horas, no mesmo dia, a temperatura ambiente externa estava de 29,7°C e temperatura ambiente interna de 26,5°C, a superfície exposta ao sol apresentou 33,2°C e a superfície interna, sem as placas, apresentou 31,8°C.

Nesse contexto, é possível perceber que em um dia de inverno, a temperatura interna costuma ser naturalmente mais quente do que a temperatura externa, o contrário ocorre em um dia quente de primavera.

Com a adição das caixas Tetra Pak em um dia de primavera (com temperatura ambiente externa de 29,2°C e interna de 28,9°C), foi notório que a superfície da parede exposta ao sol apresentou temperatura consideravelmente superior a temperatura da superfície da parede interna do quarto, com uma diferença de 5,5°C.

A temperatura também foi medida em um dia de inverno às 17 horas, para analisar seu comportamento em um ambiente mais ameno. A temperatura ambiente externa e interna registradas foram de 23,5°C e 23,9°C, respectivamente. A temperatura da superfície da parede exposta ao sol foi de 25,4°C e a temperatura da superfície interna da parede foi registrada 29,8°C, o que reafirma as características das regiões semiáridas, que durante a noite, existe essa mudança no gradiente de temperatura, registrando temperaturas externas mais frias do que as internas.

A temperatura também foi registrada em um dia em que foi considerada bastante elevada, tanto às 15 horas quanto às 17 horas. A temperatura ambiente externa e interna às 15 horas estava de 32,5°C e 31,5°C, respectivamente, e a temperatura das superfícies das paredes foram registradas de 39,6°C (temperatura da parede exposta ao sol) e 32,9°C (temperatura da parede interna com o revestimento térmico).

Por sua vez, a temperatura ambiente externa e interna às 17 horas, no mesmo dia, estava de 29,7°C e 26,5°C, respectivamente, e a temperatura das superfícies das paredes foram registradas de 33,2°C (temperatura da parede exposta ao sol) e 31,8°C (temperatura da parede interna com o revestimento térmico).

Observando o comportamento das medições, percebe-se que as temperaturas sem as placas apresentaram pouca variação entre a temperatura externa da parede, e a temperatura interna, sendo que a maior variação foi de 3,7°C, enquanto que as outras duas foram de 1,4 °C.

Com o acréscimo das placas de caixa Tetra Pak, as variações foram consideravelmente maiores, o que evidencia que houve uma mudança na transferência de energia térmica no que se refere a deixar o ambiente interno mais frio. As variações foram de 5,5°C; 6,7°C; 5,9°C.

No entanto, houve uma temperatura excepcional, em que a temperatura da superfície externa da parede (25,4°C) foi consideravelmente inferior à da superfície interna da parede com a placa (29,8 °C). Sabendo que essa temperatura foi registrada às 17 horas de um dia considerado frio no sertão alagoano (dia de inverno), este resultado se deve ao fato de que ao longo do dia, a temperatura interna foi acumulada, e ao anoitecer, a temperatura externa tende

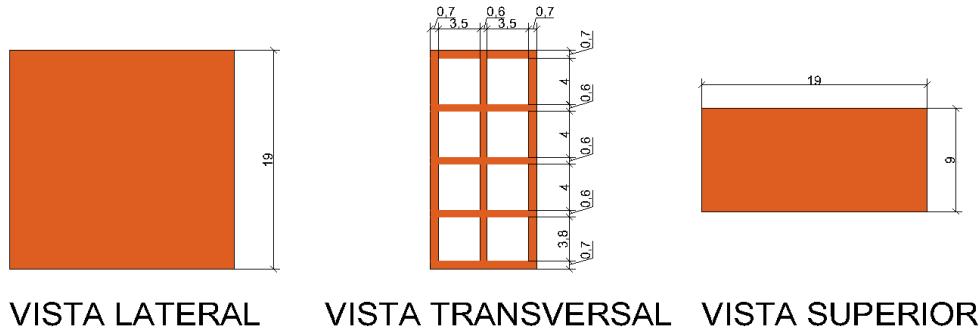
a esfriar mais rapidamente do que a temperatura interna, além disso, é importante mencionar que, as caixas Tetra Pak, por estarem aumentando a resistência da parede, podem ter colaborado para o atraso do resfriamento no interior do quarto em estudo.

4.2.1 Cálculo da Resistência Térmica e da Transmitância Térmica

4.2.1.1 Cálculo sem a placa de caixa de leite

Como dito anteriormente, resistência térmica de um elemento se dá pela relação entre a espessura do elemento e sua condutividade térmica. Sabendo que a parede em estudo foi feita de tijolo cerâmico furado, com 9 cm de largura, 19 cm de comprimento e 19 cm de altura (Figura 4.5).

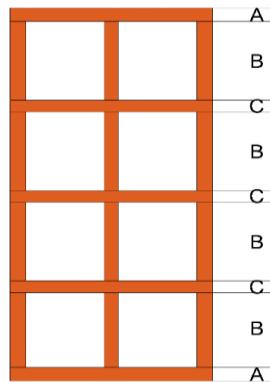
Figura 4.5 - Dimensões do tijolo utilizado na parede da sala dos motoristas.



Fonte: A autora (2022).

Seguindo as especificações da NBR 15220-2:2005, dividiu-se o bloco cerâmico em 3 camadas diferentes, para possível realização do cálculo da resistência térmica (Figura 4.6).

Figura 4.6 - Camadas do bloco cerâmico.



Fonte: A autora (2022).

Tem-se que:

- A espessura do bloco é de 9 cm;
- A espessura do reboco é de 3 cm em cada lado;
- Camada A/C: cerâmica (9,0 cm) + reboco (6,0 cm);
- Camada B: cerâmica (2,0 cm) + reboco (6,0 cm) + camada de ar (7,0 cm).

Para simplificação dos cálculos, a camada da argamassa + reboco será desconsiderada tanto sem a placa de caixa de leite, tanto com a placa.

Assim, as respectivas áreas são:

$$A_{A1} = 19 \times 0,7 = 13,3 \text{ cm}^2 = 1,33 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$A_{B1} = 19 \times 4,0 = 76 \text{ cm}^2 = 7,6 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$A_{C1} = 19 \times 0,6 = 11,4 \text{ cm}^2 = 1,14 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

As resistências térmicas para as camadas A e C podem ser obtidas por meio da Equação 4.2 e Equação 4.3:

$$R_{A/C1} = R_{reboco} + R_{tijolo cerâmico} + R_{reboco} \quad (4.2)$$

$$R_{A/C1} = \frac{e_{reboco}}{\lambda_{reboco}} + \frac{e_{tijolo cerâmico}}{\lambda_{tijolo cerâmico}} + \frac{e_{reboco}}{\lambda_{reboco}} \quad (4.3)$$

Substituindo os valores, tem-se:

$$R_{A/C1} = \frac{0,03}{1,15} + \frac{0,09}{0,67} + \frac{0,03}{1,15}$$

$$R_{A/C1} = 0,186502 (m^2 \cdot K/W)$$

Para a camada B:

$$R_{B1} = R_{reboco} + R_{tijolo cerâmico1} + R_{camada de ar} \\ + R_{tijolo cerâmico2} + R_{camada de ar} \\ + R_{tijolo cerâmico3} + R_{reboco}$$

$$R_{B1} = \frac{e_{reboco}}{\lambda_{reboco}} + \frac{e_{tijolo cerâmico1}}{\lambda_{tijolo cerâmico}} + R_{camada de ar} + \frac{e_{tijolo cerâmico2}}{\lambda_{tijolo cerâmico}} \\ + R_{camada de ar} + \frac{e_{tijolo cerâmico3}}{\lambda_{tijolo cerâmico}} + \frac{e_{reboco}}{\lambda_{reboco}}$$

Substituindo os valores, tem-se:

$$R_{B1} = \frac{0,03}{1,15} + \frac{0,007}{0,67} + 0,16 + \frac{0,006}{0,67} + 0,16 + \frac{0,007}{0,67} + \frac{0,03}{1,15}$$

$$R_{B1} = 0,402025 (m^2 \cdot K/W)$$

Portanto, a resistência da parede, conforme a NBR 15220-2:2008 será:

$$R_{t1} = \frac{2A_{A1} + 4A_{B1} + 3A_{C1}}{\frac{2A_{A1}}{R_{A1}} + \frac{4A_{B1}}{R_{B1}} + \frac{3A_{C1}}{R_{C1}}}$$

Substituindo os valores, tem-se:

$$R_{t1} = \frac{2 \times 1,33 \times 10^{-3} + 4 \times 7,6 \times 10^{-3} + 3 \times 1,14 \times 10^{-3}}{\frac{2 \times 1,33 \times 10^{-3}}{0,186502} + \frac{4 \times 7,6 \times 10^{-3}}{0,402025} + \frac{3 \times 1,14 \times 10^{-3}}{0,186502}}$$

$$R_{t1} = 0,337099 (m^2 \cdot K/W)$$

Dessa forma, a resistência térmica total é:

$$R_{T1} = R_{si} + R_{t1} + R_{se} \quad (4.7)$$

Substituindo os valores, tem-se:

$$R_{T1} = 0,13 + 0,337099 + 0,04 = 0,507099 \text{ (m}^2 \cdot \text{K/W)}$$

Com isso, a transmitância térmica sem a placa Tetra Pak, é de:

$$U_1 = \frac{1}{R_{T1}} \quad (4.8)$$

$$U_1 = \frac{1}{0,507099} = 1,972 \text{ (W/m}^2 \cdot \text{K})$$

4.2.1.2 Cálculo com a placa de caixa de leite

Acrescentando a camada de caixa Tetra Pak, tem-se:

- A espessura do bloco é de 9 cm;
- A espessura do reboco é de 3 cm em cada lado;
- Espessura da caixa Tetra Pak é de aproximadamente 0,05 cm;
- Camada A/C: cerâmica (9 cm) + reboco (6 cm) + caixa Tetra Pak (0,05 cm);
- Camada B: cerâmica (1,4 cm) + reboco (6 cm) + camada de ar (7 cm) + caixa Tetra Pak (0,05 cm).

Assim, as respectivas áreas são:

$$A_{A2} = 19,00 \times 0,7 = 13,335 \text{ cm}^2 = 1,333 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$A_{B2} = 19,00 \times 4,0 = 76 \text{ cm}^2 = 7,6 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$A_{C2} = 19,00 \times 0,6 = 11,4 \text{ cm}^2 = 1,14 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

As resistências térmicas para as camadas A e C são:

$$R_{A/C2} = R_{reboco} + R_{tijolo cerâmico} + R_{reboco} + R_{caixa Tetra Pak} \quad (4.9)$$

$$R_{A/C2} = \frac{e_{reboco}}{\lambda_{reboco}} + \frac{e_{tijolo cerâmico}}{\lambda_{tijolo cerâmico}} + \frac{e_{reboco}}{\lambda_{reboco}} + \frac{e_{caixa Tetra Pak}}{\lambda_{caixa Tetra Pak}} \quad (4.10)$$

Substituindo os valores, tem-se:

$$R_{A/C2} = \frac{0,03}{1,15} + \frac{0,09}{0,67} + \frac{0,03}{1,15} + \frac{0,0005}{0,8099}$$

$$R_{A/C2} = 0,1871196 (m^2 \cdot K/W)$$

Para a camada B:

$$R_{B2} = R_{reboco} + R_{tijolo cerâmico1} + R_{camada de ar} + R_{tijolo cerâmico2} \\ + R_{camada de ar} + R_{tijolo cerâmico3} + R_{reboco} \quad (4.11)$$

$$+ R_{caixa Tetra Pak}$$

$$R_{B2} = \frac{e_{reboco}}{\lambda_{reboco}} + \frac{e_{tijolo cerâmico1}}{\lambda_{tijolo cerâmico}} + R_{camada de ar} + \frac{e_{tijolo cerâmico2}}{\lambda_{tijolo cerâmico}} \\ + R_{camada de ar} + \frac{e_{tijolo cerâmico3}}{\lambda_{tijolo cerâmico}} + \frac{e_{reboco}}{\lambda_{reboco}} \quad (4.12)$$

$$+ \frac{e_{caixa Tetra Pak}}{\lambda_{caixa Tetra Pak}}$$

Substituindo os valores, tem-se:

$$R_{B2} = \frac{0,03}{1,15} + \frac{0,007}{0,67} + 0,16 + \frac{0,006}{0,67} + 0,16 + \frac{0,007}{0,67} + \frac{0,03}{1,15} + \frac{0,0005}{0,8099}$$

$$R_{B2} = 0,402642 (m^2 \cdot K/W)$$

Portanto, a resistência da parede será:

$$R_{t2} = \frac{2A_A + 4A_B + 3A_C}{\frac{2A_A}{R_A} + \frac{4A_B}{R_B} + \frac{3A_C}{R_C}} \quad (4.13)$$

Substituindo os valores, tem-se:

$$R_{t2} = \frac{2 \times 1,333 \times 10^{-3} + 4 \times 7,6 \times 10^{-3} + 3 \times 1,14 \times 10^{-3}}{2 \times 1,333 \times 10^{-3} + 4 \times 7,6 \times 10^{-3} + 3 \times 1,14 \times 10^{-3}} \\ R_{t2} = 0,337752 \text{ (m}^2\text{.K/W)}$$

Dessa forma, a resistência térmica total é:

$$R_{T2} = R_{si} + R_{t2} + R_{se} \quad (4.14)$$

$$R_{T2} = 0,13 + 0,337752 + 0,04 = 0,507752 \text{ (m}^2\text{.K/W)}$$

Assim, a transmitância térmica com o revestimento de caixas Treta Pak é:

$$U_2 = \frac{1}{R_{T2}} \quad (4.15)$$

$$U_2 = \frac{1}{0,507752} = 1,969 \text{ (}\frac{W}{m^2.K}\text{)}$$

Calculando com a condutividade térmica de 0,54 W/ (m.K), a resistência térmica total e a transmitância térmica passam a ser 0,5081454 (m².K/W) e 1,968 (W/m².K), respectivamente (Tabela 4.6).

Tabela 4.6 – Resultados para a Condutividade Térmica de 0,54 W/ (m.K).

R_{A/c3}	0,1874282 (m ² .K/W)
R_{B3}	0,4029506 (m ² .K/W)
R_{t3}	0,3381007 (m ² .K/W)
R_{T3}	0,5081007 (m ² .K/W)
U₃	1,968 (W/m ² .K)

Fonte: A autora (2022).

Conforme já apresentado no Capítulo 2, na NBR 15575-4 (ABNT, 2013) são descritos os requisitos mínimos de acordo com o zoneamento bioclimático, e a Transmítância Térmica (Tabela 2.2). Sabendo que para cor externa branca, se tem uma absorção de $\alpha = 0,3$ (ABNT

NBR 15220-2, 2005), e que para este grau de absorção o limite de transmitância térmica deve ser $U \leq 3,7$, é possível afirmar que o nível de Transmitância Térmica com e sem a placa atende o requerido pela NBR 15575-4.

Além disso, através do cálculo realizado é perceptível que a diferença de transmitância térmica com e sem a placa de caixa Treta Pak, foi baixa, apesar de na prática, a variação ter apresentado maior diferença.

É notável também que a condutividade térmica de $0,8099 \text{ W}/(\text{m. k})$ apenas aumentou em $1 \times 10^{-3} \text{ W}/(\text{m. K})$, em comparação com a condutividade térmica de $0,54 \text{ W}/(\text{m. k})$, o que permite afirmar que os dados encontrados por ambos os pesquisadores expressão semelhança, o que garante confiabilidade nos resultados obtidos.

Diante do que foi visto, pode-se afirmar que as caixas Longa Vida podem ser usadas como isolantes térmicos no Sertão Alagoano, uma vez que conseguiram experimentalmente diminuir a alta temperatura no interior do quarto em estudo, como também reteram de forma significativa o calor provindo do soprador térmico.

Apesar de analiticamente a resistência térmica obtida pelo uso da caixa Treta Pak não ter expressado grande valores comparando-a com a resistência da parede sem a placa Treta Pak, o seu uso como isolante térmico no interior de edificações não se torna inviável, uma vez que o material apresentou características térmicas de uma isolante, dessa forma, deve-se avaliar o custo-benefício do material, sabendo que é um material reciclado, não gera custos se for material doado para construções de moradias de baixo-médio padrão, por exemplo, ou um custo muito reduzido se for material comprado por profissionais que executam a catação de materiais recicláveis.

4.3 Resultados da Simulação

Os resultados das temperaturas da superfície interna da parede na simulação, são apresentadas na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Resultados da temperatura interna.

Horário	Temperatura da parede exposta ao sol (dado de entrada)	Temperatura ambiente interna (dado de entrada)	Temperatura da parede interna, com placa (resultados da simulação)	Temperatura da parede interna, com placa (resultados experimentais)
15 h	35,4°C	28,9°C	30,14°C	29,9°C
17h	25,4°C	23,9°C	24,19°C	29,8°C
15h	39,6°C	31,5°C	33,05°C	32,9°C
17h	39,2°C	28,3°C	30,4°C	33,3°C

Fonte: A autora (2022).

Sabendo que as temperaturas de entrada foram definidas com base nos dados experimentais, e sabendo que as temperaturas de 35,4°C e 39,6°C são referentes ao horário de 15 horas, nota-se que o resultado da simulação foi eficiente nesse horário, aproximando-se do resultado real. Analisando as duas colunas da direita, é perceptível essa similaridade nas temperaturas internas da simulação e dos ensaios.

Contudo, as temperaturas internas das 17 horas, resultantes da simulação, não se aproximaram tanto dos ensaios experimentais, provavelmente pela característica das regiões semiáridas, em que a noite a temperatura nos ambientes internos são superiores as temperaturas nos ambientes externos, pois a energia térmica internamente não é dissipada com tanta facilidade quanto a externa.

Além disso, analisando os dados obtidos pelos ensaios experimentais, observa-se que as temperaturas da superfície interna se mostraram quase que constante ao longo do tempo, fato este que, as caixas Tetra Pak podem ter contribuído para tal comportamento.

A simulação também calculou os resultados da Resistência Térmica total de ambiente a ambiente e a Transmitância Térmica, segundo a NBR 15220. Os valores obtidos foram extremamente próximos aos calculados analiticamente (Tabela 4.8).

Tabela 4.8 – Resultados da simulação para a Condutividade Térmica de 0,54 W / (m. K).

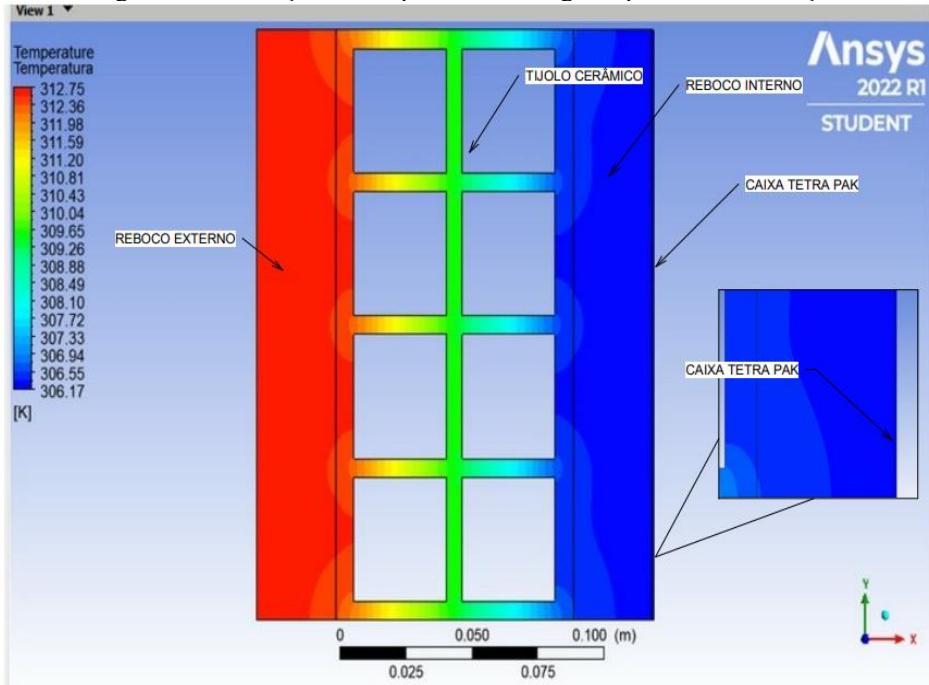
$R_{A/C4}$	0,187428 ($m^2 \cdot K/W$)
R_{B4}	0,402951 ($m^2 \cdot K/W$)
R_{t4}	0,338101 ($m^2 \cdot K/W$)
R_{T4}	0,508101 ($m^2 \cdot K/W$)
U_4	1,96811 ($\frac{W}{m^2 \cdot K}$)

Fonte: A autora (2022).

Nesse contexto, é evidente que o modelo proposto para simular a parede com a placa de caixa Tetra Pak, mostrou-se eficiente para temperaturas diurnas, devendo-se aperfeiçoar as condições de contorno para condições noturnas em regiões semiáridas.

Na Figura 4.7 é possível ver a variação de temperatura ao longo da parede, através do campo de temperaturas, para a temperatura de entrada equivalente a 39,6°C.

Figura 4.7 – Variação de temperatura ao longo da parede na simulação.



Fonte: A autora (2022).

Na extremidade superior esquerda, pode-se ver as temperaturas ao longo da espessura da parede em estudo dada em Kelvin, essas temperaturas representam a média de temperatura corresponde a região distinta por cada cor, de modo que a região externa, está com temperatura

mais elevada, representada pela cor vermelha e correspondente a 312,75K, o que equivale ao dado de entrada em °C (39,6°C). Enquanto que a temperatura interna, após passar pela placa de caixa Tetra Pak, está com temperatura de 306,17K, o que equivale a 33,02°C, sendo representada pela tonalidade de azul escuro, conforme o que se observa na Figura 4.7.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para responder à questão da problemática dessa pesquisa, esse trabalho buscou abordar de maneira analítica, experimental e por meio de simulação o comportamento das caixas Longa Vida como isolante térmico em paredes de alvenaria no Sertão Alagoano, e a partir da análise desse comportamento avaliar se a sua funcionalidade como isolante térmico traz mudanças que venham a ser significativas para o aumento do conforto térmico numa região semiárida.

Foi averiguado que a caixa Tetra Pak possui propriedades que podem reduzir a temperatura no interior de uma edificação que tem como característica temperatura externa elevada. Tanto no inverno, que é uma época ainda quente no Sertão Alagoano, quanto durante o verão onde a temperatura se eleva muito, a caixa Tetra Pak conseguiu reduzir a transferência de energia térmica, por dar uma resistência maior a transferência de calor através da parede.

Foi possível perceber que a temperatura com a introdução das Placas de Caixa Tetra Pak nas análises experimentais, apresentou grande diminuição. Contudo a avaliação analítica constatou que o acréscimo da caixa Longa Vida reduziu minimamente o índice de Resistência e Transmitância Térmica.

Nesse contexto, o material pode ser usado como isolante térmico em paredes de alvenaria em regiões semiáridas, no entanto, vale observar para seu uso outros fatores, tais como: custo-benefício e mão de obra para sua aplicação, de modo a avaliar se o quanto de redução de temperatura interna recompensa a instalação.

Ademais, foi notável que durante o horário menos quente registrado às 17 horas, a temperatura durante o inverno se mostrou mais fria no ambiente externo, do que no ambiente interno, característica comum em regiões com clima quente. Contudo, é nítido que o material isolante Tetra Pak pode ter facilitado o impedimento da transferência de calor de dentro para fora do quarto em estudo, o que pode ser uma desvantagem para regiões quentes, uma vez que a necessidade de resfriar é prioridade em localidades próximas a Linha do Equador para alcançar o conforto térmico.

Sugestões para trabalhos futuros:

- Avaliar o comportamento usando a caixa Tetra Pak na parte externa da edificação, de modo a se utilizar da propriedade do alumínio para refletir a incidência solar.

- Analisar o parâmetro estético da caixa Tetra Pak tanto para ambientes internos quanto externos.
- Formas de tornar a aplicação das placas mais práticas e fáceis de executar, pois o processo da construção das placas e aderência na superfície das paredes, na presente pesquisa, foi feito de forma artesanal.
- Comparação com outros materiais sustentáveis e isolantes, como embalagens de caixas de ovos, embalagens de isopor usadas com frequência para servir comida, etc.
- Avaliar o uso também no teto das edificações em regiões semiáridas.
- Desenvolvimento do aprimoramento do modelo computacional da parede de alvenaria com o acréscimo da caixa placa de Tetra Pak para ambientes noturnos, como também desenvolver simulação em maior escala.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR 15220-1:2005. Desempenho térmico de edificações Parte 1: Definições, símbolos e unidades. Rio de Janeiro.

ABNT NBR 15220-2:2008. Desempenho térmico de edificações Parte 2: Definições, símbolos e unidades. Rio de Janeiro.

ABNT NBR 15220-4:2013. Desempenho térmico de edificações Parte 4: Definições, símbolos e unidades. Rio de Janeiro.

ABNT NBR 15575-4:2013. Edificações habitacionais - Desempenho. Parte 4: Sistemas de vedações verticais internas e externas – SVVIE.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS, INC. **Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy**, ASHRAE Standard 55-2010. Atlanta, 1992.

Associação Brasileira do Alumínio- ABAL. **Fundamentos e Aplicações do Alumínio**. R. Humberto I, nº 220 • 4º andar CEP 04018-030 São Paulo - SP Brasil, 2007.

BARROS, A.; FILHO, J.; SILVA, A.; SANTIAGO, G. **Climatologia do Estado de Alagoas**. Embrapa, Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, Recife, PE. 2º edição, p.01, p.33, 2012. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/950797/climatologia-do-estado-de-alagoas#:~:text=O%20Estado%20de%20Alagoas%2C%20em,e%20da%20temperatura%20do%20ar.> Acesso em 07/09/2022.

BITTENCOURT, Leonardo; CÂNDIDO, Christhina. **Introdução à Ventilação Natural**. EdUFAL, Maceió, AL. 3ª edição, p.01, p.126, 2008.

BARATA, Tomás Q. F. **Propostas de painéis leves de madeira para vedação externa adequados ao zoneamento bioclimático brasileiro**. Campinas: Faculdade de Engenharia Civil – UNICAMP, 2008. 264p. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Civil, UNICAMP, 2008.

CEMBRANEL, Adir; HENKES, Jairo; AGUIAR, Wagner; GOMES, Tayoná; PAGLIARINI, Marcos. **Embalagens Tetra Pak® no isolamento térmicos de cobertura em edificações.** Revista Gestão e Sustentabilidade Ambiental, Florianópolis, v. 8, n. 1, p.388-404, jan/mar. 2019.

CLIMA E CONDIÇÕES METEOROLÓGICAS MÉDIAS EM DELMIRO GOUVEIA NO ANO TODO. **Weather Spark**, 2022. Disponível em:
<https://pt.weatherspark.com/td/31175/Condi%C3%A7%C3%A7%C3%B5es-meteorol%C3%B3gicas-em%C3%A9dias-em-Delmiro-Gouveia-Brasil-hoje>. Acesso em 09/12/2022.

CUNHA, E.C. Placas Recicladas em Embalagens Longa Vida: Caracterização, design e propostas projetuais. 2011. 120 folhas. Tese (doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos – EESC, Universidade de São Paulo – USP, São Carlos, 2011.

ECOLIFE TETRA PAK. Composição. Disponível em:
<https://ecolifetetrapak.wordpress.com/reciclagem/>. Acesso em 15/09/2022.

FERNANDA M. B. COUTINHO, Ivana L. MELLO, Luiz C. de SANTA MARIA. Polietileno: Principais Tipos, Propriedades e Aplicações. Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 13, nº 1, p. 1-13, 2003.

FERNANDES, Jaquiel; DANIELEWICZ, Ramona; SECCO, Joice. Isolamento térmico de residências através da reutilização de embalagens Tetra Pak. Revista Brasileira de Extensão Universitária v. 5, n. 1, p. 13-17, jan./jun. 2014.

FERREIRA, M. W. Estudo numérico dos efeitos estruturais da exposição de pilares em concreto armado a altas temperaturas. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

FROTA, Anésia; SCHIFFER, Sueli. Manual de Conforto Térmico. Studio Nobel, São Paulo. 5^a edição, p.01, p.244, 2001.

FIEGENBAUM, Cristina. Análise comparativa de isolamento térmico entre painéis pré-moldados, alvenaria de vedação de blocos de concreto e blocos cerâmicos para fins de conforto térmico. Orientador: Professor Mestre Marcelo Freitas Ferreira. 2018. 66p. TCC. – Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Vale do Taquari, Lajeado, 2018.

IBGE – Instituto Brasileiro De Geografia e Estatística. **Pesquisa Trimestral do Leite.** Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9209-pesquisa-trimestral-do-leite.html?=&t=destaques>>. Acesso em 24/09/2021.

INTERNATIONAL STANDARD: ISO 7730:2005. **Ergonomics of the thermal environment-Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria.** Switzerland, 2005.

HARRIS, Ana. **Do lixo ao elemento construtivo embalagens de leite do tipo “longa vida” (TETRAPAK).** Congresso Brasileiro de Ciência e tecnologia em resíduos e desenvolvimento sustentável, Costão do Santinho- Florianópolis- Santa Catarina, p.3943, p.3952, 2004.

NETO, Carlos. **Transferência de calor (TCL).** Volume 1- Parte 3. Instituto Federal de Santa Catarina, p. 04, p. 05, 2010.

SOUZA, Ludmilla. **Brasil gera 79 milhões de toneladas de resíduos sólidos por ano.** Disponível em: <<https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2019-11/brasil-gera-79-milhoes-de-toneladas-de-residuos-solidos-por-ano>>. Acesso em 24/09/2021.

LAMBERTS, Roberto. **Desempenho térmico de edificações.** LabEEE. Florianópolis. 7^a edição, p.01, p.239, 2016.

LYRA, Débora. **Aplicabilidade de índices de conforto térmico: um estudo de caso em Salvador – BA.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana – Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2007.

Material das embalagens cartonadas da Tetra Pak. Treta Pak. Disponível em: <https://www.tetrapak.com/pt-br/solutions/packaging/packaging-material/materials>. Acesso em: 28 de agosto de 2022.

M. B. Uemura. Tetra Pak® e a Logística Reversa. 2015. Disponível em <https://mudarfuturo.fea.usp.br/artigos/estrategias-reducao-gee-2014/tetra-pak-e-a-logistica-reversa>. Acessado em 05/09/2022.

OLIVEIRA, T. A. de; RIBAS, O. T. **Sistemas de controle das condições ambientais de conforto**. Ministério da Saúde. Brasília, 1995.

OLIVEIRA, P.J. **Transmissão de Calor-Radiação**. Departamento Engenharia Electromecânica, UBI, 2014.

RODRIGUES, Edmundo. **Processos de Transmissão de Calor**. Conforto Térmico das Construções. 2003.

ROMÃO, Éliton. **Análise do desempenho térmico em tijolo ecológico confeccionado com uso de argila expandida**. Orientador: Professor Mestre Rogério de Jesus dos Santos. 2019. 66p. TCC. – Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas, Delmiro Gouveia, 2019.

SILVA, Flávio. *et al.* **Diagnóstico Ambiental do Município de Delmiro Gouveia - Estado de Alagoas**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Rio de Janeiro, 2002.

OLIVEIRA, P.J. **Transmissão de Calor – Radiação**. Departamento Engenharia Electromecânica, UBI, 2014.

VIEIRA, Amanda. **Análise comparativa térmica entre sistemas de vedação constituídos por paredes sanduíche em concreto com núcleo de EPS, alvenaria de vedação de blocos de concreto e tijolos de solo cimento com adição de argila expandida para fins de conforto térmico**. Orientador: Professor Mestre Rogério de Jesus dos Santos. 2021. 62p. TCC. – Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas, Delmiro Gouveia, 2021.

VIEIRA, Denilson.; COELHO, Nailde. **Utilização do Método dos Elementos Finitos no Estudo Térmico de Elementos Simples de Concreto**. RCT – Revista de Ciência e Tecnologia. V. 6. 2020.

XAVIER, Antonio A. de P. **Condições de conforto térmico para estudantes de 2º grau na região de Florianópolis**. Florianópolis, 1999. Dissertação de Mestrado- Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.