

**UNIEVANGÉLICA**

**CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**HUDSON OLIVEIRA AQUINO**

**RUBERVAL FERREIRA DE MORAIS NETO**

**DESEMPENHO E TRANSMITÂNCIA TÉRMICA E A  
TRANSFERÊNCIA DE CALOR NO CONCRETO: ASPECTOS  
GERAIS E O ISOLAMENTO TÉRMICO COM EPS.**

**ANÁPOLIS / GO**

**2018**

**HUDSON OLIVEIRA AQUINO  
RUBERVAL FERREIRA DE MORAIS NETO**

**DESEMPENHO E TRANSMITÂNCIA TÉRMICA E A  
TRANSFERÊNCIA DE CALOR NO CONCRETO: ASPECTOS  
GERAIS E O ISOLAMENTO TÉRMICO COM EPS.**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDO AO  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DA UNIEVANGÉLICA**

**ORIENTADOR: LEANDRO DANIEL PORFIRIO**

**ANÁPOLIS / GO: 2018**

## FICHA CATALOGRÁFICA

AQUINO, HUDSON OLIVEIRA; MORAIS, RUBERVAL FERREIRA DE.

Desempenho e transmitância térmica e a transferência de calor no concreto: aspectos gerais e o isolamento térmico com EPS

91P, 297 mm (ENC/UNI, Bacharel, Engenharia Civil, 2017).

TCC - UniEvangélica

Curso de Engenharia Civil.

1. Desempenho térmico

2. Transmitância térmica

3. Fluxo térmico

4. Parede de Concreto

I. UNI/ENC

II. Bacharel (10<sup>o</sup>)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

AQUINO, Hudson Oliveira; MORAIS, Ruberval Ferreira de. Desempenho e transmitância térmica e a transferência de calor no concreto: aspectos gerais e o isolamento térmico com EPS. TCC, Curso de Engenharia Civil, UniEvangélica, Anápolis, GO, 2018.

## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Hudson Oliveira Aquino

Ruberval Ferreira de Moraes Neto

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO:

Desempenho e transmitância térmica e a transferência de calor no concreto: aspectos gerais e o isolamento térmico com EPS.

GRAU: Bacharel em Engenharia Civil

ANO: 2018

É concedida à UniEvangélica a permissão para reproduzir cópias deste TCC e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste TCC pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

  
Hudson Oliveira Aquino  
Hud.eng@outlook.com

  
Ruberval Ferreira de Moraes Neto  
rubervalferreiraneto@hotmail.com

**HUDSON OLIVEIRA AQUINO**  
**RUBERVAL FERREIRA DE MORAIS NETO**

**DESEMPENHO E TRANSMITÂNCIA TÉRMICA E A  
TRANSFERÊNCIA DE CALOR NO CONCRETO: ASPECTOS  
GERAIS E O ISOLAMENTO TÉRMICO COM EPS**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDO AO CURSO DE  
ENGENHARIA CIVIL DA UNIEVANGÉLICA COMO PARTE DOS REQUISITOS  
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL**

**APROVADO POR:**

  
\_\_\_\_\_  
**Leandro Daniel Porfírio, Mestre (UniEvangélica)**  
**(ORIENTADORA)**

  
\_\_\_\_\_  
**Eduardo Martins Toledo, Mestre (UniEvangélica)**  
**(EXAMINADOR INTERNO)**

  
\_\_\_\_\_  
**Rhogério Correia de Souza Araújo, Mestre (UniEvangélica)**  
**(EXAMINADOR INTERNO)**

**DATA: ANÁPOLIS/GO, 10 de Outubro de 2018**

## RESUMO

Nas últimas décadas têm sido grandes os esforços dos pesquisadores na busca por mais informações sobre como se poderá continuar provendo o desenvolvimento das cidades sem que isso ocorra de forma agressiva ao meio ambiente, um dos aspectos mais relevantes desse desenvolvimento sustentável refere-se ao uso racional de energia elétrica. Neste contexto, inserem-se a Física e a Engenharia, com o papel de conceber técnicas e materiais inovadores, procurando reduzir o consumo de energia elétrica, sem que obrigatoriamente se tenha que abrir mão do bem estar adquirido com sua aplicação. Em todas as edificações construídas existem elementos que separam os ambientes internos das condições climáticas externas, iremos chamar este conjunto de elementos (paredes, janelas, telhados e piso) de envolvente da edificação. Conhecer a transmitância térmica e os processos físicos que participam na envolvente permite avaliar a resposta da edificação frente às mudanças meteorológicas (temperatura, radiação solar, vento, etc.) possibilitando na etapa de projeto escolher alternativas e soluções técnicas que garantam um desempenho térmico adequado à localidade em que o edifício será construído. Desta forma realizaram-se ensaios para observação do fluxo térmico em paredes leves e pesadas e simulações com o *software ISOVER - Saint Gobain* para o cálculo da transmitância térmica das paredes, os resultados obtidos destacaram uma redução significativa do fluxo térmico e da transmitância térmica em até 86%, com o aditivo do material isolante EPS no interior das paredes, devido tais diferenças recomenda-se o usos dessas paredes com adição do material EPS em locais onde haja necessidade de se isolar o ambiente externo do ambiente interno ou vice-versa.

### **PALAVRAS-CHAVE:**

Transmitância térmica. Resistência térmica. Desempenho térmico. Fluxo térmico. Capacidade térmica. Bioclimatologia. Parede de concreto. EPS.

## **ABSTRACT**

In the last decades, the efforts of researchers have been invested greatly in the search for more information on how one can continue to provide the development of the cities without it happening in an aggressive way to the environment, one of the most relevant aspects of this sustainable development refers to the rational use of electricity. In this context, Physics and Engineering are inserted, with the role of designing innovative techniques and materials, seeking to reduce the consumption of electric energy, without necessarily having to give up the well-being acquired with its application. In every building there are elements that separate the internal environments from the external climatic conditions, we'll call this set of elements (walls, windows, roofs and floor) the surrounding of the building. Knowing the thermal transmittance and the physical processes that participate in the surroundings allows us to evaluate the response of the building to the meteorological changes (temperature, solar radiation, wind, etc.), allowing in the design stage to choose alternatives and technical solutions that guarantee an adequate thermal performance to the location in which the building will be built. This way, tests were performed to observe the thermal flux in light and heavy walls and simulations with the software ISOVER - Saint Gobain to calculate the thermal transmittance of the walls, the results obtained pointed out a significant reduction in the thermal flow and the thermal transmittance in up to 86%, with the additive of the EPS insulation material inside the walls, due to such differences it is recommended to use these walls with addition of the EPS material in places where it is necessary to isolate the external environment from the internal environment or vice versa.

### **KEYWORDS:**

Thermal transmittance. Thermal resistance. Thermal performance. Thermal flow. Thermal capacity. Bioclimatology. Concrete wall. EPS.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Grandezas do SI utilizadas no estudo da transferência de calor .....	12
Figura 2. Condução, convecção e radiação térmica.....	14
Figura 3. Condição para transferência de calor ( $\Delta T$ ).....	15
Figura 4. Representação do processo de transferência de energia pela condução térmica .....	22
Figura 5. Parede plana com transferência de calor unidimensional .....	24
Figura 6. A dependência com a temperatura da condutividade térmica de sólidos selecionados. .....	27
Figura 7. Volume de controle diferencial em coordenadas cartesianas .....	28
Figura 8. Condições de contorno para equação da difusão de calor na superfície $x=0$ . .....	31
Figura 9. Representação esquemática da radiação térmica solar.....	32
Figura 10. A intensidade de radiação (I).....	34
Figura 11. Relação entre Emissividade e Absortividade. ....	35
Figura 12. Zona de Conforto Térmico Humano. ....	39
Figura 13. Laudo técnico da Argamassa Utilizada. ....	42
Figura 14 . Dados da Simulação Para Calculo da Transmitância Térmica da Parede 1. ....	50
Figura 15 . Dados da Simulação Para Calculo da Transmitância Térmica da Parede 2 .....	51
Figura 16 . Dados da Simulação Para Calculo da Transmitância Térmica da Parede 3. ....	51
Figura 17 . Dados da Simulação Para Calculo da Transmitância Térmica da Parede 4. ....	52

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1. Calor Específico De Alguns Materiais ( <b><i>C<sub>p</sub></i></b> ).....	17
Tabela 2. Densidade De Alguns Materiais (P) .....	17
<b>Tabela 3. Condutividade Térmica em diferentes materiais</b> .....	26
Tabela 4. Elementos Construtivos Ensaaiados.....	40
Tabela 5. Dimensão dos Elementos Construtivos Ensaaiados.....	41
Tabela 6 . Propriedades dos materiais sólidos.....	46
Tabela 7. Valores Admissíveis de Transmitância Térmica de Vedações Externas - ABNT ...	46
Tabela 8. Propriedades Térmicas de Materiais Utilizados em Paredes Externas - ABNT .....	47
Tabela 9. Transmitância Térmica dos Elementos Construtivos Ensaaiados.....	50
Tabela 10. Comparativo Transmitância Térmica e Capacidade Térmica – INMETRO.....	53
Tabela 11. Comparativo Transmitância Térmica - ABNT.....	53

**LISTA DE GRÁFICOS**

Gráfico 1. Parede 1 (Bloco cerâmico e Argamassa de Revestimento) .....	44
Gráfico 2 .Parede 2 (Bloco de Concreto e Argamassa de Revestimento).....	44
Gráfico 3 .Parede 3 (Bloco cerâmico, Argamassa de Revestimento e EPS).....	45
Gráfico 4 . Parede 4 (Bloco de Concreto, Argamassa de Revestimento e EPS) .....	45

## LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

$\alpha$	Absortividade
A	Área da Superfície [ $m^2$ ]
$\varphi$	Atraso Térmico [h]
Q	Calor [W]
$C_p$	Calor Específico [KJ/(kg.K)]
$C_{pM}$	Calor Específico Molar
$Dq$	Calor Quase-Estático
$C_V$	Capacidade Calorífica Volumétrica
C	Capacidade Térmica [ $m^2$ ]
h	Coefficiente de Transferência de Calor por Convecção [W/( $m^2$ .K)]
$h_r$	Coefficiente de Transferência de Calor por Radiação [W/( $m^2$ .K)]
K	Condutividade Térmica [W/(m.K)]
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann [ $5,67 \cdot 10^{-8} \frac{w}{m^2 K^4}$ ]
$\rho$	Densidade [ $kg/m^3$ ]
$\rho_T(v)$	Densidade de Energia
$\Delta u$	Diferença de Energia [J]
$\Delta \theta$	Diferença de Temperatura [K]
$\alpha$	Difusividade Térmica [ $m^2/s$ ]
$\varepsilon$	Emissividade
U	Energia [J]
S	Entropia [ $m^2$ ]
e	Espessura da Parede [m]
L	Espessura do Material [m]
I	Intensidade de Radiação [W/( $m^2$ / .sr)]
$v \text{ a } v + dv$	Intervalo de Frequência [H]
$N_A$	Número de Avogadro [ $6,02 \times 10^{23}$ ]
N	Número de Mol
$\nabla$	Operador Gradiente Tridimensional
$\mu_j$	Potencial Eletroquímico
P	Pressão [Pa]
Q	Quantidade de Calor [J]

$R_T(\nu)$	Radiância Espectral [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]
$R_A$	Resistência Térmica [ $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ ]
$R_C$	Resistência Térmica para Convecção [ $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ ]
$R_R$	Resistência Térmica para Radiação [ $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ ]
$\dot{E}_g$	Taxa de Energia Gerada no Volume de Controle [W]
$\dot{q}$	Taxa de Geração de Energia por Unidade de Volume [ $\text{W}/\text{m}^3$ ]
$E_g$	Taxa de Geração de Energia Térmica [W]
$\Phi$	Taxa de Transferência de Calor por Unidade de Área [ $\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ ]
$T_1$	Temperatura da Superfície [K]
$T_2$	Temperatura do Fluido em Contato com a Superfície [K]
$T$	Temperatura [K]
$\Delta t$	Tempo [s]
$W$	Trabalho [J]
$U$	Transmitância Térmica [ $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ]
$\dot{E}_{acu}$	Variação de Energia Térmica [J]
$\Delta T$	Variação de Temperatura [K]
$\nu$	Viscosidade Cinematica [ $\text{m}^2/\text{s}$ ]
$V$	Volume [ $\text{m}^3$ ]

	8
<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>10</b>
<b>1.1 JUSTIFICATIVA</b>	<b>12</b>
<b>1.2 OBJETIVO</b>	<b>12</b>
1.2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
<b>1.3 METODOLOGIA</b>	<b>13</b>
<b>1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO</b>	<b>13</b>
<b>2 DESEMPENHO E TRANSMITÂNCIA TÉRMICA</b>	<b>14</b>
<b>2.1 ALGUMAS PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS</b>	<b>15</b>
<b>2.2 CONDUÇÃO TÉRMICA</b>	<b>21</b>
2.2.1 CONDUÇÃO TÉRMICA EM PAREDES PLANAS	22
2.2.2 LEI DE FOURIER	23
2.2.2.1 CONDUTIVIDADE TÉRMICA	25
2.2.2.2 EQUAÇÃO DA DIFUSÃO	27
<b>2.3 RADIAÇÃO TÉRMICA</b>	<b>31</b>
2.3.1 INTENSIDADE DE RADIAÇÃO	34
2.3.2 EMISSIVIDADE E ABSORTIVIDADE	34
<b>2.4 CONVECÇÃO TÉRMICA</b>	<b>35</b>
<b>2.5 CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS DE ELEMENTOS CONSTRUTIVOS</b>	<b>36</b>
2.5.1 RESISTÊNCIA TÉRMICA	36
2.5.2 RESISTÊNCIA DE CONVECÇÃO E RADIAÇÃO	36
2.5.3 TRANSMITÂNCIA TÉRMICA	37
<b>2.6 DESEMPENHO TÉRMICO</b>	<b>37</b>
2.6.1 BIOCLIMATOLOGIA	38
2.6.2 ZONA DE CONFORTO TÉRMICO	38
<b>3 METODOLOGIA</b>	<b>39</b>
<b>3.1 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS</b>	<b>41</b>

	9
<b>3.2 DADOS EXPERIMENTAIS E CÁLCULOS REALIZADOS</b>	<b>43</b>
<b>3.3 CALCULANDO A CAPACIDADE TÉRMICA</b>	<b>47</b>
<b>3.4 DESEMPENHO TÉRMICO RESULTADOS</b>	<b>49</b>
<b>4 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>55</b>
<b>5 REFERÊNCIAS</b>	<b>57</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Em todas as edificações construídas, sejam elas comerciais ou residenciais, existem elementos que separam os ambientes internos das condições climáticas externas, iremos chamar esse conjunto de elementos (paredes, janelas, telhados e piso) de envolvente da edificação.

Nas últimas décadas têm sido grandes os esforços dos pesquisadores na busca por mais informações e conhecimentos sobre como se poderá continuar provendo o desenvolvimento das cidades sem que isso ocorra de forma agressiva ao meio ambiente. A reciclagem e o reaproveitamento de materiais que ainda possuem grande potencial de aplicabilidade são vistos como as soluções mais evidentes em direção ao desenvolvimento sustentável. Um dos aspectos mais relevantes desse desenvolvimento refere-se ao uso racional de energia elétrica.

Neste contexto, insere-se a Engenharia, com o papel de conceber técnicas e até mesmo materiais inovadores, cujo principal objetivo seja o de reduzir o consumo de energia elétrica, sem que obrigatoriamente se tenha que abrir mão do bem estar, adquirido com sua aplicação.

O conhecimento dos processos físicos que participam na envolvente da edificação permite avaliar a resposta da edificação frente às mudanças meteorológicas (temperatura, radiação solar, vento, etc.) na etapa de projeto e escolher as alternativas e soluções técnicas que garantam um desempenho térmico adequado à localidade em que o edifício será construído. O estudo da transferência de calor, na envolvente, também representa uma ferramenta importante para diagnosticar o desempenho de uma edificação existente.

Nos últimos vinte anos, as facilidades proporcionadas pelos sistemas de ventilação e climatização artificiais induziram uma despreocupação com o consumo de energia elétrica para a obtenção de conforto térmico. Nesse período, a construção civil concebeu ambiente onde o conforto térmico dependia exclusivamente desses sistemas. Atualmente as edificações são responsáveis por 42% do consumo de energia elétrica (LAMBERTS, 1997) sendo parte desse consumo devido aos sistemas mecânicos de climatização. Na região nordeste, devido a elevada intensidade da radiação solar, o fluxo de calor através dos fechamentos opacos pode chegar a  $560 \text{ W/m}^2$  (OLIVEIRA, 1986) representando, portanto, uma importante parcela de carga térmica nas edificações. O desconforto causado por essa situação é bastante conhecido. As alternativas para enfrentar o problema constam de modificações que vão desde a

concepção do projeto até a substituição de materiais convencionais utilizados na construção civil.

Através do uso de sistemas construtivos com elevada resistência térmica, pode-se reduzir o fluxo de calor através dos fechamentos e, dessa forma, diminuir a carga térmica no interior das edificações. Consequentemente, edificações que venham a utilizar sistemas construtivos com essa característica apresentarão menor necessidade de consumo de energia elétrica destinada à climatização.

O conhecimento das propriedades térmicas dos materiais utilizados na construção civil constitui o ponto de partida para a abordagem do problema da transferência de calor através dos fechamentos das edificações. Portanto, escolhendo-se de maneira correta o tipo de material a ser utilizado nas construções pode-se chegar à concepção de sistemas alternativos que serão capazes de reduzir a parcela de carga térmica solar que é transmitida para o interior das edificações. Atualmente há uma grande busca pelo aprimoramento das técnicas conhecidas para a redução do consumo de energia elétrica destinada a obtenção de conforto térmico.

Quando um fenômeno natural ou artificial é objeto de estudo da ciência, é necessário que os estudos relativos a ele estejam ancorados em métodos científicos e que seus resultados, ao serem divulgados (por revistas especializadas, mídias, livros didáticos), sejam feitos em uma linguagem universal, para que outros pesquisadores consigam compreender, discutir, refutar e repetir os ensaios realizados pelos cientistas.

Neste sentido, as grandezas físicas utilizadas no estudo da transferência de calor são especificadas nas unidades do Sistema Internacional (SI). Este sistema foi definido em 1960 pela décima primeira Conferência Geral de Pesos e Medidas e recomendado como padrão mundial, que é adotado em muitas normas brasileiras (ABNT). A definição das grandezas a serem utilizadas e seus símbolos são apresentadas na seguinte figura

**Figura 1. Grandezas do SI Utilizadas no Estudo da Transferência de Calor**

Grandeza Física	Unidade do Sistema Internacional (S.I.)	Símbolo
Comprimento	metro	m
Massa	quilograma	kg
Tempo	segundo	s
Carga elétrica	coulomb	C
Quantidade de matéria	mol	mol
Temperatura	kelvin	K
Intensidade luminosa	candela	Cd

Fonte: Adaptado De Stoa – Usp.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

A problemática em questão é muito discutida na atualidade, pois existem incontáveis campanhas e tentativas de se gerar economia quanto ao uso de energia elétrica. Com o desenvolvimento tecnológico, aplicação de novos materiais e avanços em processos construtivos aplicados à Engenharia Civil, relacionados ao conforto térmico, vem a necessidade de se melhorar a qualidade de vida e o conforto das pessoas.

Tal objetivo pode ser alcançado com a fabricação de uma alvenaria de vedação capaz de comportar um bom isolante térmico entre o meio externo e o interno da edificação, sem que haja, deformação. Mas, sempre consciente da necessidade de se obter tal conforto com uma utilização sensata e sempre reduzida de energia elétrica utilizada pelos sistemas de climatização.

É importante compreender as características físicas dos materiais empregados e suas referências, na hora da escolha do material que irá compor a alvenaria de vedação, pois assim pode-se adequar os projetos às situações mais desejáveis em relação ao conforto térmico buscando sempre a maior economia de energia possível.

Estudos como este, podem contribuir para que os agentes envolvidos na área de Construção Civil, possam compreender as características dos materiais empregados, para promover o conforto térmico, e seus fundamentos físicos das interações com o meio externo e interno.

## 1.2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é descrever os mecanismos de transferência de calor nos elementos de concreto, da envolvente das edificações, a partir dos fundamentos Físicos. Tais

mecanismos irão definir o desempenho térmico da edificação e suas repercussões no consumo energético e conforto térmico.

### 1.2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Compreender a importância do desempenho térmico de uma estrutura de concreto.
- Discutir os processos de transferência de calor em uma construção.
- Propor um orçamento de edificações simples (casa) para possibilitar uma maximização do desempenho térmico durante sua vida útil.

### 1.3 METODOLOGIA

Estudo teórico em diversas bibliografias básicas, artigos, revistas, normas técnicas e outras fontes de informações afins.

Acompanhamento e análise do desempenho térmico e da transferência de calor em elementos de concreto em alvenaria simples. Observaremos também a transmitância térmica de tais elementos que irá servir como parâmetro relevante quanto a economia de energia elétrica e ao conforto térmico experimentado pelo usuário.

### 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho estrutura-se por abordagens gerais referentes aos conceitos e aos componentes dos elementos de concreto. Com enfoque na análise de seu desempenho térmico e de sua transferência de calor.

## 2 DESEMPENHO E TRANSMITÂNCIA TÉRMICA

Os materiais e elementos construtivos se comportam termicamente em função de suas propriedades térmicas. Precisamos compreender os principais meios de transferência de calor para que possamos realizar a análise do desempenho térmico de determinada edificação. As principais formas de transferência de calor conhecidas são: condução térmica, convecção e radiação térmica. No presente trabalho também iremos buscar uma melhor compreensão das características térmicas dos principais materiais utilizados na construção civil, pois estes tem grande contribuição na transferência de energia térmica ou simplesmente calor.

**Figura 2. Condução, Convecção e Radiação Térmica.**

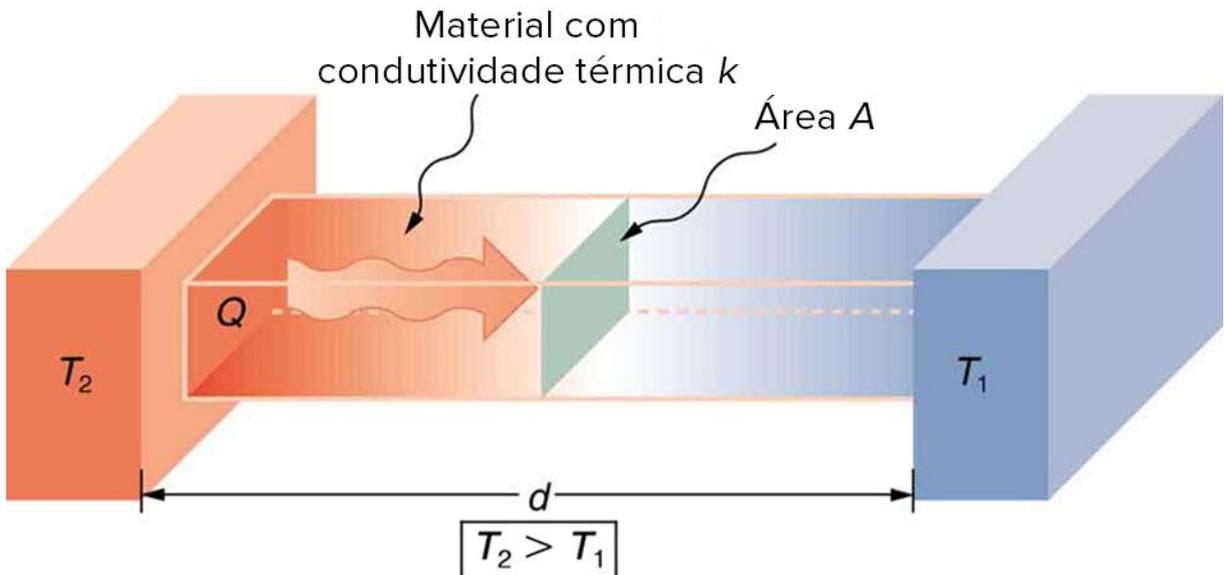


Fonte: Ebanataw 2006

O calor pode ser definido como a forma de energia que pode ser transferida de um sistema para outro como um resultado de uma diferença de temperatura entre esses sistemas. Para fins de cálculo, devemos compreender melhor a forma de transmissão de calor que representa basicamente as taxas de fluxo dessa energia que atravessam determinados materiais.

A condição essencial para a transmissão de calor é que os corpos tenham temperaturas diferentes. A Figura 2 exemplifica esta afirmação.

**Figura 3. Condição Para Transferência De Calor ( $\Delta T$ ).**



Fonte: khanacademy, 2018.

## 2.1 ALGUMAS PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS

A base deste trabalho é a observância da transferência de energia, na forma de calor, e em nossa análise das condições, meios e circunstâncias da transferência de calor, se fará necessário o entendimento de determinadas propriedades da matéria. Tais propriedades são geralmente conhecidas por propriedades termodinâmicas e caracterizam-se por duas categorias distintas: as propriedades de transporte e as propriedades termodinâmicas. As propriedades de transporte podem ser caracterizadas pelos coeficientes das taxas de difusão, como  $(k)$ , a condutividade térmica e  $(\nu)$ , a viscosidade cinemática. As propriedades termodinâmicas, por outro lado, compreendem o estado de equilíbrio de um dado sistema. A densidade  $(\rho)$  e o calor específico  $(C_p)$  são duas dessas propriedades muito usadas na análise termodinâmica.

Para muitas finalidades teóricas e experimentais, é conveniente descrevermos o calor específico através da análise da capacidade térmica  $(C)$  que é a grandeza física que determina a relação entre a quantidade de calor fornecida a um corpo e a variação de temperatura  $(\Delta T)$  observada neste. A capacidade térmica ou capacidade calorífica caracteriza o corpo em si, e não a substância que o constitui. Sendo assim a capacidade térmica é uma propriedade extensiva, ou seja, proporcional à quantidade de material presente no corpo. Portanto, por ser uma característica extensiva significa que caso ocorra de dois corpos serem constituídos pela

mesma substância porém com massas diferentes tais corpos irão possuir diferentes capacidades caloríficas.

$$C = \frac{Q}{\Delta T} \quad (1)$$

A unidade usada no SI é  $\frac{J}{K}$  (Joule por Kelvin). Por motivos históricos, é comum o uso da unidade caloria por graus Celsius  $\left(\frac{cal}{^{\circ}C}\right)$ .

Podemos tratar a propriedade relativa à capacidade térmica como uma propriedade intensiva, ou seja, intrínseca da substância. Para isso é conveniente expressar a capacidade térmica por massa unitária. Essa grandeza é o calor específico, denotado em nosso estudo pela letra  $C_p$ .

O calor específico ( $C_p$ ), que é a capacidade térmica por unidade de massa da substância, e o calor específico molar ( $C_{pM}$ ), resultante da relação entre a capacidade térmica e o número de moles presentes são grandezas derivadas que especificam a capacidade térmica como uma propriedade intensiva. sendo então grandezas características da substância em questão. Ocasionalmente, pode também ser usado o calor específico volumétrico (por unidade de volume).

Para complementar nosso estudo podemos ainda definir a capacidade calorífica volumétrica, que chamaremos de  $C_V$  e é dado por:

$$C_V = \rho \cdot C_p \quad (2)$$

e mede a capacidade de um material de armazenar energia térmica segundo Incropera (2007).

Alguns valores do calor específico e da densidade para alguns sólidos e líquidos são dados a seguir:

**Tabela 1. Calor Específico De Alguns Materiais ( $C_p$ )**

Substâncias (Sólidos e líquidos)	Calor específico (a 25°C e pressão normal)	
	(J/Kg. °C)	(cal/g . °C)
Água	4200	1,0
Alcool éilico	2400	0,58
Alumínio	900	0,22
Chumbo	130	0,031
Cobre	390	0,092
Concreto	840	0,20
Ferro	450	0,11
Gelo (a - 5°C)	2100	0,50
Mercúrio	140	0,033
Ouro	130	0,031
Prata	230	0,056

Fonte: Adaptado de Infoescola 2009

**Tabela 2. Densidade De Alguns Materiais (P)**

Substâncias (Sólidos e líquidos)	Massa específica aproximada (g/cm <sup>3</sup> )
Etanol	0,78
Gasolina	0,80
Lubrificante automotivo	0,85
Madeira seca, carvalho	0,92
Água	1,00
Glicerina	1,20
HNO <sub>3</sub> 36%	1,22
PVC	1,40
Açúcar	1,57
Vidro	2,60
Alumínio	2,70
Aço inoxidável	7,90
Cobre	8,90
Prata	10,50

Fonte – Adaptado de IPT 2007

Outra propriedade relevante é a difusividade térmica ( $\alpha$ ), que é dado por:

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot C_p} \quad (3)$$

A difusividade térmica mede a capacidade do material de conduzir energia térmica em relação à sua capacidade de armazená-la. É uma propriedade importante pois sabendo a difusividade térmica do material podemos prever como ele responderá às mudanças nas condições térmicas a ele imposta.

Buscaremos agora a observância das propriedades termodinâmicas, sabemos que de fato a diferença de energia entre quaisquer dois estados de equilíbrio é mensurável e nos fornece diretamente uma definição quantitativa do calor. O fluxo de calor para um sistema em qualquer processo considerado com número de moles constante é simplesmente a diferença na energia interna entre os estados final e inicial subtraído do trabalho realizado naquele processo.

Agora iremos considerar certo processo específico que leve um determinado sistema de um estado inicial  $A$  para um estado final  $B$ . Uma importante questão seria saber a quantidade de energia que foi transferida para o sistema na forma de trabalho e a quantidade transferida na forma de calor neste processo em particular. A determinação do trabalho é facilmente realizada pelo método da mecânica. E sabemos também que a diferença de energia total  $U_B - U_A$  é mensurável. Portanto subtraindo o trabalho da diferença de energia total obtemos o fluxo de calor presente neste processo especificado.

Podemos perceber que a quantidade de trabalho associado com diferentes processos pode ser distinta, apesar de que cada um dos processos inicie no mesmo estado  $A$  e cada termine no mesmo estado  $B$ . Semelhantemente, o fluxo de calor pode ser diferente para cada dos processos. Mas a soma do trabalho com o fluxo de calor é exatamente a diferença de energia total  $U_B - U_A$  e é o mesmo para cada dos processos. Logo, podemos nos referirmos ao fluxo total de energia apenas especificando os estados inicial e final, porém caso se deseje-se referir aos fluxos de calor e trabalho, é preciso especificar em detalhe o todo o processo considerado.

Restringindo nossa atenção a sistemas termodinâmicos simples, o trabalho quase-estático está associado com a variação no volume e é dado quantitativamente por:

$$dW_M = -PdV \quad (4)$$

Onde o trabalho mecânico é exemplificado pelo termo  $-PdV$ ,  $P$  é a pressão e  $V$  é o volume e permanecem como parâmetros mecânicos relevantes. Trazendo esta equação da mecânica, vale ressaltar que a equação aplica-se apenas a processos quase-estáticos. Para nosso estudo não é necessário uma definição mais precisa de processos quase-estáticos. Relembrando que estamos apenas pontuando breves definições de conceitos termodinâmicos que serão úteis em nosso trabalho.

Uma segunda característica da equação (4) que vale a pena observar é a convenção de sinal. O trabalho é considerado positivo se ele aumenta a energia do sistema. Se o volume do sistema é diminuído, trabalho é feito sobre o sistema, aumentando sua energia; portanto a razão do sinal negativo na equação (4).

Com a expressão quantitativa  $dW_M = -PdV$  para o trabalho quase-estático, podemos agora fornecer uma expressão quantitativa para uma grandeza que será extremamente observada durante nosso estudo que é o fluxo de calor. Em um processo infinitesimal quase-estático com número de moles constante o calor quase-estático  $dQ$  é definido pela equação:

$$dQ = dU - dW_M, \text{ com número de moles constantes} \quad (5)$$

ou

$$dQ = dU + P dV, \text{ com número de moles constantes} \quad (6)$$

Observe que usamos os termos calor e fluxo de calor trocando entre si. Calor, como o trabalho, é apenas uma forma de transferência de calor. Uma vez que a energia que for transferida para um sistema, ou como calor ou como trabalho, é indistinguível da energia que pode ter sido transferida diretamente. Assim, embora  $dQ$  e  $dW_M$  quando adicionadas forneça  $dU$ , a energia  $U$  de um estado não pode ser considerada como a soma das componentes "trabalho" e "calor". Para evitar esta implicação definimos através de uma barra cortando o símbolo  $\delta$  as seguintes notações de infinitesimais tais como  $\delta W_M$  e  $\delta Q$  que são chamadas de diferenciais inexatas. As integrais de  $\delta W_M$  e  $\delta Q$  para um processo particular são os fluxos de trabalho e calor nesse processo e a soma é a diferença de energia  $\Delta U$  que por si só não depende do processo.

Além do mais a definição de um sistema simples significa uma composição química definida que deve ser descrita por um conjunto apropriado de certos parâmetros. Um conjunto

razoável de parâmetros dessa composição são os números de moléculas em cada um dos componentes quimicamente puros dos quais o sistema é uma mistura. Uma boa opção para se obter números de tamanhos realmente convenientes, adotamos o número de mol (N), definido como o número presente de cada tipo de molécula dividido ao número de Avogadro ( $N_A = 6,02217 \times 10^{23}$ ). Portanto esta definição do número de moles (N) refere-se explicitamente ao “número de moléculas” e portanto está fora da fronteira da física puramente macroscópica.

Conforme Callen (2009, p. 12) “Existem estados particulares (chamados estados de equilíbrio) de sistemas simples que, macroscopicamente, são caracterizados completamente pela energia interna U, o volume V, e os números de moles  $N_1, N_2, \dots, N_r$  das componentes químicas.”.

Com os conceitos de calor (Q), trabalho (W), número de moles (N) e energia (U) também conhecidos como parâmetros extensivos, podemos obter a seguinte definição,

De acordo com Callen sobre a entropia.

(...) Existe uma função (chamada entropia S) dos parâmetros extensivos de algum sistema composto, definido para todos os estados de equilíbrio e possuindo a seguinte propriedade: Os valores assumidos pelos parâmetros extensivos na ausência de um vínculo interno são aqueles que maximizam a entropia sobre a variedade (superfície) de estados de equilíbrio vinculados (CALLEN, 2009, p.23).

Agora conhecemos um novo parâmetro termodinâmico, a entropia (S), que pelo terceiro postulada segundo Callen (2009) é uma propriedade aditiva sobre os subsistemas constituintes, é contínua, diferenciável e é uma função monotonicamente crescente da energia.

Em virtude do nosso interesse em processos de transferência de energia, e nas variações associadas dos parâmetros extensivos, antecipamos que estaremos preocupados com a forma diferencial da equação fundamental. Escrevendo a equação fundamental na forma dos parâmetros que foram apresentados.

$$U = U(S, V, N_1, N_2, \dots, N_r) \quad (7)$$

Podemos ainda calcular sua primeira diferencial:

$$dU = \left( \frac{\partial U}{\partial S} \right)_{V, N_1, \dots, N_r} dS + \left( \frac{\partial U}{\partial V} \right)_{S, N_1, \dots, N_r} dV + \sum_{j=1}^r \left( \frac{\partial U}{\partial N_j} \right)_{S, V, N_1, \dots, N_r} dN_j \quad (8)$$

As derivadas parciais presentes na equação anterior costumam aparecer de forma tão frequente que é conveniente utilizar símbolos específicos para representá-las ( $T$ ,  $P$ ,  $\mu_j$ ). Elas são chamadas parâmetros intensivos, e a seguinte notação é utilizada.

$$\left(\frac{\partial U}{\partial S}\right)_{V, N_1, \dots, N_r} = T, \text{ a temperatura} \quad (9)$$

$$\left(\frac{\partial U}{\partial S}\right)_{S, N_1, \dots, N_r} = P, \text{ a pressão} \quad (10)$$

$$\left(\frac{\partial U}{\partial N_j}\right)_{S, V, \dots, N_k} = \mu_j \text{ o potencial eletroquímico da } j\text{-ésima componente} \quad (11)$$

Utilizando esta notação podemos reescrever a equação (8) da seguinte forma:

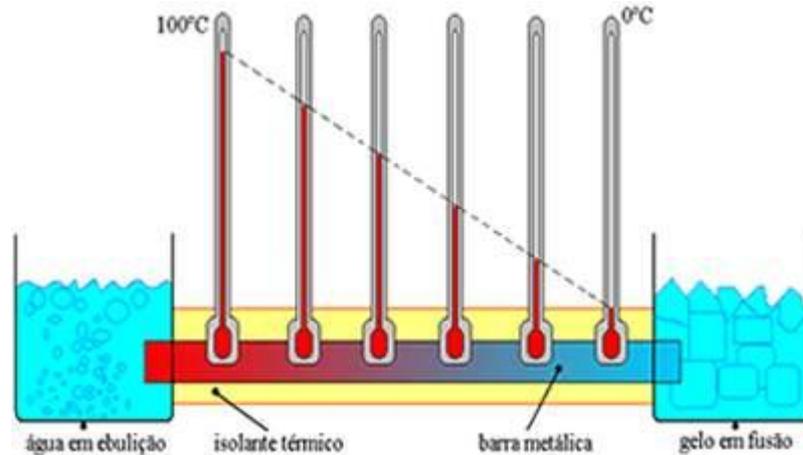
$$dU = TdS - PdV + \mu_1 dN_1 + \dots + \mu_r dN_r \quad (12)$$

Já apresentado os conceitos básicos das propriedades que serão utilizadas no decorrer deste estudo seguiremos com a análise dos processos de transferência de energia térmica, sobretudo tratando sempre do fluxo de calor.

## 2.2 CONDUÇÃO TÉRMICA

A condução é a forma de troca de calor que depende do contato direto entre dois corpos, e pode ocorrer também entre dois pontos de um mesmo corpo. A condução se realiza por contato molecular, ou melhor, por contato entre as moléculas dos corpos. Pode ocorrer em corpos nos estados sólido ou líquido estacionário. Em uma análise microscópica, a transferência de energia por condução se dá a partir do momento que uma determinada partícula com estado excitação elevado encontra-se (entra em contato físico) com outra partícula que encontra-se com menor estado de excitação. Tal estado de excitação relaciona-se diretamente com o estado vibracional e rotacional dessas partículas.

**Figura 4. Representação do Processo de Transferência de Energia pela Condução Térmica**



Fonte: IFI Unicamp, 2011.

Em metais a transferência de energia ocorre por meio da movimentação dos elétrons livres, fato comum aos compostos formados por ligação metálica. Por via de regra quando tratamos de compostos não-metálicos que dependem de ligações iônicas ou covalentes o mecanismo responsável pela transferência de calor ocorre a partir da definição básica de condução, ou seja, pelo contato direto entre partículas com diferentes estados vibracionais como visto anteriormente. Conforme comenta Bergman (2007) essa troca de energia é causada por movimentos atômicos e o mecanismo é chamado de lattice waves. Tais ondas também podem ser encontradas em metais, contudo efeito é consideravelmente menor que a transferência de energia realizada pelos elétrons.

A condutividade térmica representa de forma quantitativa a facilidade ou dificuldade imposta ao calor para que ele consiga transpor alguma barreira sólida composta por determinada substância. É outra importante propriedade do material e pode ser definida formalmente como a taxa de transferência de calor através de uma unidade de espessura do material por unidade de área e por unidade de diferença de temperatura.

### 2.2.1 CONDUÇÃO TÉRMICA EM PAREDES PLANAS

Baseado em considerações atômicas, fomos levados a aceitar a existência de uma função energia conservativa macroscópica. A fim de que esta função energia possa ser significativa em um sentido prático, contudo, devemos convencer-nos de que ela é macroscopicamente controlável e mensurável. Agora mostraremos alguns métodos práticos de

medidas de energia, e fazendo assim também seremos levados a uma definição quantitativa operacional de calor.

Para o cálculo da condução térmica em paredes planas, são utilizadas a lei de Fourier e a equação da difusão. A equação da taxa de condução é a lei de Fourier, esta lei é fenomenológica, isto é, desenvolvida a partir da observação de fenômenos ao invés de princípios fundamentais. A difusão pode ser definida como o processo pelo qual uma população de partículas é transportada de regiões de alta concentração para regiões de baixa concentração de maneira a diminuir o gradiente de concentração de partículas no meio.

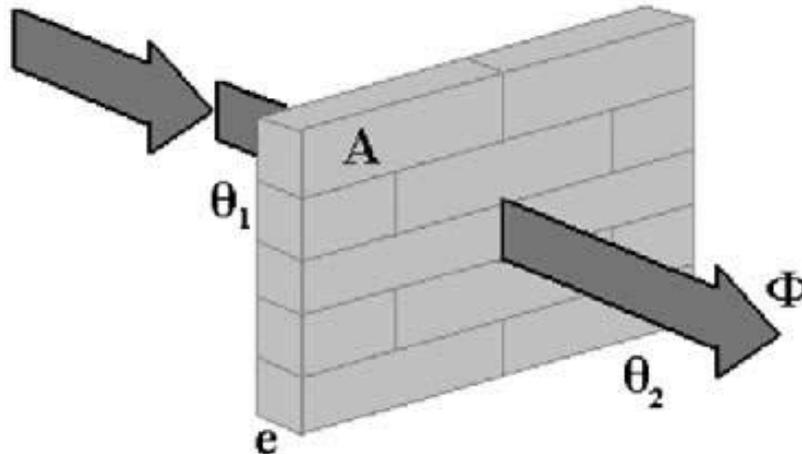
### 2.2.2 LEI DE FOURIER

A quantidade de calor que atravessa um condutor, por unidade de tempo, trata-se da taxa de fluxo de calor ( $\Phi$ ) e pode ser facilmente calculado pela equação (13).

$$\Phi = \frac{Q}{\Delta t} \quad (13)$$

A lei que rege esse processo de transmissão de calor foi determinada experimentalmente pelo matemático francês Jean-Baptiste Fourier em 1822, através de observações em relação à transferência de calor por condução em situações reais. Uma representação esquemática simplificada de transferência de calor é mostrada na Figura 4, que ilustra a transferência de calor unidimensional em uma parede plana, onde  $\Delta\theta$  corresponde à diferença de temperatura em uma direção arbitrária,  $\Phi$ , a taxa de transferência de calor por unidade de área e,  $e$ , a espessura da parede.

**Figura 5. Parede plana com transferência de calor unidimensional**



Fonte: Alunos online, 2013.

A observação do comportamento de  $\Phi$  no caso da Figura 4 em relação à direção  $x$ , com variações nos valores de  $e$  e  $\theta$ , levou à conclusão que  $\Phi$  é diretamente proporcional à diferença de temperaturas e inversamente proporcional à espessura da parede. A Lei de Fourier diz que a quantidade de calor  $Q$  que atravessa uma parede, sob uma diferença de temperatura constante, é diretamente proporcional à área da secção transversal  $A$ , à diferença de temperatura ( $\Delta\theta$ ) entre as regiões separadas pela parede e ao tempo ( $\Delta T$ ) de transmissão e inversamente proporcional à extensão atravessada, ou espessura ( $e$ ) da parede e pode ser expressa pela Equação (14), onde  $k$  é a condutividade térmica do material da parede.

$$Q = -k \cdot A \cdot \frac{dT}{dx} \quad (14)$$

A Lei de Fourier pode ser expressa de uma forma mais generalizada, levando em conta as três direções do sistema cartesiano da seguinte forma.

$$\vec{q} = -k \cdot A \cdot \nabla T = -k \cdot A \cdot \left( \frac{\partial T}{\partial x} \hat{i} + \frac{\partial T}{\partial y} \hat{j} + \frac{\partial T}{\partial z} \hat{k} \right) \quad (15)$$

A taxa de transferência de calor por unidade de área – ou simplesmente fluxo de calor – é uma grandeza vetorial onde  $\nabla$  é o operador gradiente tridimensional e  $T(x,y,z)$  é o campo escalar de temperaturas, e dessa forma, a Lei de Fourier pode ser expressa pela Equação (16).

$$\vec{q}_x = \frac{\vec{q}}{A} = -k \cdot \left( \frac{\partial T}{\partial x} \hat{i} + \frac{\partial T}{\partial y} \hat{j} + \frac{\partial T}{\partial z} \hat{k} \right) \quad (16)$$

O vetor fluxo de calor pode ser decomposto em componentes.

$$\vec{q}_{x_x} = -k \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \hat{i}, \quad \vec{q}_{x_y} = -k \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \hat{j}, \quad \vec{q}_{x_z} = -k \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \hat{k} \quad (17)$$

Tais expressões relacionam o fluxo térmico que atravessa uma superfície ao gradiente de temperatura em uma direção normal à superfície.

### 2.2.2.1 CONDUTIVIDADE TÉRMICA

A partir da lei de Fourier, equação (16), a condutividade térmica associada à condução na direção x é definida como:

$$k_x = \frac{\vec{q}_x}{\left( \frac{\partial T}{\partial x} \right)} \quad (18)$$

Nas direções y e z, as definições são similares, porém caso seja em um material isotrópico a condutividade térmica é independente da direção de transferência  $k_x = k_y = k_z = k$ .

Observando a equação (17), notamos que para um dado gradiente de temperatura, o fluxo térmico por condução aumenta com o aumento da condutividade térmica. Em geral, devido suas características intrínsecas, a condutividade térmica de um sólido é maior que a de um líquido, que, por sua vez, é maior que a de um gás.

Logo, notamos que o valor da condutividade térmica depende exclusivamente da constituição da matéria, tanto em níveis atômico quanto molecular. Ou seja, o estado de agregação da matéria interfere diretamente nessa propriedade, assim como a temperatura. O valor dessa grandeza varia dependendo do tipo de material. Na Tabela 3 são mostradas faixas de valores aproximados de condutividade para diferentes tipos de material.

**Tabela 3. Condutividade Térmica em diferentes materiais**

<b>Tipo de Material</b>	<b>Condutividade térmica (W/(m.K))</b>
Gases	0,03 – 0,3
Isolantes	0,05 – 0,9
Líquidos	0,2 – 8
Solidos não-metálicos	0,3 – 60
Ligas metálicas	9 – 200
Metais Puros	9 – 500
Cristais não metálicos	10 – mais de 1000

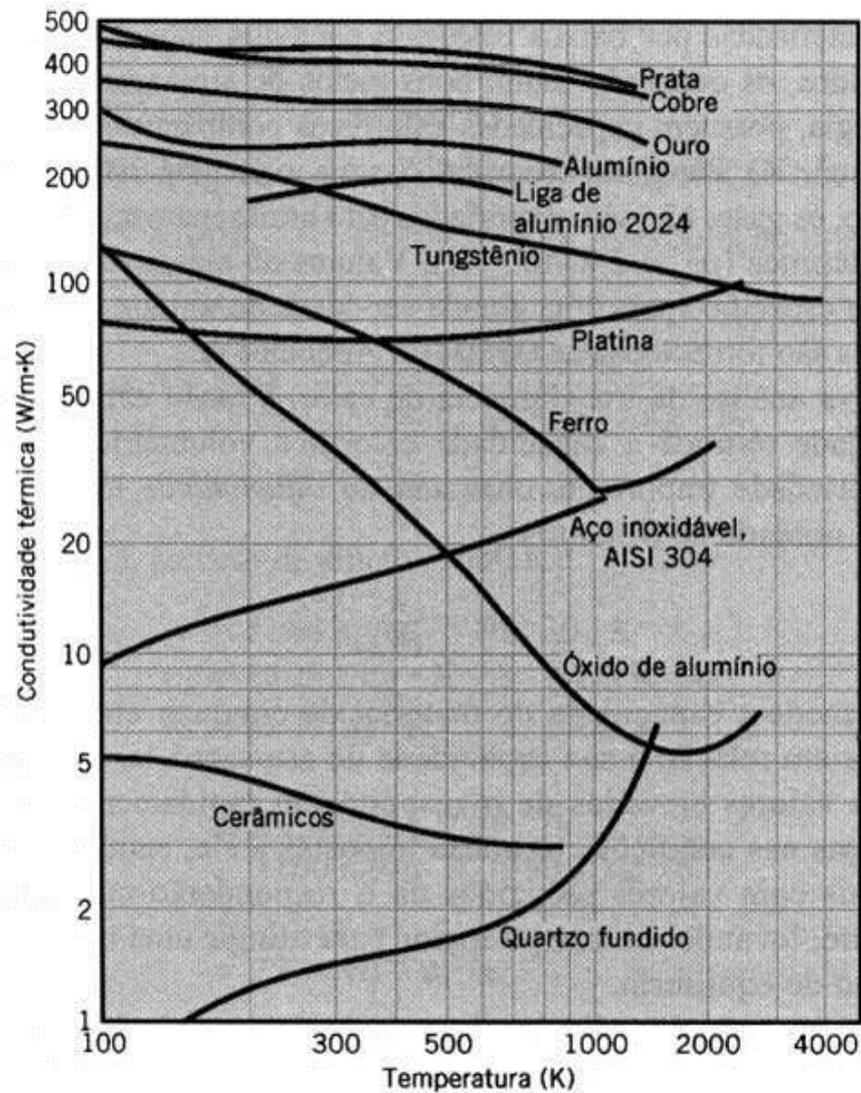
Fonte: Adaptado de Çengel (2006, p. 21)

Existem algumas grandezas relacionadas a condutividade térmica, entre elas podemos destacar que o inverso da condutividade térmica é a resistividade térmica, geralmente medida em kelvin-metros por watt (K-m/W). Ao lidar com uma quantidade conhecida de material, um objeto em específico, grandezas físicas importantes são a sua condutância térmica e sua propriedade recíproca, à resistência térmica, as quais podem ser facilmente determinadas a partir da geometria do objeto e da condutividade ou resistividade térmicas do material. Embora muito usadas em conjunto, não se deve contudo confundi-las, pois tais grandezas definem-se por diferentes relações constitutivas.

Outras duas grandezas que podemos citar são a condutividade térmica, que equivale numericamente à quantidade de calor transmitida por unidade de tempo através de um objeto com espessura unitária, numa direção normal à área da superfície de sua seção reta, também unitária, devido a uma variação de temperatura unitária entre as extremidades longitudinais, e a a resistência térmica de um sistema (objeto) ou seção reta desse define-se como a razão entre o comprimento da seção e a condutividade térmica do material do qual é feita.

Vale resaltar que existe uma dependência da condutividade térmica com a temperatura que é mostrada pela figura 6.

Figura 6.A dependência com a temperatura da condutividade térmica de sólidos selecionados.



Fonte: Adaptado de Incropera (2007, p40).

### 2.2.2.2 EQUAÇÃO DA DIFUSÃO

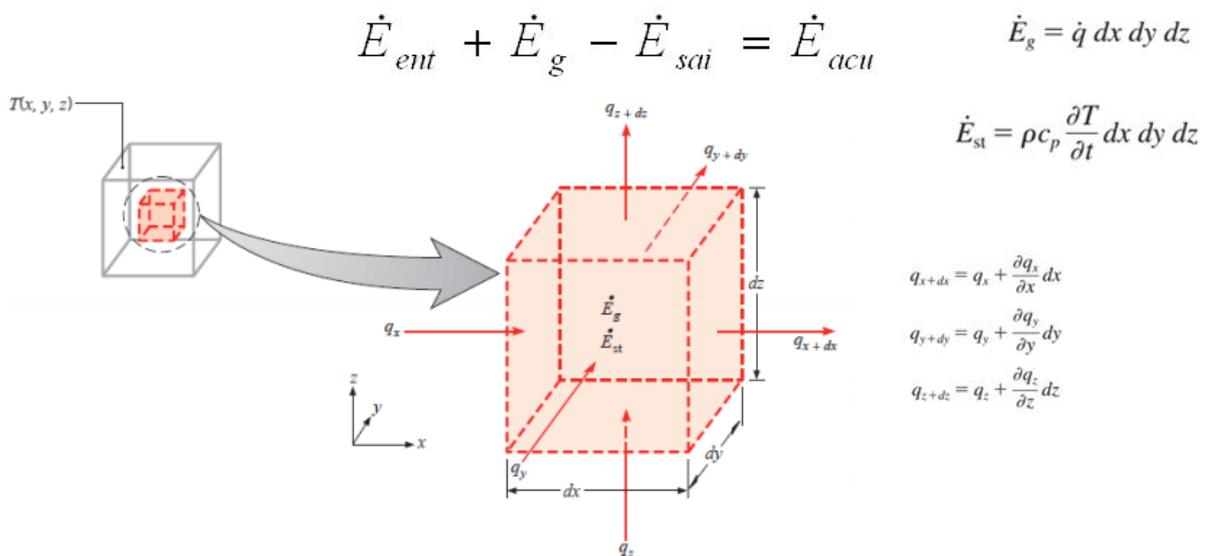
Buscaremos agora um modelo matemático para a difusão de calor em sólidos que chamaremos de equação do calor, tal modelo consiste em um equação de derivadas parciais que muitas vezes é também chamada de equação da difusão. Um dos objetivos principais da análise da condução de calor é determinar o campo de temperaturas em um meio resultante das condições impostas em suas fronteiras, ou seja, desejamos conhecer a distribuição de temperaturas que representa como a temperatura varia com a posição no meio. Determinada essa distribuição o fluxo de calor por condução ou fluxo térmico condutivo em

qualquer ponto do meio em questão ou na sua superfície pode ser determinado através da lei de Fourier .

Inicialmente iremos considerar a forma pela qual podemos determinar a distribuição de temperaturas, Para realizar tal determinação.

“[...] defini-se um volume de controle diferencial, identificam-se os processos de transferência de energia relevantes e substituem-se as equações das taxas de transferência de calor apropriadas. O resultado é uma equação diferencial cuja solução, para condições de contorno especificadas, fornece a distribuição de temperaturas no meio” (BERGMAN, 2011, p45).

**Figura 7. Volume de controle diferencial em coordenadas cartesianas**



Fonte: Adaptado de Bergman (2007, p45).

Considerando um volume de controle diferencial em coordenadas cartesianas, segundo Bergman (2006), Com base na conservação da energia é possível escrevermos a Equação (19), onde os termos “q” referem-se às taxas de transferência de calor por condução na entrada e saída do volume de controle,  $\dot{E}_g$  a taxa de energia gerada no volume de controle e  $\dot{E}_{acu}$  a variação de energia térmica acumulada pela matéria no volume de controle.

$$q_x + q_y + q_z - q_{x+dx} - q_{y+dy} - q_{z+dz} + \dot{E}_g = \dot{E}_{acu} \quad (19)$$

Consideraremos um meio homogêneo no interior do qual não há movimento macroscópico e a distribuição de temperaturas  $T(x,y,z)$  está representada em coordenadas cartesianas, onde definimos um volume de controle infinitesimalmente pequeno (diferencial),  $dx dy dz$  como mostrado na figura 7.

Iremos formular nossa lei para um dado instante de tempo, para isso é necessário identificar os processos energéticos que são relevantes para esse volume de controle, e sabemos que se existir gradiente de temperatura, irá ocorrer transferência de calor por condução pelas superfícies de controles segundo Bergman. O termos  $q_x, q_y, q_z$  indicam as taxas de transferência de calor por condução perpendiculares a cada uma das superfícies de controle na posição de coordenadas  $x, y, z$  respectivamente.

O quarto, quinto e sexto termos da Equação (19) expressam as taxas de transferência de calor por condução nas superfícies opostas, e podem ser expressas como uma expansão em séries de Taylor, como mostrado nas Equações (20)

$$q_{x+dx} = q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \quad (20a)$$

$$q_{y+dy} = q_y + \frac{\partial q_y}{\partial y} dy \quad (20b)$$

$$q_{z+dz} = q_z + \frac{\partial q_z}{\partial z} dz \quad (20c)$$

Podem existir no interior do meio um termo de geração de energia também chamado de termo de fonte de energia e que está associado à taxa de geração de energia térmica. Que está representado pelo sétimo termo da equação (19).

$$\ddot{E}_g = \dot{q} dx dy dz \quad (21)$$

Onde  $(\dot{q})$  é a taxa de geração de energia por unidade de volume.

Precisamos considerar o termo que representa variações na quantidade de energia interna térmica ( $\dot{E}_{acu}$ ).

$$\dot{E}_{acu} = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz \quad (22)$$

Onde  $t$  representa o tempo,  $C_p$  representa o calor específico do material e  $\rho$  representa a densidade do material.

Podemos substituir as equações (20a), (20b), (20c), (21) e (22) na equação (19).

$$-\frac{\partial q_x}{\partial x} dx - \frac{\partial q_y}{\partial y} dy - \frac{\partial q_z}{\partial z} dz + \dot{q} dx dy dz = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz \quad (23)$$

Relembrando a equação (15) que trata da taxa de transferência de calor (q), e considerando agora a área da superfície de controle diferencial, podemos obter as seguintes equações.

$$q_x = -k dy dz \frac{\partial T}{\partial x} \quad (24a)$$

$$q_y = -k dx dz \frac{\partial T}{\partial y} \quad (24b)$$

$$q_z = -k dx dy \frac{\partial T}{\partial z} \quad (24c)$$

Substituindo as equações (24a), (24b), (24c) na equação (23), e simplificando quanto aos termos de dimensão infinitesimal do volume de controle (dx dy dz).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (25)$$

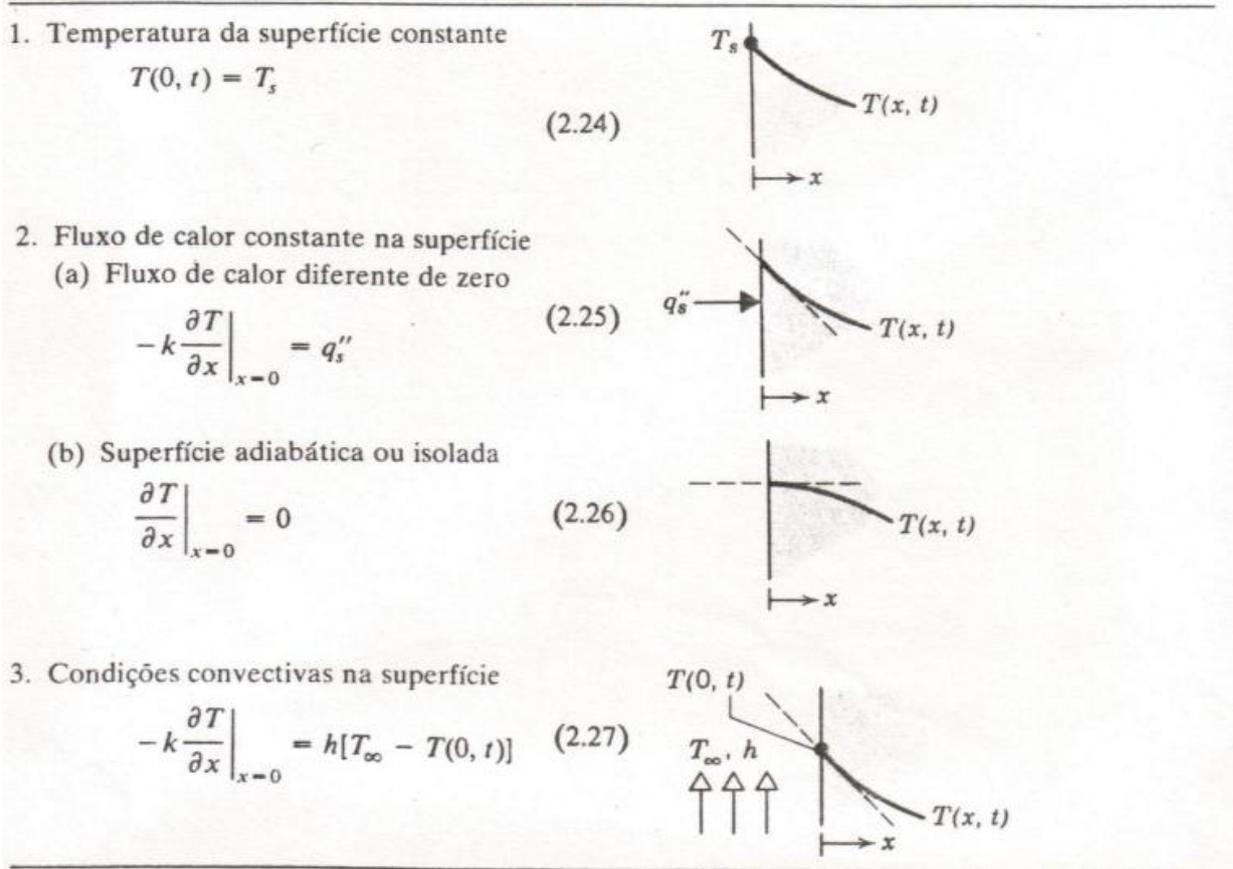
Com isso, obtemos a forma geral em coordenadas cartesianas para a equação da difusão de calor.

Se considerarmos o meio como isotrópico, onde a condutividade térmica (k) não depende da direção, é possível escrever a equação de forma mais simplificada e obter a equação da difusão, que é frequentemente chamada de equação do calor, e é a ferramenta básica para a análise da condução de calor.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (26)$$

Onde  $\alpha = \left( \frac{k}{\rho C_p} \right)$  é a difusividade térmica, como já visto anteriormente.

Figura 8. Condições de contorno para equação da difusão de calor na superfície  $x=0$ .

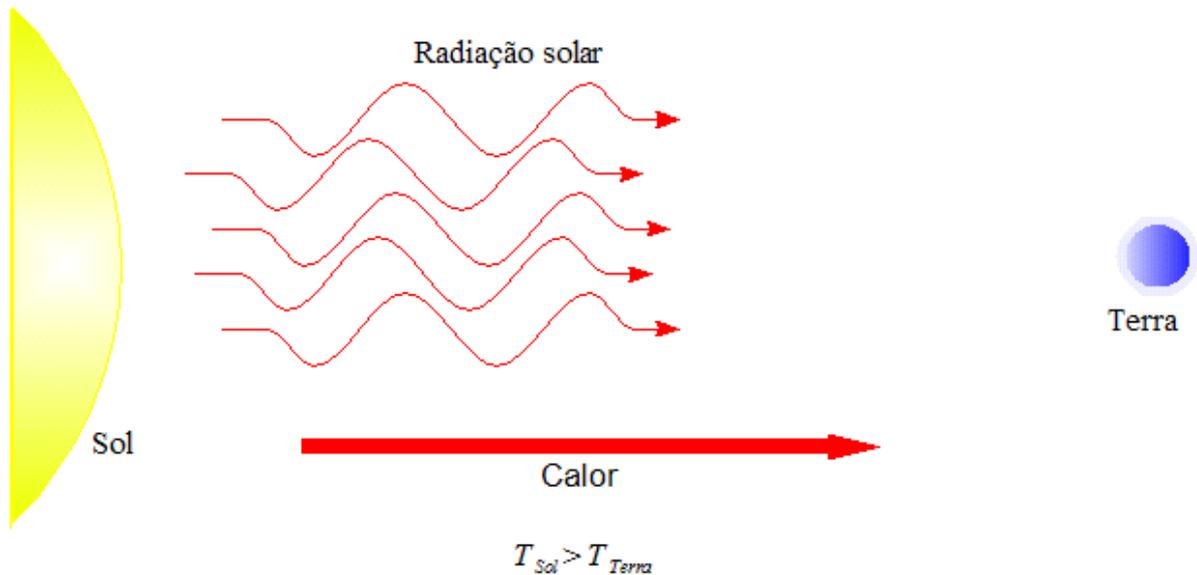


Fonte: Bergman (2007, p49).

A figura 8 mostra as três condições de contorno mais frequentemente encontradas na transferência de calor, e que nos auxiliam a determinar a distribuição de temperaturas em um meio (as condições estão especificadas para um sistema unidimensional na superfície  $x=0$ ).

### 2.3 RADIAÇÃO TÉRMICA

**Figura 9. Representação esquemática da radiação térmica solar.**



Fonte. Radiação Webnode, 2011.

A radiação térmica é outra importante forma de transmissão de calor, e é definida como a energia emitida por um corpo que se encontra a uma temperatura não nula ( $T > 0$ ). Ela se propaga por meio de ondas eletromagnéticas. Isto quer dizer que,

A radiação emitida por um corpo devido à sua temperatura é chamada radiação térmica. Todo corpo emite esse tipo de radiação para o meio que o cerca, e dele absorve. Se um corpo está inicialmente mais quente do que o meio, ele irá se esfriar, porque a sua taxa de emissão de energia excede à taxa de absorção. Quando o equilíbrio térmico é atingido, as taxas de emissão e absorção são iguais. (EISBERG, 1979, p.20)

De acordo com Resnick (1979), toda matéria em estado condensado (sólido ou líquido) emite um espectro contínuo de radiação que é independente do material do qual o corpo é composto, porém tem grande dependência da temperatura. A radiação do espectro é emitida em todas as direções e em diferentes comprimentos de onda. Com o intuito de analisar um espectro térmico de caráter universal, ou seja, a máxima radiação a ser emitida por um determinado corpo a uma dada temperatura não nula, foi criado um modelo teórico que recebeu o nome de corpo negro, isto é, conforme especifica Resnick corpos que possuem superfícies que absorvem toda a radiação térmica incidente sobre ele. Logo são elementos que independentemente de sua composição, se estiverem em uma mesma temperatura determinada, irão emitir radiação térmica com mesmo espectro.

Para o corpo negro

A distribuição espectral da radiação de corpo negro é especificada pela quantidade  $R_T(\nu)$ , chamada radiância espectral, que é definida de forma que  $R_T(\nu)d\nu$  seja igual à energia emitida por unidade de tempo em radiação de frequência compreendida no intervalo de  $\nu$  a  $\nu + d\nu$  por unidade de área de uma superfície à temperatura absoluta T. (EISBERG, 1979, p.20)

Podemos integrar a radiância espectral  $R_T(\nu)$  sobre todas as frequências  $\nu$ , assim obtemos a energia total emitida por unidade de tempo por unidade de área por um corpo negro a uma temperatura T. Obtemos assim a lei de Stefan-Boltzmann, e chamaremos de radiância  $R_T$

$$R_T = \sigma T^4 \quad (27)$$

onde  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann e possui valor numérico de

$$\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \left[ \frac{\text{W}}{\text{m}^2} - \text{K}^4 \right] \quad (28)$$

Segundo Resnick a radiação térmica no interior de uma cavidade cujas paredes estão a uma temperatura T tem mesmo caráter que a radiação emitida pela superfície de um corpo negro a temperatura T. Especificaremos o espectro da radiação dentro desta cavidade ou radiação de cavidade em termos de uma densidade de energia  $\rho_T(\nu)$  que representa nada mais que a energia contida em um volume unitário da cavidade a temperatura T no intervalo de frequência de  $\nu$  a  $\nu + d\nu$ .

$$\rho_T(\nu) \propto R_T(\nu) \quad (29)$$

Vale ressaltar que Rayleigh e Jeans posteriormente chegaram em uma equação mais detalhada para a radiação de corpo negro.

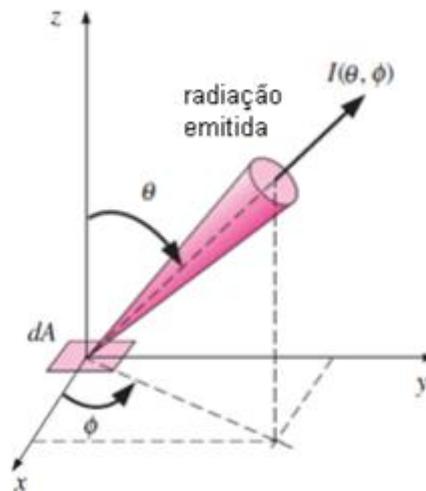
$$\rho_T(\nu)d\nu = \frac{8\pi\nu^2 K T}{c^3} d\nu \quad (30)$$

Esta é a fórmula de Rayleigh-Jeans para radiação de corpo negro, onde ( $K = 1,38 \times 10^{-23}$  joule/Kelvin) é a constante de Boltzman.

### 2.3.1 INTENSIDADE DE RADIAÇÃO

Segundo Incropera um importante conceito quando tratamos de irradiação é o de intensidade de radiação, pois podemos considerar que a radiação proveniente de uma superfície plana é emitida em todas as direções no hemisfério acima desta superfície e estamos interessados na distribuição direcional dessa radiação que costuma não ser uniforme. Podemos definir a intensidade de radiação ( $I$ ) sendo a taxa na qual a radiação é emitida em certa direção no espaço. É convenientemente usada para descrever como a radiação emitida por uma superfície varia com os ângulos  $\theta$  e  $\phi$ , representados na Figura 9

**Figura 10. A intensidade de radiação ( $I$ )**



Fonte: Adaptado de Incropera(2007, p462)

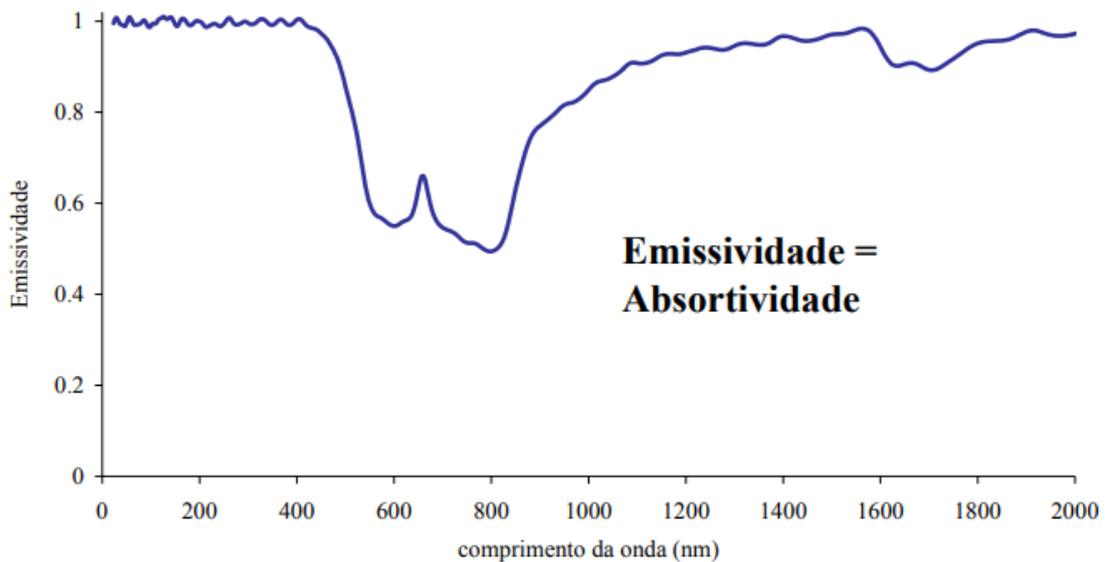
### 2.3.2 EMISSIVIDADE E ABSORTIVIDADE

Sobre a radiação térmica podemos citar ainda duas outras importantes grandezas, a emissividade ( $\epsilon$ ) e absortividade ( $\alpha$ ). Elas são consideradas propriedades relativas à superfície. A emissividade pode ser definida como a propriedade de uma superfície que descreve sua capacidade em relação a emissão de radiação térmica buscando como referência um corpo negro, portanto pode ser descrita como uma razão entre a radiação emitida por determinada superfície a uma temperatura conhecida e a radiação emitida por algum corpo negro à mesma temperatura. A absortividade pode é considerada como a razão entre a radiação absorvida pela superfície e a radiação incidente sobre ela.

A emissividade é igual à absorvidade em um determinado intervalo de comprimentos de onda, tal análise pode ser representada pela lei de Kirchhoff que demonstra a proporcionalidade entre a absorvidade e emissividade de uma superfície e de acordo com Çengel (2006) contudo isso pode ser considerado apenas se as superfícies que estão emitindo e absorvendo a radiação térmica estiverem com variação de temperatura inferior a 100 KELVIN, ou seja, ( $\Delta T < 100K$ ).

$$\varepsilon(T) = \alpha(T) \quad (31)$$

**Figura 11. Relação entre Emissividade e Absortividade.**



Fonte. Departamento de aulas Esalq Usp, 2014.

## 2.4 CONVECÇÃO TÉRMICA

O fenômeno de convecção térmica pode ser definida como a forma de transmissão do calor que ocorre principalmente através de correntes convectivas entre um fluido e uma superfície sólida. A convecção é composta basicamente de dois mecanismos: a difusão e a advecção. Existe a convecção natural onde as correntes convectivas são geradas pelos gradientes de temperatura e densidade e a convecção forçada onde as correntes são geradas mecanicamente.

Através da Lei de Resfriamento de Newton podemos deduzir a equação que representa numericamente a convecção térmica.

$$Q = Ah(T_1 - T_2) \quad (32)$$

Onde (Q) representa a taxa de fluxo de calor transferido por convecção, ( $T_1$ ) a temperatura da superfície e ( $T_2$ ) a temperatura do fluido em contato com a superfície. (A) a área da superfície que participa do processo de transferência, (h) o coeficiente médio de transferência de calor por convecção

## 2.5 CARACTERÍSTICAS TÉRMICAS DE ELEMENTOS CONSTRUTIVOS

Para seguirmos com nosso estudo é necessário o conhecimento de certas propriedades térmicas dos elementos construtivos, destacamos a resistência e a transmitância térmica.

### 2.5.1 RESISTÊNCIA TÉRMICA

A resistência térmica é definida como a resistência imposta por determinado meio à passagem de um fluxo térmico, ou seja, é a grandeza que mede a dificuldade ou a facilidade da passagem de fluxo de calor pelo meio em questão. É uma grandeza que depende do formato do material e representaremos por  $R_A$  pode ser quantificada pela equação (33).

$$R_A = \frac{L}{KA} \quad (33)$$

Onde K é a condutividade térmica do material, L é a espessura do material e A é a área perpendicular ao fluxo de calor.

### 2.5.2 RESISTÊNCIA DE CONVECÇÃO E RADIAÇÃO

Segundo Bergman podemos associar também uma resistência térmica à convecção e à radiação, iremos representar tais resistências como.

$$R_c = \frac{1}{hA}, \text{ para convecção} \quad (34)$$

$$R_R = \frac{1}{h_r A}, \text{ para radiação} \quad (35)$$

Onde  $h$  é o coeficiente de transferência de calor por convecção e  $h_r$  é coeficiente de transferência de calor por radiação.

Deve-se analisar as várias resistências encontradas em uma determinada superfície, buscando compreender as associações de tais resistências, sejam elas em paralelo ou em série, para que assim possamos calcular uma resistência única e efetiva que represente de maneira fiel a resistência equivalente do meio.

$$R_e = R_1 + \dots + R_j, \text{ Para resistências em série} \quad (36)$$

$$\frac{1}{R_e} = \frac{1}{R_1} + \dots + \frac{1}{R_j}, \text{ Para resistências em paralelo} \quad (37)$$

### 2.5.3 TRANSMITÂNCIA TÉRMICA

A transmitância térmica pode ser obtida através do cálculo do inverso do valor total da resistência térmica encontrada no meio como mostra a equação (38), iremos representar essa grandeza pela letra ( $U_t$ ) que é o coeficiente global de transferência de calor convenientemente chamado de transmitância térmica,

$$U_t = \frac{1}{R} \quad (38)$$

Ou seja, a quando um corpo tem grande resistência térmica necessariamente deverá possuir baixa transmitância térmica, sendo o contrário também correspondente, isto é, se a resistência térmica for baixa a transmitância deverá ser alta.

### 2.6 DESEMPENHO TÉRMICO

As normas existentes na área de desempenho térmico englobam estudos sobre o conforto térmico que depende das variáveis que influenciam no desempenho térmico da edificação e do efeito combinado de fatores pessoais e ambientais como: taxa de

metabolismo, isolamento térmico da vestimenta, temperatura radiante média, umidade relativa, temperatura e velocidade relativa, que irão interferir no equilíbrio térmico do corpo humano, conhecido como sistema termorregulador.

### 2.6.1 BIOCLIMATOLOGIA

Podemos entender a bioclimatologia de acordo com Lamberts, como um estudo de determinadas relações entre o clima e o ser humano, com o objetivo de se aproveitar de condições climáticas, para criar uma edificação com desempenho térmico adequado ao ambiente.

O desempenho térmico das edificações é uma variável necessária ao conforto térmico dos usuários, e sofre influência das condições ambientais características de uma determinada região. Portanto, é necessário o conhecimento das climatológicos para a melhor compreensão do comportamento térmico das edificações.

Nos encontramos na região Centro-Oeste onde clima é influenciado por três sistemas de circulação que interferem na região: o sistema de correntes perturbadoras Oeste, que caracteriza o tempo instável no verão, sistema de correntes perturbadoras Norte, que provoca chuvas no verão, outono e inverno e sistema de correntes perturbadoras Sul, que provoca chuvas com duração de três dias no período de inverno. A temperatura média anual se encontra a 22°C, as temperaturas máximas variam entre 24°C e 26°C e a média das máximas do mês de setembro, caracterizado como o mais quente, oscila entre 30°C e 36°C. No inverno a temperatura média do mês mais frio oscila entre 15°C a 24°C, as mínimas se encontra entre 8°C a 18°C.

### 2.6.2 ZONA DE CONFORTO TÉRMICO

Para obter-se o conforto térmico, uma edificação deve atender condições necessárias, com suas variáveis ambientais, interligadas com suas características construtivas. Uma zona de conforto térmico humano pode ser representada pela a Figura 16 que demonstra uma relação da temperatura e umidade relativa do ar ao conforto térmico do ser humano

Figura 12. Zona de Conforto Térmico Humano.



Fonte: INMET - Instituto Nacional de Meteorologia, 2015.

Para que o corpo humano esteja em equilíbrio térmico, a quantidade de calor ganho deve ser igual à quantidade de calor cedido para o ambiente. Assim, as condições satisfatórias de conforto térmico de uma edificação não dependem só da sua adequação ao clima, mas também da sua adaptação às atividades desenvolvidas pelos usuários, dos equipamentos envolvidos e características da edificação, desta forma conseguimos projetá-las de maneira que possam proporcionar ambientes que estejam sempre em temperaturas dentro da zona de conforto térmico humano.

### 3 METODOLOGIA

Abordaremos neste capítulo a organização estrutural do trabalho, os recursos e os parâmetros utilizados para cálculo da Transmitância Térmica de elementos construtivos.

Este trabalho possui uma parte teórica, que dá embasamento teórico-metodológico aos ensaios e uma parte experimental na qual submeteu-se 4 paredes a um ensaio de transferência de calor sob ação de uma fonte externa e mediu-se utilizando sensores e placa

Arduíno. Como a primeira parte da pesquisa já foi apresentada e discutida nos capítulos anteriores, nos dedicaremos neste capítulo à parte experimental.

Para este ensaio foram utilizadas quatro paredes sendo a Parede 1 e Parede 3 ambas constituídas de bloco cerâmico e argamassa com cimento, porém na Parede 3 é acrescentada uma folha de isopor de 8 cm, já nas Paredes 2 e 4, ambas constituídas de bloco de concreto e argamassa com cimento, sendo que na Parede 4 é acrescentada uma folha de isopor também de 8 cm. Ou seja, serão comparadas a transmitância térmica das paredes sendo 1 com a 3 e sendo 2 com a 4.

A proposta deste trabalho é compreender a importância do desempenho térmico dos elementos construtivos realizando uma análise sobre os mecanismos de transferência de calor nos elementos da alvenaria da envolvente das edificações, a partir de fundamentos físicos. Tais mecanismos irão definir o desempenho térmico da edificação e suas repercussões no consumo energético e no conforto térmico experimentado pelo usuário, para isso realizamos o cálculo da transmitância térmica de determinados elementos construtivos, discriminados na seguinte tabela:

**Tabela 4. Elementos Construtivos Ensaados**

<b>Corpo de prova</b>	<b>Composição</b>
Parede 1	Bloco cerâmico (9,0 x 14,0 x 24,0 cm) Argamassa (11cm)
Parede 2	Bloco de concreto (14,0 x 19,0 x 39,0cm) Argamassa (11 cm)
Parede 3	Bloco cerâmico (9,0 x 14,0 x 24,0 cm) Argamassa (11cm) Placa de isopor (10 cm)
Parede 4	Bloco de concreto (14,0 x 19,0 x 39,0cm) Argamassa (11 cm) Placa de isopor (10 cm)

Fonte: Autoria própria, 2018.

### 3.1 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

O aparato experimental é composto pela construção das paredes, a fonte de energia térmica e a medição das temperaturas.

- **As paredes**

Construímos 4 paredes, que neste experimento, se constituem de paredes de alvenaria em blocos cerâmicos de 8 furos (9,0 x 14,0 x 24,0 cm) e blocos de concreto simples (14,0 x 19,0 x 39,0cm) com argamassa para revestimento de paredes de alvenaria, em áreas internas e externas, e assentamento de blocos de alvenaria de vedação (Argamassa Massa Pronta Múltiplo Uso Cinza 50Kg - Votorantim Cimentos), para realização do experimento construiu-se uma parede com bloco cerâmico e argamassa de revestimento (6 cm), uma parede com bloco de concreto e argamassa de revestimento (6 cm), uma parede com bloco cerâmico, argamassa de revestimento (6 cm) e placa de isopor de (8 cm) e por fim uma parede com bloco de concreto, argamassa de revestimento (6 cm) e placa de isopor de (8 cm), não necessariamente nesta ordem de execução. As medidas das paredes se baseam em ensaios realizados pelo INMETRO para futura comparação de resultados.

**Tabela 5. Dimensão dos Elementos Construtivos Ensaçados**

<b>Paredes</b>	<b>Dimensão (cm)</b>
Parede 1	Altura – 100 (cm) Comprimento – 100 (cm) Espessura ≡ 15 (cm)
Parede 2	Altura – 100 (cm) Comprimento – 100 (cm) Espessura ≡ 20 (cm)
Parede 3	Altura – 100 (cm) Comprimento – 100 (cm) Espessura ≡ 23 (cm)
Parede 4	Altura – 100 (cm) Comprimento – 100 (cm) Espessura ≡ 28 (cm)

Fonte: A autoria própria, 2018.

Para nos auxiliar em nosso trabalho a VOTORANTIM CIMENTOS nos enviou um laudo técnico de sua ARGAMASSA MASSA PRONTA MÚLTIPLO USO CINZA - 50KG, que foi utilizada nas construção das paredes, laudo mostrado pela figura 13.

**Figura 13. Laudo técnico da Argamassa Utilizada.**

Laudo do Produto	
Unidade Fabril:	Sobradinho/DF
• Mês de referência	maio/2017
- Classificação - ABNT/NBR 13281:2005	P5, M4, R3, C4, D4, U2, A3
• Teor de água de Mistura	15,5 %
• Resistência a Compressão -28 dias (P) - ABNT 13279 /05	6,40 MPa
• Densidade de Massa no estado endurecido (M) - ABNT 13280 /05	1669,67 kg/m <sup>3</sup>
• Resistência a tração na Flexão (R) - ABNT 13279 /05	2,21 MPa
• Coeficiente de Capilaridade (C) - ABNT 15259 /05	4,55 g/dm <sup>2</sup> .min <sup>1/2</sup>
• Densidade de Massa no estado fresco (D) - ABNT 13278 /05	1792 kg/m <sup>3</sup>
• Retenção de água (U) - ABNT 13277 /05	82,0 %
• Resistência Potencial de Aderência à Tração (A) - ABNT 15258 / 05	0,4 MPa

 <hr/> <p><b>Celso Nery Junior</b> Responsável Técnico Votorantim Cimentos S/A</p>	 <hr/> <p><b>Fábio Luiz Monteiro Garcia</b> Gerente Geral Votorantim Cimentos S/A</p>
--	---

- Fonte de Energia Térmica

Como fonte de energia térmica utilizou-se um maçarico a gás + ar e incinerou-se um dos lados de cada parede com o maçarico posicionado a aproximadamente 20 cm da face da parede, medindo-se a temperatura inicial e durante todo o processo em ambos os lados da parede, com objetivo de observar como seriam o fluxo térmico (calor) através da parede, e os aumentos de temperatura nos lados da parede, sendo a temperatura no local onde o experimento foi realizado de 28°C.

- Instrumentos de Medida

Para realização das medidas de temperaturas utilizou-se um notebook para a captura dos dados, 3 sensores térmicos acoplados a um arduíno e um software que realizou a leitura das medidas dos sensores ao longo do tempo, o software do arduíno foi programado para realizar medidas a cada 30 segundos durante um intervalo de 10 minutos.

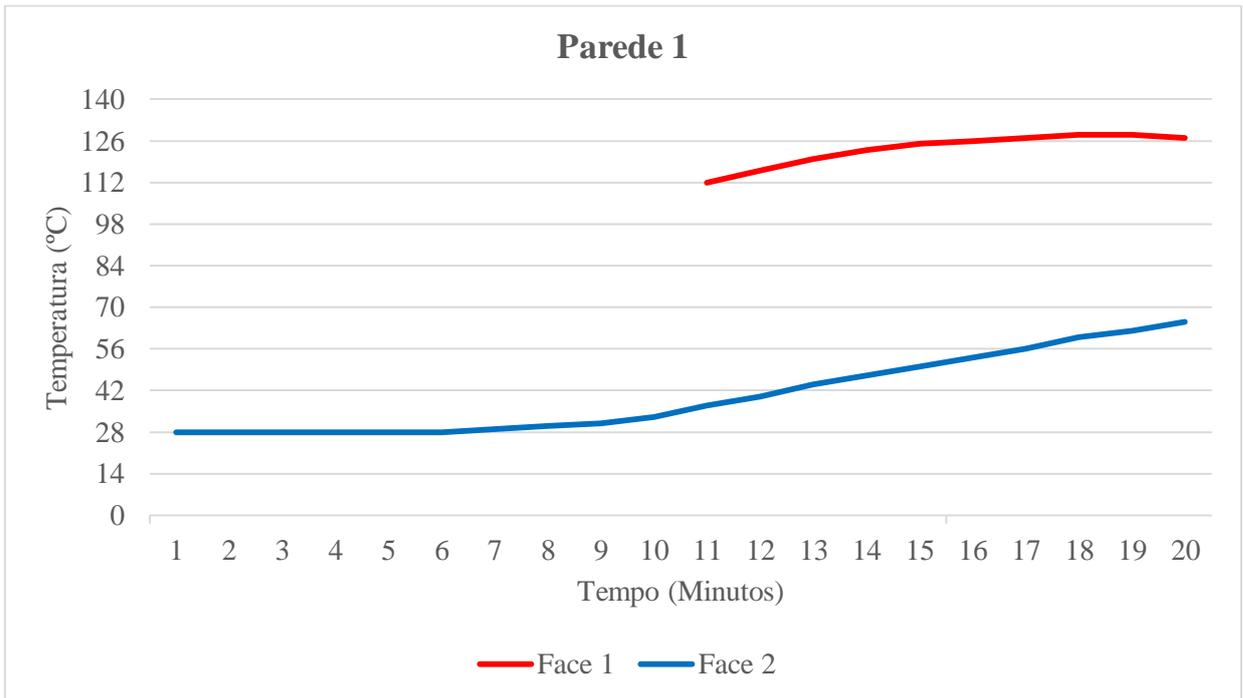
As temperaturas das paredes foram medidas até que não se observasse nos dados coletados variação de temperatura, ou seja, a taxa de transferência de calor da parede estaria constante.

A partir destes dados realizamos a análise dos resultados e calculamos a resistência e transmitância térmica das paredes.

### 3.2 DADOS EXPERIMENTAIS E CÁLCULOS REALIZADOS

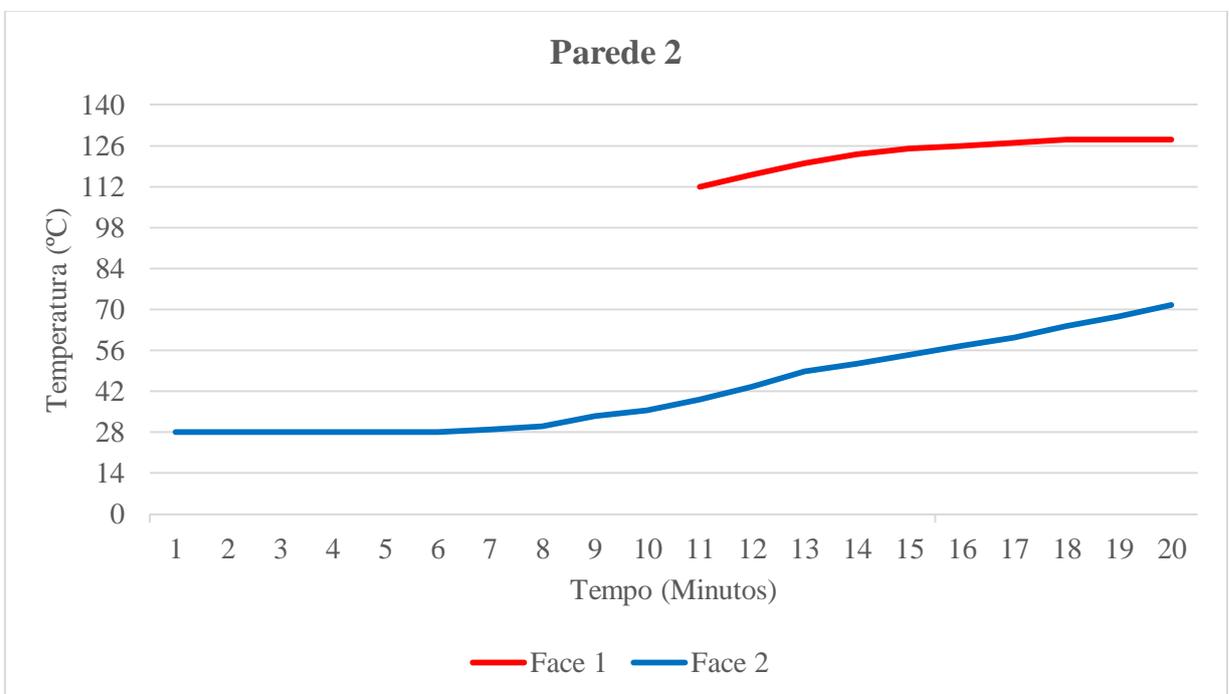
Nesta seção iremos abordar os dados coletados ao longo dos ensaios realizados nas paredes e as propriedades termodinâmicas dos materiais utilizados (concreto, cerâmica e isopor), os dados coletados são expostos pelos seguintes gráficos:

**Gráfico 1. Parede 1 (Bloco cerâmico e Argamassa de Revestimento)**

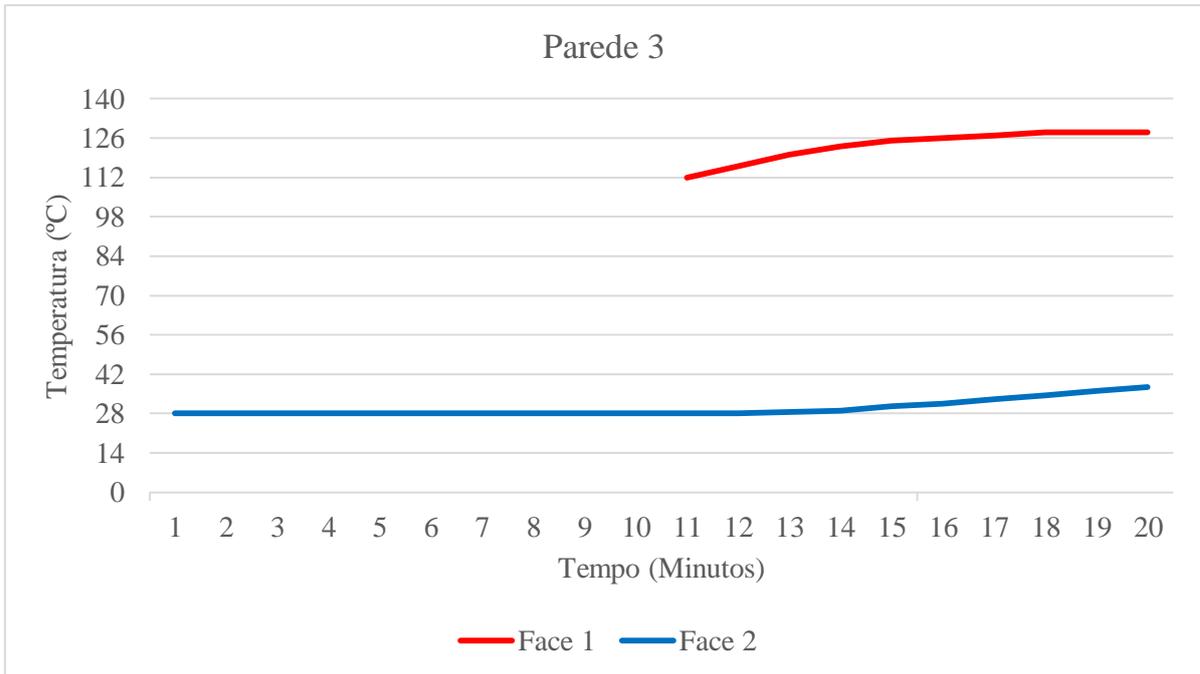


Fonte: Aatoria Propria, 2018.

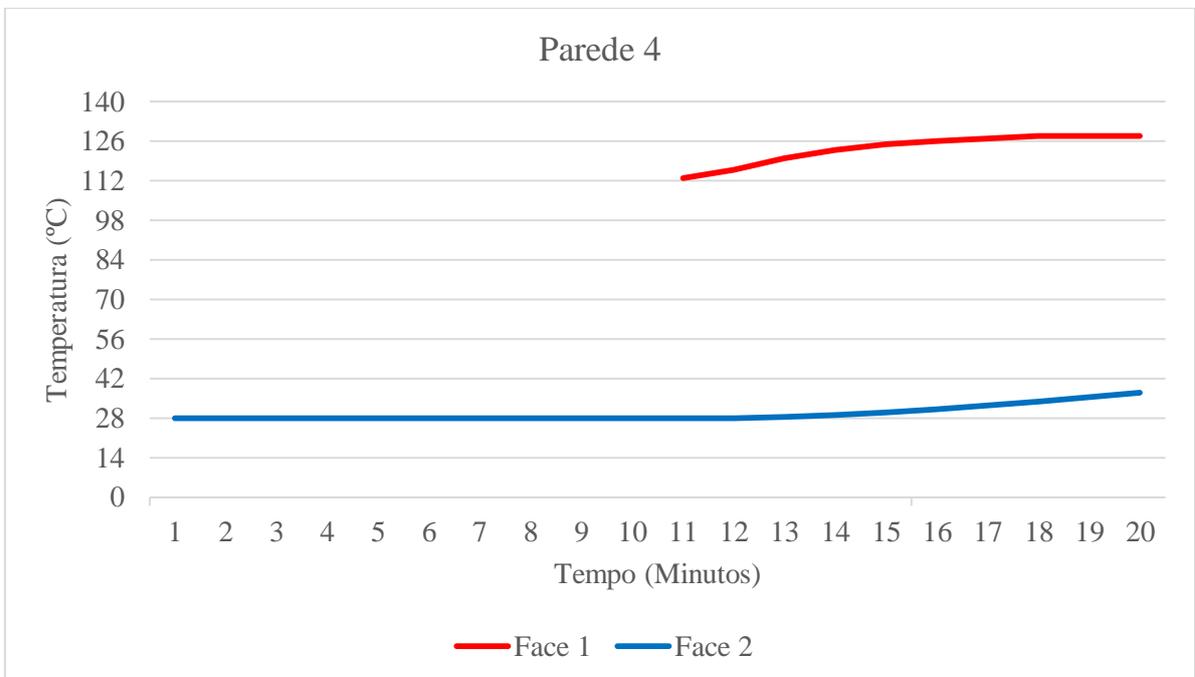
**Gráfico 2. Parede 2 (Bloco de Concreto e Argamassa de Revestimento)**



Fonte: Aatoria Propria, 2018.

**Gráfico 2. Parede 3 (Bloco cerâmico, Argamassa de Revestimento e EPS)**

Fonte: Aatoria Propria, 2018.

**Gráfico 3. Parede 4 (Bloco de Concreto, Argamassa de Revestimento e EPS)**

Fonte: Aatoria Propria, 2018.

Apresentamos alguns valores de referência conhecidos pela literatura para condutividade e calor específico de materiais utilizados na construção civil, e que serão utilizados nos cálculos da capacidade térmica e da transmitância térmica das paredes ensaiadas com o uso do software ISOVER - Saint Gobain.

**Tabela 6 . Propriedades dos materiais sólidos**

<b>Material</b>	<b>Condutividade (W/(m.K))</b>	<b>Calor específico (KJ/(kg.K))</b>
Tijolo Cerâmica	0,5	0,920
Concreto	1,75	1
Isopor	0,030	1,33
Areia Seca	0,3	2,09
Cimento	0,9	0,83
Argamassa Comum	1,15	1

Fonte: Adaptado de Morishita et al. (2010, p. 2)

Para obtenção de um maior conforto térmico a ABNT NBR 15220:2005 apresenta algumas propriedades importantes para o desempenho térmico de uma estrutura, e valores admissíveis para propriedades como a transmitância térmica (U) e o atraso térmico ( $\varphi$ ), como mostra as tabela 7 e 8.

O atraso térmico ( $\varphi$ ) é definido na ABNT NBR 15220:2005 como o tempo transcorrido entre uma variação térmica em um meio e sua manifestação na superfície oposta de um componente construtivo submetido a um regime periódico de transmissão de calor.

**Tabela 7. Valores Admissíveis de Transmitância Térmica de Vedações Externas - ABNT**

<b>Vedações externas</b>	<b>Transmitância térmica - U (W/m<sup>2</sup>. K)</b>	<b>Atraso térmico – <math>\varphi</math> (h)</b>
Parede Leve	$U \leq 3,00$	$\varphi \leq 4,3$
Parede Leve Refletora	$U \leq 3,60$	$\varphi \leq 4,3$
Parede Pesada	$U \leq 2,20$	$\varphi \leq 6,5$

Fonte: ABNT NBR 15.220, 2005.

É importante destacar as propriedades térmicas dos materiais utilizados conforme agrupados na Tabela 8.

**Tabela 8. Propriedades Térmicas de Materiais Utilizados em Paredes Externas - ABNT**

<b>Vedações externas</b>	Densidade - $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Condutividade Térmica - k (W/m.K)	Capacidade Térmica - C (kJ/kg.K)
Cerâmica	$U \leq 3,00$	$\phi \leq 4,3$	0,92
Argamassa de emboço ou assentamento	$U \leq 3,60$	$\phi \leq 4,3$	1,00
Concreto	$U \leq 2,20$	$\phi \leq 6,5$	1,00

Fonte: ABNT NBR 15.220, 2005.

### 3.3 CALCULANDO A CAPACIDADE TÉRMICA

#### **Parede 1**

$$CT = e \times c \times \rho = [\text{KJ}/\text{m}^2\text{K}]$$

Argamassa:

$$CT = 0,025 \times 1 \times 1792 = 44,8 [\text{KJ}/\text{m}^2\text{K}]$$

Tijolo Cerâmico:

$$CT = 0,09 \times 0,94 \times 1200 = 101,52 [\text{KJ}/\text{m}^2\text{K}]$$

Capacidade Térmica Total:

$$CT = 2 \times 44,8 + 101,52$$

$$CT_{\text{Parede 1}} = \mathbf{191,1} [\text{KJ}/\text{m}^2\text{K}]$$

#### **Parede 2**

$$CT = e \times c \times \rho = [\text{KJ}/\text{m}^2\text{K}]$$

Argamassa:

$$CT = 0,025 \times 1 \times 1792 = 44,8 [\text{KJ}/\text{m}^2\text{K}]$$

Bloco de Concreto:

$$CT = 0,14 \times 1 \times 1400 = 196 \text{ [KJ/m}^2\text{K]}$$

Capacidade Térmica Total:

$$CT = 2 \times 44,8 + 196$$

$$CT_{\text{Parede 2}} = \mathbf{285,6 \text{ [KJ/m}^2\text{K]}}$$

### **Parede 3**

$$CT = e \times c \times \rho = \text{[KJ/m}^2\text{K]}$$

Argamassa:

$$CT = 0,025 \times 1 \times 1792 = 44,8 \text{ [KJ/m}^2\text{K]}$$

Tijolo Cerâmico:

$$CT = 0,09 \times 0,94 \times 1200 = 101,52 \text{ [KJ/m}^2\text{K]}$$

Material EPS (Isopor):

$$CT = 0,08 \times 1,42 \times 30 = 3,408 \text{ [KJ/m}^2\text{K]}$$

Capacidade Térmica Total:

$$CT_1 = 44,8$$

$$CT_2 = (2 \times 44,8) + 101,52 + 3,408 = 194,528 \text{ [KJ/m}^2\text{K]}$$

Ponderação em relação as Áreas:

$$CT = \frac{2A_1 + A_2}{\frac{2A_1}{CT_1} + \frac{A_2}{CT_2}}$$

$$CT = \frac{2 \times 0,03 + 0,97}{\frac{2 \times 0,03}{44,8} + \frac{0,97}{194,528}}$$

$$CT_{\text{Parede 3}} = \mathbf{162,827 \text{ [KJ/m}^2\text{K]}}$$

### **Parede 4**

$$CT = e \times c \times \rho = \text{[KJ/m}^2\text{K]}$$

Argamassa:

$$CT = 0,025 \times 1 \times 1792 = 44,8 \text{ [KJ/m}^2\text{K]}$$

Bloco de Concreto:

$$CT = 0,14 \times 1 \times 1400 = 196 \text{ [KJ/m}^2\text{K]}$$

Material EPS (Isopor):

$$CT = 0,08 \times 1,42 \times 30 = 3,408 \text{ [KJ/m}^2\text{K]}$$

Capacidade Térmica Total:

$$CT_1 = 44,8$$

$$CT_2 = (2 \times 44,8) + 196 + 3,408 = 289,008 \text{ [KJ/m}^2\text{K]}$$

Ponderação em relação as Áreas:

$$CT = \frac{2A_1 + A_2}{\frac{2A_1}{CT_1} + \frac{A_2}{CT_2}}$$

$$CT = \frac{2 \times 0,03 + 0,97}{\frac{2 \times 0,03}{44,8} + \frac{0,97}{289,008}}$$

$$CT_{\text{parede 4}} = \mathbf{219,789 \text{ [KJ/m}^2\text{K]}}$$

### 3.4 DESEMPENHO TÉRMICO RESULTADOS

Abordaremos nesta seção a respeito dos valores calculados de transmitância térmica das paredes ensaiadas, buscando sempre comparativos que possam permitir a compreensão da importância do estudo e análise do desempenho térmico das edificações e de sua utilidade em busca de benefícios em todos os aspectos do cotidiano.

Com o auxílio do *software ISOVER - Saint Gobain*, calculamos os valores de transmitância térmica para as 4 paredes ensaiadas através de simulações de determinados parâmetros, os valores das transmitâncias encontradas são apresentados pela Tabela 9.

**Tabela 9. Transmitância Térmica dos Elementos Construtivos Ensaçados**

Paredes	U (W/m <sup>2</sup> K)
Parede 1	U = 2,364
Parede 2	U = 2,611
Parede 3	U = 0,351
Parede 4	U = 0,356

Fonte: Autoria própria, 2018.

Com o *software*, foi possível realizar as simulações dos parâmetros para o cálculo das transmitâncias térmicas das paredes construídas. As simulações são mostradas pelas seguintes figuras:

**Figura 14. Dados da Simulação Para Cálculo da Transmitância Térmica da Parede 1.**

CAPA	ESPESSOR (m)	COEF. COND. (W/mK)	R <sub>Ver.</sub> (m <sup>2</sup> K/W)	R <sub>Inv.</sub> (m <sup>2</sup> K/W)
TEMPERATURA DE DISEÑO INTERIOR: 18				
MORTEROS DE REVOQUES Y JUNTAS (EXTERIOR)	0.05	1.16	0.043	0.043
TEMP: 10.364 C      TEMP CONDENSACIÓN: 12.07 C				
LADRILLO 8 X 15 X 25	0.09		0.21	0.21
TEMP: 8.433 C      TEMP CONDENSACIÓN: 4.64 C				
TOTALES	0.14			

VERIFICACIÓN DE TRANSMITANCIA TÉRMICA K		VERIFICACIÓN DE CONDENSACIÓN SUPERFICIAL	
TRANSMITANCIA TÉRMICA K INVIERNO (W/M <sup>2</sup> K)	2.364	TEMPERATURA DE ROCÍO	12.07 °C
TRANSMITANCIA TÉRMICA K VERANO (W/M <sup>2</sup> K)	2.364	TEMPERATURA SUPERFICIAL EN LA PRIMER CAPA	11.024 °C
NIVELES Kadm INVIERNO (A <= 0.36, B < 0.99, C < 1.75)	FUERA DE RANGO	DIFERENCIA DE TEMPERATURA (TEMPERATURA SUPERFICIAL - TEMPERATURA DE ROCÍO) >= 0	-1.046 °C
NIVELES Kadm VERANO (A <= 0.45, B < 1.10, C < 1.80)	FUERA DE RANGO		

Fonte: Autoria própria (Software ISOVER - Saint Gobain), 2018.

Figura 15. Dados da Simulação Para Cálculo da Transmitância Térmica da Parede 2

CAPA	ESPESOR (m)	COEF. COND. (W/mK)	RVer. (m² K/W)	RInv. (m² K/W)
TEMPERATURA DE DISEÑO INTERIOR: 18				
MORTEROS DE REVOQUES Y JUNTAS (EXTERIOR)	0.05	1.16	0.043	0.043
HORMIGÓN 10 X 19 X 39 (2223)	0.14		0.17	0.17
<b>TOTALES</b>	<b>0.19</b>			

VERIFICACIÓN DE TRANSMITANCIA TÉRMICA K		VERIFICACIÓN DE CONDENSACIÓN SUPERFICIAL	
TRANSMITANCIA TÉRMICA K INVIERNO (W/M² K)	2.611	TEMPERATURA DE ROCÍO	12.07 °C
TRANSMITANCIA TÉRMICA K VERANO (W/M² K)	2.611	TEMPERATURA SUPERFICIAL EN LA PRIMER CAPA	10.364 °C
NIVELES Kadm INVIERNO (A ≤ 0.36, B < 0.99, C < 1.75)	FUERA DE RANGO	DIFERENCIA DE TEMPERATURA	-1.706 °C
NIVELES Kadm VERANO (A ≤ 0.45, B < 1.10, C < 1.80)	FUERA DE RANGO	(TEMPERATURA SUPERFICIAL - TEMPERATURA DE ROCÍO) ≥ 0	
PARA LA VERIFICACIÓN SE TOMA EL KADM MÁS EXIGENTE (MENOR) ENTRE INVIERNO Y VERANO			

Fonte: Autoria própria (Software ISOVER - Saint Gobain), 2018.

Figura 16. Dados da Simulação Para Cálculo da Transmitância Térmica da Parede 3.

CAPA	ESPESOR (m)	COEF. COND. (W/mK)	RVer. (m² K/W)	RInv. (m² K/W)
TEMPERATURA DE DISEÑO INTERIOR: 18				
MORTEROS DE REVOQUES Y JUNTAS (EXTERIOR)	0.05	1.16	0.043	0.043
LADRILLO 8 X 15 X 25	0.09		0.21	0.21
POLIESTIRENO EXPANDIDO EN PLANCHAS	0.08	0.033	2.424	2.424
ALUMINIO	0.001	204	0	0
<b>TOTALES</b>	<b>0.221</b>			

VERIFICACIÓN DE TRANSMITANCIA TÉRMICA K		VERIFICACIÓN DE CONDENSACIÓN SUPERFICIAL	
TRANSMITANCIA TÉRMICA K INVIERNO (W/M² K)	0.351	TEMPERATURA DE ROCÍO	12.07 °C
TRANSMITANCIA TÉRMICA K VERANO (W/M² K)	0.351	TEMPERATURA SUPERFICIAL EN LA PRIMER CAPA	16.881 °C
NIVELES Kadm INVIERNO (A ≤ 0.36, B < 0.99, C < 1.75)	NIVEL A	DIFERENCIA DE TEMPERATURA	4.811 °C
NIVELES Kadm VERANO (A ≤ 0.45, B < 1.10, C < 1.80)	NIVEL A	(TEMPERATURA SUPERFICIAL - TEMPERATURA DE ROCÍO) ≥ 0	

Fonte: Autoria própria (Software ISOVER - Saint Gobain), 2018.

Figura 17. Dados da Simulação Para Cálculo da Transmitância Térmica da Parede 4.

CAPA	ESPESOR (m)	COEF. COND. (W/mK)	RVer. (m <sup>2</sup> K/W)	RInv. (m <sup>2</sup> K/W)
TEMPERATURA DE DISEÑO INTERIOR: 18				
MORTEROS DE REVOQUES Y JUNTAS (EXTERIOR)	0.05	1.16	0.043	0.043
HORMIGÓN 10 X 19 X 39 (2223)	0.14		0.17	0.17
ALUMINIO	0.001	204	0	0
POLIESTIRENO EXPANDIDO EN PLANCHAS	0.08	0.033	2.424	2.424
TOTALES	0.271			
		TEMP: 16.849 C	TEMP CONDENSACIÓN: 12.07 C	
		TEMP: 16.558 C	TEMP CONDENSACIÓN: 12.06 C	
		TEMP: 15.407 C	TEMP CONDENSACIÓN: 12 C	
		TEMP: 15.407 C	TEMP CONDENSACIÓN: -2.067 C	

VERIFICACIÓN DE TRANSMITANCIA TÉRMICA K		VERIFICACIÓN DE CONDENSACIÓN SUPERFICIAL	
TRANSMITANCIA TÉRMICA K INVIERNO (W/M <sup>2</sup> K)	0.356	TEMPERATURA DE ROCÍO	12.07 °C
TRANSMITANCIA TÉRMICA K VERANO (W/M <sup>2</sup> K)	0.356	TEMPERATURA SUPERFICIAL EN LA PRIMER CAPA	16.865 °C
NIVELES Kadm INVIERNO (A <= 0.36, B < 0.99, C < 1.75)	NIVEL A	DIFERENCIA DE TEMPERATURA	4.795 °C
NIVELES Kadm VERANO (A <= 0.45, B < 1.10, C < 1.80)	NIVEL A	(TEMPERATURA SUPERFICIAL - TEMPERATURA DE ROCÍO) >= 0	

Fonte: Autoria própria (Software ISOVER - Saint Gobain), 2018.

Com estes cálculos e simulações foi possível fazer um comparativo dos dados obtidos com dados de referência coletados do Inmetro. A utilidade dessa comparação se baseia no fato dos objetivos buscados pelo Inmetro estarem em ressonância com este trabalho e podem ser citados entre eles como executar as políticas nacionais de metrologia e da qualidade, verificar a observância das normas técnicas e legais, no que se refere às unidades de medida, métodos de medição e medidas materializadas e manter e conservar os padrões das unidades de medida. Realizamos também um comparativo das transmitâncias térmicas calculadas com o *software*, com valores admissíveis determinados pela ABNT NBR 15220:2005, as comparações são mostradas pelas tabelas 10 e 11.

**Tabela 10. Comparativo Transmitância Térmica e Capacidade Térmica – INMETRO**

Elementos Construtivos	Simulação Software ISOVER - Saint Gobain Transmitância térmica - U (W/m <sup>2</sup> . K)	Capacidade Térmica C (kJ/m <sup>2</sup> K) Calculada	INMETRO Transmitância térmica - U (W/m <sup>2</sup> . K)	INMETRO Capacidade Térmica C (kJ/m <sup>2</sup> K)	Semelhança entre os valores (%)	
					U (W/m <sup>2</sup> . K)	C (kJ/m <sup>2</sup> K)
Parede 1	U = 2,364	C = 191,12	U = 2,46	C = 150	96,09	78,48
Parede 2	U = 2,611	C = 285,60	U = 2,69	C = 272	97,02	95,23
Parede 3	U = 0,351	C = 162,82	U = 0,31	C = 125	88,31	76,77
Parede 4	U = 0,356	C = 219,78	U = 0,32	C = 246	89,88	89,34

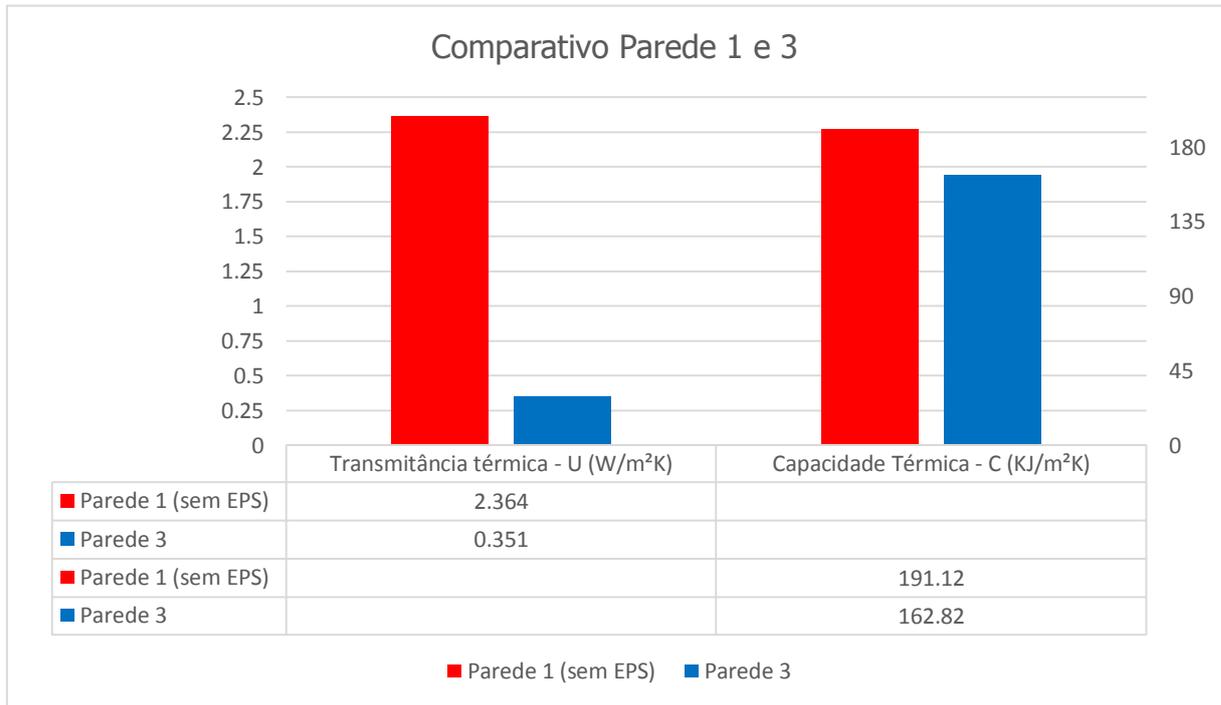
Fonte: Autoria Propria, 2018.

**Tabela 11. Comparativo Transmitância Térmica - ABNT**

Vedações externas	Transmitância térmica - U (W/m <sup>2</sup> . K) – Calculada	Transmitância térmica - U (W/m <sup>2</sup> . K) - ABNT	Classificação
Parede 1	U = 2,364	$U \leq 3,00$	Parede Leve
Parede 1	U = 2,611	$U \leq 3,00$	Parede Leve
Parede 1	U = 0,351	$U \leq 2,20$	Parede Pesada
Parede 4	U = 0,356	$U \leq 2,20$	Parede Pesada

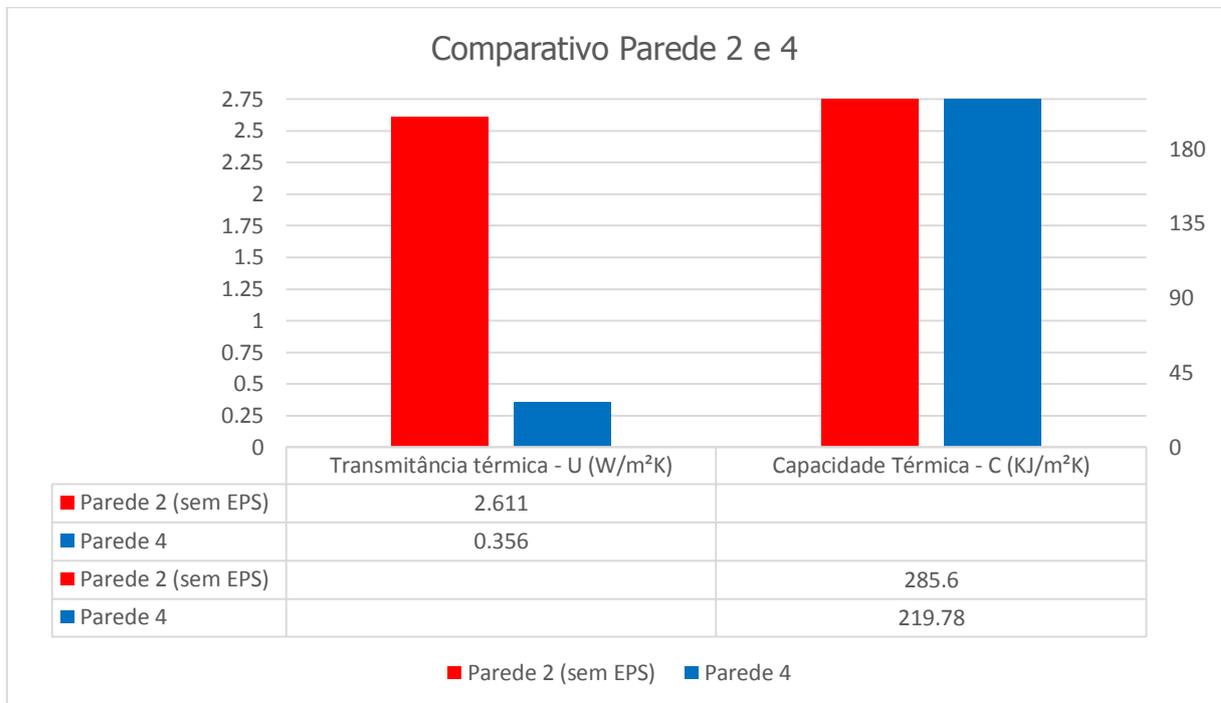
Fonte: Autoria Propria, 2018.

**Gráfico 4. Comparativo Paredes (Bloco cerâmico e Argamassa de Revestimento + EPS)**



Fonte: Autoria Propria, 2018.

**Gráfico 5. Comparativo Paredes (Bloco de Concreto, Argamassa de Revestimento + EPS)**



Fonte: Autoria Propria, 2018.

Observando os dados coletados a respeito do comportamento térmico das paredes ensaiadas, nota-se que em um mesmo intervalo de tempo ocorre um menor aumento de

temperatura da face oposta a fonte de calor nas paredes que tiverem uma adição de material isolante (EPS) em seu interior, logo constatamos que ocorre uma redução do fluxo térmico através da parede assim como redução da transmitância térmica da parede e opostamente ocorre um aumento da resistência térmica da parede, tal fato também é comprovado quando observamos os dados obtidos com as simulações realizadas com o *software ISOVER - Saint Gobain*, que nos mostra que com a adição de apenas uma placa de 8cm do material EPS é possível se reduzir em até 86% a transmitância térmica de uma parede de alvenaria.

#### **4 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Foi possível realizar todas as atividades empíricas inicialmente propostas neste trabalho, a pesquisa experimental foi realizada com as medições das temperaturas das faces das paredes através de sensores conectados a um arduino e um software para leitura das temperaturas através de um notebook, as condições de realização destes ensaios proporcionaram a obtenção de parâmetros para análise do desempenho térmico das paredes através do cálculo da transmitância térmica com o *software ISOVER - Saint Gobain* por meio de simulações. Realizando a análise dos comportamentos térmicos das paredes com adição de material isolante (EPS) em seu interior, constatou-se que os resultados encontrados para a transmitância térmica e a variação de temperatura da face contrária a fonte de calor tiveram diferenças significativas.

Notamos que devido às propriedades isolantes do material EPS, é possível melhorar o desempenho térmico dos sistemas construtivos em relação a redução da transferência de calor do meio externo para o meio interno. As diferenças entre as temperaturas observadas nas faces opostas das paredes foram de 27 °C e 34 °C respectivamente para as comparações entre (parede 1 x parede 3) e (parede 2 x parede 4).

Notou-se que o desempenho térmico das paredes construídas sem adição de EPS foi inferior ao das paredes que tiveram adição do material isolante em seu interior.

O aumento do desempenho térmico das paredes de vedação da edificação implica em uma menor quantidade de energia transferida para o interior da edificação, o que representa diretamente uma menor necessidade de consumo de energia elétrica para resfriamento do ambiente interno, o que determina uma forma de reduzir o consumo de energia elétrica. Este fato se mostra de grande utilidade nas regiões com baixas latitudes e com grande parcela de transferência de carga térmica para as edificações devido a uma maior intensidade da radiação solar, como o Nordeste.

Outra vantagem de se utilizar o EPS além do aumento do desempenho térmico e consequentemente do conforto térmico é o fato de ser um material reciclável e que ao contrário de simplesmente ser descartado pode ser reutilizado na construção de elementos de alvenaria permitindo reduzir o impacto ambiental que seria causado ao meio ambiente com a descarte deste material.

## 5 REFERÊNCIAS

BERGMAN, T. L., LAVINE, A. S., & INCROPERA, F. P. (2011). *Fundamentals of heat and mass transfer*. Wiley e Sons.

Callen, H. B. (1985). *THERMODYNAMICS AND AN INTRODUCTION TO*. John Willey.

ÇENGEL, Y. A. (2006). *Heat and mass transfer: a practical approach*. 3. ed. New York: McGraw-Hill.

HOLMAN, J. P. (2010). *Heat transfer*. 10. ed. New York: McGraw-Hill.

HOWELL, J. R., SIEGEL, R., & MENGÜÇ, M. P. (2011). *Thermal radiation heat transfer*. 5. ed. Boca Raton: CRC Press. Boca Raton: CRC Press.

RESNICK, E. E. (1979). *Quantum physics of atoms, molecules, solids, nuclei and particles*. Rio de Janeiro: John Willey e Sons, Inc.

ROHSENOW, W. M., HARTNETT, J. P., & CHO, Y. I. (1998). *Handbook of heat transfer*. McGraw-Hill.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Desempenho térmico de edificações. ABNT NBR 15220. Rio de Janeiro, 2005

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), NBR 6118:2003 - Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

LABERTS, Roberto; DUTRA, Luciano; PEREIRA, Fernando O.R. – Eficiência Energética na Arquitetura. 3ª Ed. Rio de Janeiro: Editora ELETROBRAS/PROCEL, 2014. 366 p.

NBR 12818: Concreto - Determinação da difusividade térmica. Rio de Janeiro: 2012.

Lamberts, R. GHISI, E.; DE ABREU, A. L. P. Desempenho térmico de edificações: Conforto. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2016.

Martins, J. C. (coord.) Desempenho de edificações habitacionais: guia orientativo para atendimento à norma ABNT NBR 15575/2013. Câmara Brasileira da Indústria da Construção (CBIC), Brasília, 2013.

Frota, A. B. e Schiffer, S. R. Manual de conforto térmico: arquitetura, urbanismo. 5. ed. São Paulo: Studio Nobel, 2001.