UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO - UEMA
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS - CCT
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA E PRODUÇÃO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

MARIA VIRLENE SILVA ALENCAR

MODELAGEM COMPUTACIONAL DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONDUÇÃO EM UMA PAREDE PLANA COMPOSTA

São Luís – MA
2016

MARIA VIRLENE SILVA ALENCAR

MODELAGEM COMPUTACIONAL DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONDUÇÃO EM UMA PAREDE PLANA COMPOSTA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica e Produção da Universidade Estadual do Maranhão para obtenção do grau de bacharelado em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Lourival Matos de Sousa Filho

São Luís – MA

2016

Alencar, Maria Virlene Silva.

Modelagem computacional de transferência de calor por condução em uma parede plana composta / Maria Virlene Silva Alencar. – São Luís, 2016.

51f.

Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual do Maranhão, 2016.

Orientador: Prof. Lourival Matos de Sousa Filho.

1.Modelagem computacional. 2. Condução. 3. Parede composta.

I. Título.

CDU 519.71:536.24

MARIA VIRLENE SILVA ALENCAR

MODELAGEM COMPUTACIONAL DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONDUÇÃO EM UMA PAREDE PLANA COMPOSTA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica e Produção da Universidade Estadual do Maranhão para obtenção do grau de bacharelado em Engenharia Mecânica.

Aprovado em: / /

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Lourival Matos de Sousa Filho (Orientador)
Universidade Estadual do Maranhão - UEMA

Prof. Me. Paulo Roberto Campos Flexa Ribeiro Filho
Universidade Estadual do Maranhão - UEMA

Prof. Dr. Fernando Lima de Oliveira
Universidade Estadual do Maranhão - UEMA

À Deus, ao meu pai, Francisco, e aos meus irmãos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Papai do Céu por tudo.

Agradeço ao meu pai, Francisco, a quem sempre olhei como fonte de inspiração, pela vida, amor e cuidado que demonstra sentir por mim.

Aos meus irmãos, Beatriz, Kaio, Clarice e à pequenina Isabela, por estarem sempre comigo e pela festa que fazem a cada reencontro.

Agradeço ao meu professor orientador, prof. Dr. Lourival Filho pelos ensinamentos, apoio e paciência que ele teve comigo. Agradeço a ele por me ajudar na realização deste sonho.

Às Maria's e à Antonia da minha vida, mulheres pelas quais tenho muito amor e admiração.

À Ranielly Costa, por ter sido amiga, mãe e psicóloga nas horas em que o desânimo e a saudade de casa tomavam conta de mim.

À família Barreto Brito, em especial à Marise B. Brito e seu esposo Luiz Fernando S. Brito, por tudo que fizeram por mim, não tenho palavras e nem bens materiais que possam, de alguma forma, retribuir a ajuda e o carinho que recebi deles, portanto peço à Deus para que os abençoe grandemente.

Aos meus professores, pessoas pelas quais tenho muita admiração, respeito e carinho. Lembrarei de cada um deles com muito carinho e admiração.

À Denise B. Brito, Delzuita, Raphaello, Janes Rodrigues, Damiana, Da Silva, Thayara e Jhanda por serem quem são e por, de alguma forma (cada um do seu jeito), terem me ajudo a passar por essa luta, apoiando, incentivando, me fazendo sorrir e por permitirem que eu fizesse parte da vida deles.

Ao Cícero Almeida, Flavio Nunes, Jorge Passinho, Magalhães, Valdemar Leal, Nazaré, Elineude, Helena, Deusa, Iracema e Abrão Lima por me lembrarem que eu sou capaz e por me fazerem sentir vontade de querer ser melhor.

Agradeço também aos amigos que conquistei na Alumar, meus gestores Paulo Tomich e Emilio Josino por todo o carinho, compreensão, ensinamentos e instruções que recebi da parte deles, durante os dois anos de estágio.

São muitas pessoas, Deus as abençoe e recompense por seus atos de carinho e amor.

“Não te mandei eu? Sê forte e corajoso; não temas e nem te espantes, porque o Senhor, teu Deus, é contigo por onde quer que andares.”

Josué 1:9

RESUMO

Este trabalho foi desenvolvido com o propósito de resolver numericamente a equação de condução de calor unidimensional e em regime permanente para paredes compostas por meio de um código computacional implementado no software MATLAB. O método dos volumes finitos foi utilizado para a discretização da equação de energia em sua forma conservativa. A partir do código desenvolvido, foi realizada a análise da influência da condutividade térmica e da velocidade do vento sobre a temperatura na superfície externa da parede. A validação do programa implementado foi realizada através da comparação dos resultados obtidos com as soluções analíticas para problemas simples.

Palavras-Chaves: Modelagem computacional; Condução; Parede composta.

ABSTRACT

This work was developed with the purpose of numerically solving the one-dimensional and steady-state heat conduction equation for composite walls by means of a computational code implemented in MATLAB software. The finite volume method was used for the discretization of the energy equation in its conservative form. From the developed code, the influence of the thermal conductivity and the wind velocity on the external surface of the wall was analyzed. The validation of the implemented program was accomplished by comparing the results obtained with the analytical solutions for simple problems.

Keywords: Computational modeling; Conduction; Composite wall.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Transferência de calor unidimensional por condução 15
Figura 2 - Variação da Condutividade térmica em função da temperatura para materiais sólidos. 17
Figura 3 - Variação da Condutividade térmica em função da temperatura para materiais líquidos. 17
Figura 4 - Variação da Condutividade térmica em função da temperatura para materiais gasosos. 18
Figura 5 - Superfície com emissividade, absortividade e temperatura. 22
Figura 6 - Condução de calor em regime permanente. 24
Figura 7 - Classificação das malhas computacionais. 28
Figura 8 - Malha Estruturada. 29
Figura 9 - Malha não-Estruturada. 29
Figura 10 - Materiais constituintes da parede composta. 30
Figura 11 - Parede plana composta. 31
Figura 12 - Componentes construtivos para análise de difusão de calor. 33
Figura 13 - Malha unidimensional mostrando típico volume de controle. 34
Figura 14 - Nó próximo à superfície externa. 35
Figura 15 - Nós próximos à interface de contato A/B. 36
Figura 16 - Nó próximo à superfície interna da parede. 37
Figura 17 - Comparação dos valores de temperatura encontrados por meio do modelo de resistência térmica e o modelo desenvolvido em MATLAB. 39
Figura 18 - Influência da condutividade térmica do material A na temperatura da superfície externa. 40
Figura 19 - Influência da condutividade térmica na temperatura da superfície externa. 41
Figura 20 - Influência da velocidade do vento na temperatura da superfície externa. 42

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 12
1.1 Objetivo 13
1.1.1 Objetivo Geral 13
1.1.2 Objetivos Específicos 13
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 14
2.1 Transferência de Calor 14
2.2 Mecanismos de Transferência de Calor 14
2.2.1 Condução 14
2.2.2 Convecção 18
2.2.3 Radiação 21
2.2.4 Mecanismos combinados de transferência de calor 23
2.3 Regimes de transferência de calor 23
2.4 Discretização numérica 24
2.4.1 Métodos de discretização 24
2.5 Malhas computacionais 28
3 METODOLOGIA 30
3.1 Modelo matemático 30
3.1.1 Equação da energia 31
3.1.2 Condições de contorno 32
3.2 Solução numérica 33
3.2.1 Discretização do domínio de simulação 33
3.3 Validação do modelo 37
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES 39
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS 44
REFERÊNCIAS 45
APÊNDICE A - MODELO COMPUTACIONAL EM MATLAB 48

1 INTRODUÇÃO

De acordo com Harrell et al. (2000) e Law e Kelton (2000) simulação é uma imitação de um sistema real, de uma forma computadorizada para avaliação e melhoria de sua performance.

Montevechi et al. (2008) completam dizendo que a simulação importa a realidade para esse ambiente controlado de modo que seu comportamento possa ser estudado sob várias condições, sem riscos físicos ou envolvimento de grandes custos. Então é um meio de confrontar teorias com experimentação, de antecipar resultados experimentais ou de realizar experiências, de outro modo, inacessíveis.

Para que o projeto de simulação contemple todos os estudos necessários para sua realização é importante que os estudiosos sigam uma metodologia. Chiwf e Medina (2007) e também Montevechi et al. (2008) propõe uma sequência de atividades a serem realizadas conforme o andamento do projeto de simulação.

O uso da simulação de fenômenos reais, através da implementação de modelos matemáticos com ferramentas computacionais, além de representar economia de tempo e dinheiro, minimiza o gasto com materiais de experimentos para pesquisa (RUPP, 2009).

O problema de transferência de calor em paredes compostas tem sido classicamente modelado utilizando a equação da energia, com condições de contorno lineares e em função do tempo (Chen e Lin, 1991; Beckett e Chu, 1973; Sun e Huang, 2007).

Os métodos numéricos, tais como o Método dos Elementos Finitos, Volumes Finitos e Diferenças Finitas (Chen e Lin, 1991) têm sido amplamente utilizados com sucesso em problemas unidimensionais, com condições de contorno lineares e dependentes do tempo. A produção desse conhecimento via pesquisa com modelagem computacional é uma alternativa que tem se mostrado eficiente, ágil e barata. Nessa alternativa a teoria de transferência de calor é associada a experimentos de laboratório, resultando em programas computacionais que podem ser usados como ferramenta de análise e projeto.

1.1 Objetivo

1.1.1 Objetivo Geral

Analisar numericamente parâmetros geométricos e térmicos de um problema de paredes compostas.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Desenvolver um programa no software MATLAB que possa ser utilizado para encontrar a distribuição de temperatura ao logo de paredes compostas;
- Analisar a influência da condutividade térmica para a temperatura externa da parede;
- Analisar a influência da velocidade do vento para a temperatura externa da parede.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Transferência de Calor

A transmissão de calor pode ser definida como a transmissão de energia de uma região para outra, como resultado da diferença de temperatura entre elas (KREITH, 1973).

De acordo com a Lei Zero da Termodinâmica, se dois corpos estiverem em equilíbrio com um terceiro, então estes estarão em equilíbrio. Esta Lei foi citada com o objetivo de focar no que acontece até que ocorra o equilíbrio, enquanto o equilíbrio térmico não for alcançado existirá transferência de energia (calor) de um corpo para outro, que estejam no mesmo meio ou em meios diferentes (mas em contato) e destes para o meio, de modo que essa transferência acontecerá sempre do corpo (ou meio) de maior temperatura para o de menor, até que estes atinjam a mesma temperatura.

Segundo Incropera et al. (2003), Transferência de Calor é a energia térmica em transito devido a uma diferença de temperatura. Isso significa dizer que sempre e enquanto existir uma diferença de temperatura entre meios distintos haverá um fluxo de energia térmica que ocorre sempre do meio de maior temperatura para o de menor. Essa transferência de energia térmica (calor) pode ocorrer de três maneiras distintas, são elas: condução, convecção e radiação. Ao longo deste trabalho serão descritas, de forma sucinta, cada uma delas.

2.2 Mecanismos de Transferência de Calor

A energia na forma de calor pode ser transferida através de três mecanismos distintos nos mais diversos meios possíveis, de modo que todos os processos de transferência de calor envolvem um ou mais desses mecanismos. Aqui falaremos resumidamente sobre cada um desses mecanismos de transmissão de calor e as leis particulares que governam a cada um deles.

2.2.1 Condução

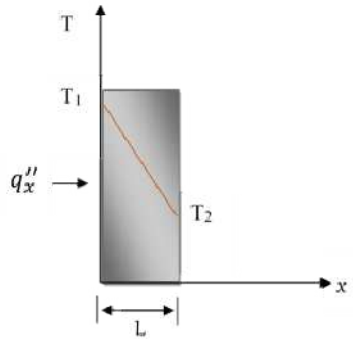
A condução pode ser definida como o processo pelo qual a energia é transferida de uma região de alta temperatura para outra de temperatura mais baixa dentro de um meio que pode ser sólido, líquido ou gasoso ou entre meios diferentes, porém em contato direto. Este é um mecanismo que está diretamente ligado à atividade atômica e molecular, uma vez

que estes são processos físicos que ocorrem a esses níveis os responsáveis por esse mecanismo de transferência de calor. (INCROPERA ET al., 2003).

Segundo Welty et al. (2008), a transferência de energia por condução é conseguida de duas maneiras. A primeira delas é a interação molecular, em que o maior movimento de uma molécula a um nível mais elevado de energia transmite energia para moléculas adjacentes em níveis de energia mais baixos. Este tipo de transferência está presente, em algum grau, em todos os sistemas onde existe um gradiente de temperatura e em que as moléculas de um sólido, líquido ou gás estão presentes. A segunda forma de transferência de calor por condução é por meio dos elétrons livres. O mecanismo de transferência de calor por condução por meio do movimento de elétrons livres é significativo para sólidos metálicos puros. A concentração de elétrons livres varia consideravelmente para ligas e torna-se muito baixa em sólidos não – metálicos. A capacidade dos sólidos para transferir calor por condução é diretamente proporcional à concentração de elétrons livres.

Nos gases e líquidos, a condução é devida às colisões e a difusão das moléculas durante seus movimentos aleatórios. Nos sólidos, a condução é devida à combinação das vibrações das moléculas em uma rede e do transporte de energia pelos elétrons livres (Çengel, 2003). A Figura 1 a transferência de calor unidimensional por condução em uma parede plana simples.

Figura 1 - Transferência de calor unidimensional por condução



Fonte: Autora (2016).

Segundo Bennett e Myers (1978), a equação básica da condução de calor, no regime permanente, é conhecida como equação de Fourier e, para a condução unidirecional, ela pode ser escrita da seguinte forma:

$$q = -kA\frac{dT}{dx} \tag{2.1}$$

Onde q (W) é o fluxo de calor por condução, A (m^2) é a área da seção normal ao fluxo de calor, $\frac{dT}{dx}$ é o gradiente de temperatura na direção x e k (W/m.K) é a constante de proporcionalidade conhecida como condutividade térmica.

Ainda segundo Incropera (2003), o principal objetivo na análise da condução é determinar o campo de temperatura em um meio resultante das condições impostas em suas fronteiras. Ou seja, deseja-se saber a distribuição de temperatura que representa como a temperatura do meio varia com a variação da posição.

2.2.1.1 Condutividade térmica

Segundo Thomas (1980), a condutividade térmica, k(W/m.K), é uma propriedade termofísica dos meios condutores que representa a velocidade de condução de calor por unidade de área num gradiente de temperatura .

Para usar a lei de Fourier, a condutividade térmica do material deve ser conhecida. Essa propriedade, que é classificada como uma propriedade de transporte, fornece uma indicação da taxa na qual a energia é transferida pelo processo de difusão. Ela depende da estrutura física da matéria, atômica e molecular, que está relacionado ao estado da matéria (INCROPERA et al, 2008).

Segundo Incropera et al (2008), a partir da lei de Fourier, Equação 2.1, a condutividade térmica associada com a condução na direção x é definida como:

$$k_x = \frac{q''_x}{\frac{\partial T}{\partial x}} \tag{2.2}$$

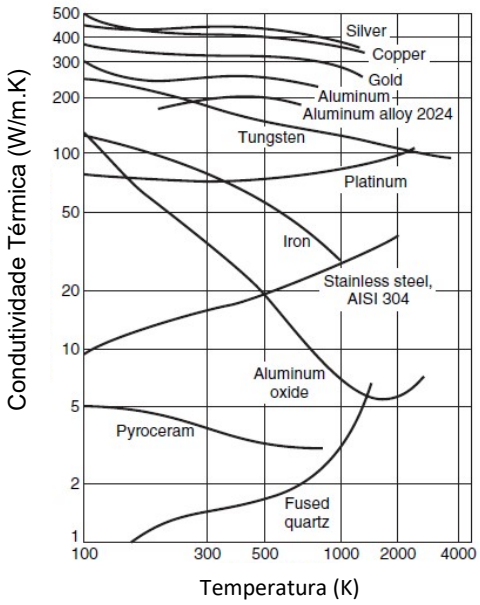
Onde q''_x (W/m^2) é o fluxo de calor na direção x e $\frac{\partial T}{\partial x}$ é o gradiente de temperatura ao longo da direção x.

A condutividade térmica varia com a temperatura e a pressão, sendo, no entanto, muito mais sensível à temperatura do que à pressão (SISSOM e PITTS, 1988).

As condutividades térmicas de certos sólidos exibem um considerável aumento em temperaturas próximas ao zero absoluto, quando estes sólidos tornam-se supercondutores (Çengel, 2003).

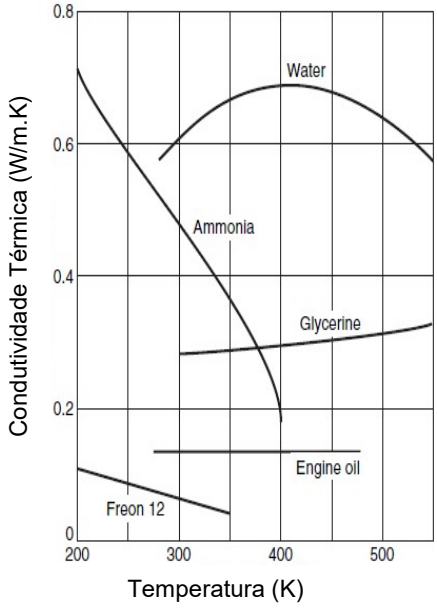
A variação da condutividade térmica em determinadas faixas de temperatura é desprezível para alguns materiais, mas significativa para outros, conforme mostrado nas Figuras 2, 3 e 4 que seguem.

Figura 2 - Variação da Condutividade térmica em função da temperatura para materiais sólidos.



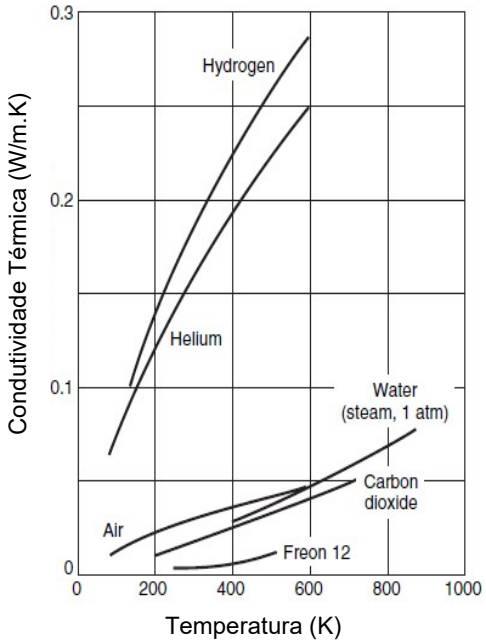
Fonte: WELTY et al. (2008, pag. 205).

Figura 3 - Variação da Condutividade térmica em função da temperatura para materiais líquidos.



Fonte: WELTY et al. (2008, pag. 205)

Figura 4 - Variação da Condutividade térmica em função da temperatura para materiais gasosos.



Fonte: WELTY et al. (2008, pag. 205).

2.2.2 Convecção

O termo transferência de calor por convecção é usado quando ocorre transferência de energia entre uma superfície e um fluido em movimento em virtude da diferença de temperatura entre eles.

De acordo com Kreith (1973), a transmissão de calor entre um contorno sólido e um fluido ocorre por um combinação de condução e transporte de massa. Se o contorno está a uma temperatura mais alta que a do fluido, o calor escoa primeiramente por condução, do sólido para as partículas fluidas na vizinhança da parede. A energia assim transmitida aumenta a energia interna do fluido e é removida pelo movido pelo movimento do fluido. Quando as partículas fluidas aquecidas atingem uma região à temperatura menor, o calor novamente é transmitido por condução do fluido mais quente ao mais frio (KREITH, 1973).

Segundo Incropera et al. (2003), o modo de transferência de calor por convecção é composto por dois mecanismos. São eles: movimento aleatório molecular (semelhante ao que acontece na transferência por condução) e movimento global do fluido (macroscópico).

De acordo com Incropera et al. (2008), uma conseqüência da interação entre o fluido e a superfície é o desenvolvimento de uma região no fluido através da qual a sua velocidade varia entre zero, no contato com a superfície, e um valor finito, associado ao escoamento do fluido. Essa região do fluido é conhecida por camada limite hidrodinâmica ou de velocidade. Alem disso, se as temperaturas da superfície e do fluido forem diferentes, existirá uma região no fluido através da qual a temperatura variará. Essa região é conhecida como camada limite térmica.

O modo de transferência de calor por convecção é mantido pelo movimento molecular aleatório e pelo movimento global do fluido no interior da camada limite (INCROPERA et al., 2008). O estudo e a observação dos fenômenos relacionados com a camada limite são essenciais para a transferência de calor por convecção.

O movimento do fluido pode ser provocado por dois processos. O fluido pode ser posto em movimento em consequência de diferenças de densidades devido à variação de temperatura no fluido. Este mecanismo é chamado de convecção natural (KREITH, 1973). Ainda com base em Kreith (1973), quando o movimento é causado por algum agente externo, como bomba ou um ventilador, falamos de convecção forçada.

De acordo com a literatura, a equação apropriada para calcular a taxa de transferência de calor por convecção é escrita da seguinte forma

$$q'' = h.(T_s - T_\infty) \tag{2.3}$$

Sendo q'' (W/m^2) o fluxo de calor por convecção, h (W/(m^2.K)) o coeficiente de transferência de calor por convecção, T_s (K) é a temperatura da superfície e T_∞ (K) é a temperatura do fluido.

A Equação 2.3 é conhecida pela lei do resfriamento de Newton. Com base na literatura estudada, o coeficiente convectivo não é uma propriedade física como a condutividade térmica na lei de Fourier e depende de algumas propriedades físicas do fluido, do tipo de movimento do fluido e da geometria da superfície que o fluido percorre.

Existem duas formas de transferência de calor por convecção de acordo com a força de impulsora do movimento do fluido, são elas: convecção natural e convecção forçada.

2.2.2.1 Convecção forçada

Na convecção forçada o movimento do fluido é devido a forças impostas externamente (Aplicação de gradientes de pressão no sistema por meio do uso de equipamentos como ventiladores, bombas, sopradores, entre outros).

Em qualquer processo de transmissão de calor ocorrem gradientes de densidade e na presença de um campo de forças originam-se correntes de convecção natural. Se os efeitos da convecção forçada são muito grandes, a influência das correntes de convecção natural pode ser desprezível e, analogamente, quando as forças de convecção natural são muito fortes, os efeitos de convecção forçada podem ser desprezíveis (KREITH, 1973).

Em seu trabalho sobre janelas térmicas, ISMAIL (2010) fala que o coeficiente de transferência de calor por convecção, natural ou forçada, é uma forte função da velocidade do fluido e que os coeficientes encontrados para convecção forçada são normalmente mais elevados do que os encontrados na convecção natural.

2.2.2.2 Convecção natural

De acordo com Incropera et AL (2003), a convecção natural consiste na transferência de energia devido ao movimento molecular aleatório e ao movimento global do fluido. Esse movimento do fluido é devido às forças de empuxo no seu interior, que são resultantes do gradiente de massa específica.

Com base na literatura estudada, a variação da massa específica é devido a um gradiente de temperatura. A convecção natural surge então quando as forças de empuxo superam o efeito retardador das forças viscosas e inerciais. A intensidade dessas forças depende então das propriedades do fluido e da diferença de temperatura imposta. Na convecção natural o movimento do fluido se deve a variações de densidade causadas por um gradiente de temperatura ou concentração no fluido. De acordo com o que foi dito anteriormente, a transferência de calor por convecção natural depende do movimento do fluido e este por sua vez, depende dos gradientes de temperatura.

Segundo ISMAIL (2010), a presença de um gradiente de temperatura em um fluido em um campo gravitacional sempre dá origem às correntes de convecção natural e, portanto, há transferência de calor por convecção natural.

De acordo com a literatura, o surgimento da convecção natural em um fluido pode ser determinado por meio do número de Rayleigh (Ra). Quando o número de Rayleigh é mais baixo que o valor crítico para aquele fluido, a transferência de calor é primariamente na forma de condução; quando o valor crítico é excedido, a transferência de calor é primariamente na forma de convecção. O número de Rayleigh é um número adimensional que consiste no produto do número de Grashof (Gr) pelo número de Prandtl (Pr), ambos números adimensionais. O número de Grashof representa a relação entre as forças de empuxo e as forças viscosas. Já o número de Prandtl representa a relação entre a difusividade do momentum (viscosidade cinemática) e a difusividade térmica. Os números de Rayleigh, Grashof e Prandtl podem ser calculados, respectivamente, por meio seguintes das equações:

$$Ra = Gr.Pr \tag{2.4}$$

$$Gr = \frac{g.\beta.(T_{sup} - T_m).l_c^3}{\vartheta^2} \tag{2.5}$$

$$\Pr = \frac{c_p.\mu}{k} = \frac{\vartheta}{\alpha} \tag{2.6}$$

2.2.3 Radiação

O termo “radiação” é geralmente aplicado a todas as espécies de fenômenos de ondas eletromagnéticas mas, na transmissão de calor, são de interesse apenas os fenômenos que resultam da diferença de temperatura e podem transportar energia através de um meio transparente ou através do espaço. A energia transmitida desta maneira é chamada calor radiante (KREITH, 1973).

A radiação térmica, segundo Incropera et al (2008), é a energia emitida pela matéria que se encontra a uma temperatura não-nula. Ainda que voltemos nossa atenção para a radiação emitida a partir superfícies sólidas, a emissão também ocorre a partir de gases e líquidos. Independentemente da forma da matéria, a emissão pode ser atribuída a mudanças nas configurações eletrônicas dos átomos ou moléculas que constituem a matéria.

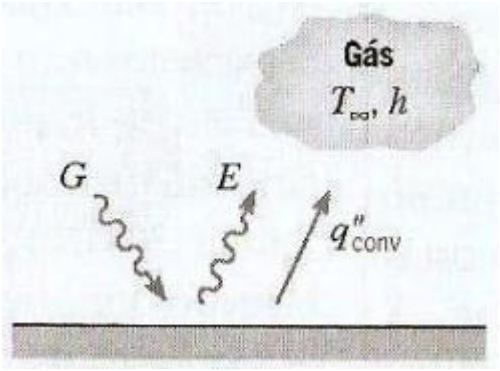
A radiação que é emitida pela superfície tem sua origem na energia térmica da matéria delimitada pela superfície e a taxa na qual a energia é liberada por unidade de área (W/m^2) é conhecida como poder emissivo, E, da superfície. Há um limite superior para o poder emissivo, que é determinado pela lei de Stefan-Boltzmann (INCROPERA et al, 2008).

$$E_n = \sigma T_s^4 \tag{2.7}$$

Onde σ é a constante de *Stefan-Boltzmann* ($\sigma = 5{,}67 \times 10^{-8}$ $W/(m^2K^4)$) e T_s (K) é a temperatura absoluta da superfície. Tal superfície é chamada de um radiador ideal ou corpo negro (INCROPERA et al, 2008).

Segundo Incropera et al (2008), a radiação também pode incidir sobre uma superfície a partir de sua vizinhança. Independente da(s) fonte (s), designamos a taxa na qual todas essas radiações incidem sobre uma área unitária da superfície por irradiação, G (W/m^2) (Figura 5).

Figura 5 - Superfície com emissividade, absortividade e temperatura.



Fonte: Adaptado de INCROPERA et al (2008).

Uma porção, ou toda a irradiação, pode ser absorvida pela superfície. A taxa na qual a energia radiante é absorvida, por unidade de área da superfície, pode ser calculada com o conhecimento de uma propriedade radiante da superfície conhecida por absortividade, α (INCROPERA et al, 2008). Conforme a Equação 2.8.

$$G_{abs} = \alpha G \tag{2.8}$$

Onde α é a absortividade ($0 \leq \alpha \leq 1$) e G (W/m^2) a irradiação.

A energia do campo de radiação é transportada por ondas eletromagnéticas. Diferentemente da condução e da convecção em que é necessária a presença de um meio material, a radiação não necessita, de modo que a transferência de calor por radiação é muito mais eficiente no vácuo. A taxa de liquida de transferência a partir da superfície, expressa por unidade de área é dada por:

$$q_{rad} = \varepsilon\sigma(T_s^4 - T_{viz}^4) \tag{2.9}$$

Onde ε é uma propriedade radiante da superfície denominada emissividade ($0 \leq \varepsilon \leq 1$), σ é a constante de *Stefan-Boltzmann* (σ= 5,67x10^{-8} W/m^{2}K^4) e T_s (K) é a temperatura absoluta da superfície.

A expressão 2.9, de acordo com Incropera et al (2008), fornece a diferença entre a energia térmica que liberada devido à emissão de radiação e aquela que é ganha devido à absorção de radiação.

2.2.4 Mecanismos combinados de transferência de calor

Segundo Bennett e Myers (1978), o calor raramente é transportado por um só mecanismo; geralmente ocorre a associação de mecanismos, em série ou em paralelo. Com a experiência, o engenheiro poderá reconhecer habitualmente os mecanismos predominantes e neles basear seus cálculos, desprezando os efeitos menores.

2.3 Regimes de transferência de calor

O fluxo de calor ou fluxo térmico pode ser classificado de acordo a variação temporal em:

- Permanente (estacionário);
- Não-permanente (transiente).

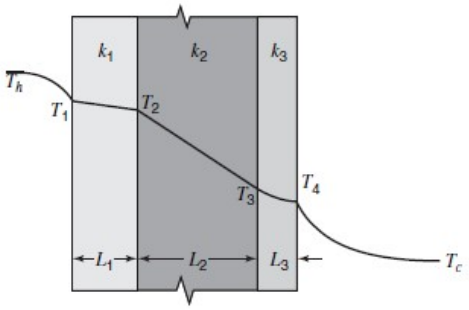
No regime de transferência de calor permanente, a distribuição das temperaturas no interior do corpo no qual se verifica a passagem de calor também não varia com o tempo (COSTA, 1974).

O fluxo térmico chama-se transiente, não-permanente ou transitório, quando o mesmo varia com o tempo. É o que acontece no aquecimento ou resfriamento dos corpos no

qual o fluxo térmico à montante é diferente do fluxo térmico à jusante, de modo que as temperaturas no interior do corpo dependem não só do ponto considerado como do tempo (COSTA, 1974).

Segundo Ordenes et al (2008), um sistema que se encontre em regime permanente significa que as condições térmicas (temperatura e fluxo de calor) nas superfícies de contorno não variam ao longo do tempo, tendo atingido uma situação de equilibro. A Figura 6 mostra um exemplo de condução em regime permanente.

Figura 6 - Condução de calor em regime permanente.



Fonte: Adaptado de WELTY (2008).

2.4 Discretização numérica

2.4.1 Métodos de discretização

Segundo Gonçalves (2007), o ponto de partida de qualquer método numérico é o modelo matemático, por exemplo, um conjunto de equações diferenciais parciais e condições de fronteira que regem o processo.

A escolha de um modelo apropriado para a aplicação alvo pode conter simplificações das regras de conservação exatas. Contudo a seleção das simplificações a efetuar e a relaxação de determinadas restrições, requer um conhecimento aprofundado do problema em causa, de forma a evitar cometer erros graves. Um método numérico normalmente é desenvolvido para encontrar uma solução aproximada de um conjunto particular de equações, uma vez que é impraticável criar um método de resolução que seja aplicável em todas as situações (GONÇALVES, 2007).

Depois de selecionado o modelo matemático, tem de se escolher um método de discretização apropriado, isto é, um método de aproximar as equações diferenciais por um sistema de equações algébricas para as variáveis do problema que serão obtidas em localizações discretas no espaço e no tempo (BLASEK, 2001; BATCHELOR, 1967). Existem vários métodos sendo os mais conhecidos:

- Método das Diferenças Finitas (MDF);
- Método dos Volumes Finitos (MVF);
- Método dos Elementos Finitos (MEF).

Segundo Gonçalves (2007), todos os tipos de métodos produzem o mesmo resultado se a malha utilizada for suficientemente boa, contudo, alguns métodos são mais apropriados para determinadas classes de problemas do que outros.

2.4.1.1 Método das Diferenças Finitas

De acordo com Gonçalves (2007), este é o método de resolução de EDP (Equações Diferenciais Parciais) mais antigo, que se acredita que tenha sido introduzido por Euler no século XVIII. É também o método mais expedido para usar em geometrias simples. O ponto de partida é a conservação da equação na forma diferencial.

O domínio de solução é coberto por uma malha. Em cada ponto da malha, a equação é aproximada, substituindo as derivadas parciais por aproximações em termos de valores das funções nos nós da malha. O resultado é uma equação algébrica por nó da malha, na qual o valor da variável num certo número de nós vizinhos aparece como incógnita (GONÇALVES, 2007).

Em princípio, o MDF pode ser aplicado a qualquer tipo de malha, contudo, o MDF tem sido aplicado a malhas estruturadas em que as linhas da malha servem como coordenadas locais (GONÇALVES, 2007).

Para obter aproximações para a primeira e segunda derivadas da variável em função das coordenadas são usadas expansões em séries de Taylor ou regressões polinomiais. Quando necessário, estes métodos são também aplicados para obter os valores das variáveis em locais que não os nós da malha (por interpolação) (GONÇALVES, 2007).

Em malhas estruturadas, o MDF é muito simples e eficaz. São especialmente fáceis de obter os métodos de elevada ordem em malhas regulares (GONÇALVES, 2007).

As desvantagens do MDF são o fato de a conservação não ser inerente ao método, a não ser que sejam tomadas medidas especiais. Também as restrições às geometrias simples são uma desvantagem significativa em problemas complexos (GONÇALVES, 2007).

2.4.1.2 Método dos volumes finitos

De acordo com Gonçalves (2007), o método dos volumes finitos utiliza como ponto de partida a forma integral da equação da conservação.

Segundo Tu (2013), o método dos volumes finitos é a forma integral das equações de conservação diretamente dentro do espaço físico.

Ainda de acordo com Gonçalves (2007), o domínio de solução é dividido num número finito de volumes de controle (VC) vizinhos, e a equação da conservação é aplicada a cada volume de controle. No centróide de cada volume de controle localiza-se um nó computacional, no qual são calculados os valores das variáveis, sendo os valores das variáveis nas superfícies dos volumes de controle obtidos por interpolação em função dos valores nodais (centro do VC). Os integrais de volume e de superfície são aproximados usando fórmulas de quadratura apropriadas. Como resultado, obtém-se uma equação algébrica para cada VC, na qual aparecem os valores das variáveis no nó em causa e nos nós vizinhos.

O método dos volumes finitos pode ser aplicado a qualquer tipo de malha, por isso adapta-se a geometrias complexas. A malha define apenas as fronteiras do volume de controle e não necessita estar relacionada com um sistema de coordenadas. O método é inerentemente conservativo, contanto que os integrais de superfície (que representam fluxos convectivos e difusivos) sejam os mesmos em faces partilhadas por volumes de controle. A aproximação com o MVF é talvez a de compreensão mais simples, pois todos os termos que precisam de ser aproximados têm significado físico, razão pela qual é popular entre engenheiros (GONÇALVES, 2007).

A desvantagem do MVF em relação ao método de diferenças finitas é o fato de métodos de ordem superior à segunda serem mais difíceis de desenvolver em 3D, com malhas não estruturadas. Isto é devido ao fato da aproximação por VF requerer três níveis de aproximação: interpolação, diferenciabilidade e integração. A base do método dos volumes finitos é a integração do volume de controle (GONÇALVES, 2007).

De acordo com Maliska (1995), o Método dos Volumes Finitos ou Método dos Volumes de Controle destaca-se dos demais métodos numéricos para a aplicação em

problemas de dinâmica dos fluidos, principalmente, devido à capacidade de tratar de forma adequada as não linearidades encontradas em fenômenos dessa área.

2.4.1.3 Método dos elementos finitos

O Método dos Elementos Finitos (MEF) consiste em um método numérico aproximado para análise de diversos fenômenos físicos que ocorrem em meios contínuos, e que são descritos através de equações diferenciais parciais, com determinadas condições de contorno, e possivelmente com condições iniciais (DE SOUZA, 2003).

Segundo Gonçalves (2007), o Método dos Elementos Finitos é similar ao Método dos Volumes Finitos em vários aspectos. O fato de as equações serem multiplicadas por uma *função peso* antes de serem integradas sobre todo o domínio é o que o diferencia. Divide-se o domínio em um conjunto discreto de elementos ou elementos finitos que usualmente são não estruturados.

A solução, nos casos mais simples, é aproximada por uma função linear com os elementos de uma maneira a garantirem continuidade da solução através das fronteiras dos elementos. Tal função pode ser construída através dos seus valores nos cantos dos elementos. Usualmente a função peso tem o mesmo formato. Esta aproximação é então substituída no integral pesado da lei da conservação e as equações a serem resolvidas são derivadas requerendo que a derivada do integral relativo ao valor de cada nó seja zero; isto corresponde a selecionar a melhor solução dentro do conjunto de funções permitidas (aquela que tiver resíduo mínimo). O resultado é um conjunto de equações algébricas não lineares (GONÇALVES, 2007).

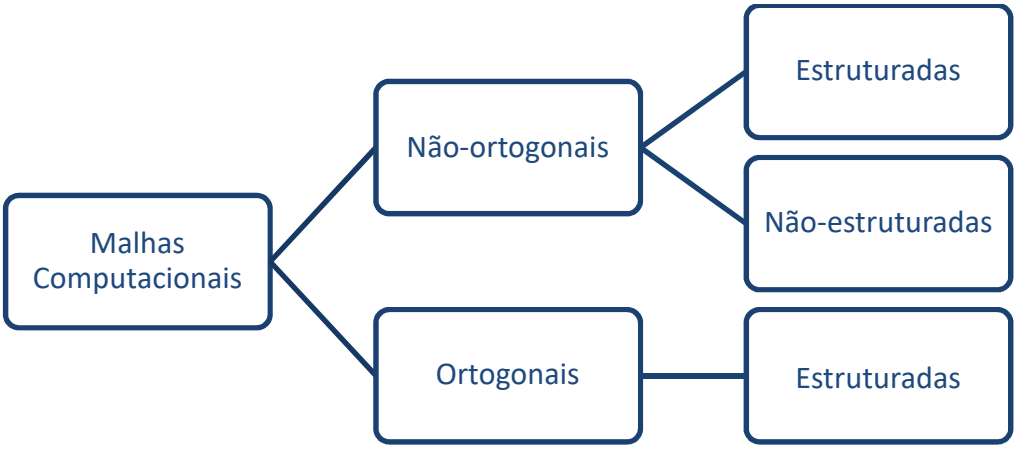
Uma vantagem importante do MEF é a capacidade para lidar com geometrias arbitrárias; existe uma literatura extensiva dedicada à construção de malhas de métodos de EF. As malhas são facilmente refinadas em regiões de interesse, pois cada elemento pode ser simplesmente dividido em vários. Os MEF são relativamente fáceis de analisar matematicamente e pode ser mostrado que são os mais adequados para certos tipos de equações. O principal inconveniente, que é partilhado com todos os métodos que usam malhas não estruturadas, é o fato de as matrizes das equações linearizadas não serem tão bem estruturadas como as das malhas estruturadas fazendo com que seja mais difícil encontrar métodos de resolução eficientes (GONÇALVES, 2007).

Segundo De Souza (2003), a precisão do método depende da quantidade de nós e elementos, e do tamanho e tipo dos elementos presentes na malha. Um dos aspectos mais importantes do MEF diz respeito a sua convergência. Embora trata-se de um método aproximado, pode-se demonstrar que em uma malha consistente, a medida que o tamanho dos elementos finitos tende a zero, e conseqüentemente, a quantidade de nós tende a infinito, a solução obtida converge para a solução exata do problema.

2.5 Malhas computacionais

As malhas numéricas são que determinam os pontos nos quais as variáveis são calculadas, sendo, portanto, uma representação discretizada do domínio geométrico no qual o problema irá ser resolvido. O domínio da solução é dividido em um número finito de sub-domínios (elementos, volumes de controle, etc.) (GONÇALVES, 2007). As malhas podem ser classificadas como mostrado na Figura 7.

Figura 7 - Classificação das malhas computacionais.



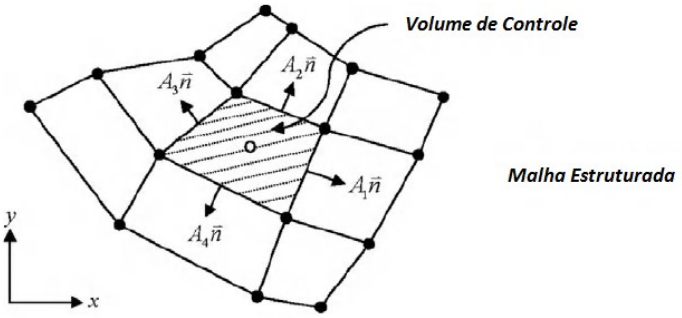
Fonte: Autora (2016).

De acordo com Bortoli (2000), uma malha é dita estruturada quando cada volume interno tem sempre o mesmo número de vizinhos e a numeração dos mesmos tem uma sequência natural, porém quando na malha tem-se um número de vizinhos variando de volume para volume, ficando difícil estabelecer uma regra de ordenação, ela é classificada como malha não-estruturada.

Segundo Morais (2004), as malhas são classificadas como estruturadas quando os volumes de controle são obtidos com uma discretização que segue um sistema de coordenadas globais. Os volumes da malha possuem uma determinada lei de construção e sempre o mesmo

número de vizinhos. Normalmente isto implica na utilização de uma numeração ordenada a fim de se obter matrizes diagonais. A Figura 8 mostra um exemplo de malha estruturada.

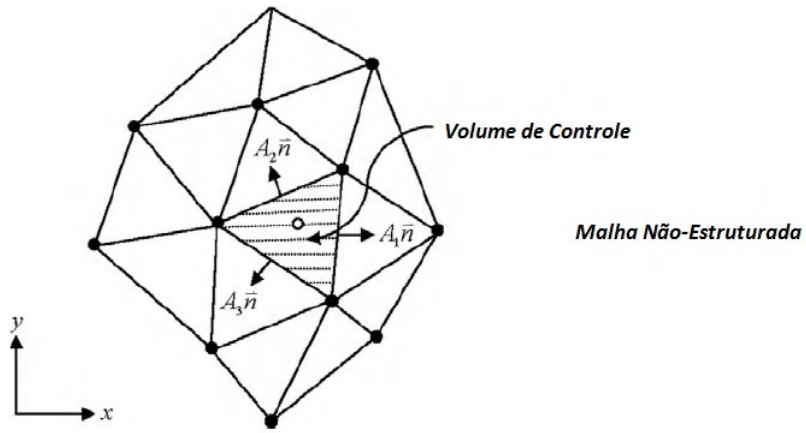
Figura 8 - Malha Estruturada.



Fonte: Tu (2013, p. 131).

As malhas não-estruturadas, segundo Morais (2004), são aquelas malhas que não obedecem a nenhuma lei de construção e onde os volumes de controle não se alinham com um determinado sistema de coordenadas. Elas apresentam como grande atrativo a facilidade de adaptatividade e discretização de geometrias irregulares com cantos e saliências. Veja um exemplo na Figura 9.

Figura 9 - Malha não-Estruturada.



Fonte: Tu (2013, p.131).

3 METODOLOGIA

O modelo desenvolvido neste trabalho é de uma parede plana composta por duas camadas, ***a*** e ***b***, sendo cada uma delas constituída de um material diferente, em regime permanente (variação da temperatura independe do tempo), o método de discretização utilizado foi o método dos volumes finitos, onde utilizou-se a forma integral das equações de contorno como ponto de partida. O domínio de solução foi subdividido em um número finito de volumes de controle adjacentes entre si onde a equação de conservação de energia é aplicada. A rotina de cálculo desenvolvida no software MATLAB calcula cada variável no centróide de cada volume de controle. Os valores das variáveis e propriedades nas faces do volume de controle são determinados por interpolação. A seguir são mostrados o modelo matemático e a solução numérica para o problema em questão. Durante as simulações os variamos o material que constituía a camada ***a*** da parede. A Figura 10 mostra os materiais que foram utilizados e suas respectivas condutividades térmicas.

Figura 10 - Materiais constituintes da parede composta.

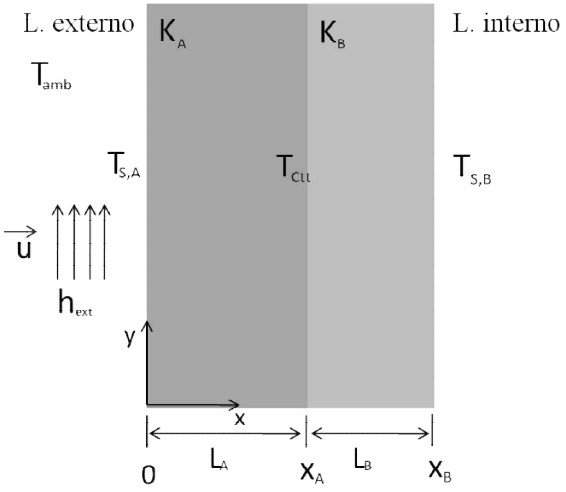
Material A	**K_A (W/m.K)**
Tijolo comum	0,72
Tijolo cerâmico	0,9
Bloco de concreto	1,75
Material B	**K_B (W/m.K)**
Reboco de gesso branco e areia	0,22

Fonte: Incropera (2008).

3.1 Modelo matemático

A transferência de calor através de uma parede plana composta, no problema em questão, ocorre por condução, em regime permanente, sem geração de calor, propriedades constantes e na direção - x. A Figura 11 mostra as configurações da parede em questão.

Figura 11 - Parede plana composta.



Fonte: Autora (2016).

A equação governante deste problema é a equação da energia em três dimensões, transiente e com geração de calor, Equação 3.1, na sua forma conservativa.

3.1.1 Equação da energia

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)+\frac{\dot{q}_g}{k}=\frac{1}{\alpha}\frac{\partial T}{\partial t} \qquad \begin{matrix} 0<x_A<L_A \\ L_A<x_B<L_B \end{matrix} \tag{3.1}$$

Porém, como foi considerado que o regime de transferência de calor é permanente, na direção x e sem geração interna, a Equação 3.1, acima citada, fica da seguinte forma:

$$\left[\frac{\partial}{\partial x_{A,B}}\left(\frac{\partial T_{A,B}}{\partial x_{A,B}}\right)\right]=0 \tag{3.2}$$

Onde $\alpha_{A,B}$ (m^2/s) é a difusividade térmica dos materiais constituintes da parede.

3.1.2 Condições de contorno

- **Parede Externa**

$$-k_A \frac{\partial T_A}{\partial x_A} = h_{ext}\left(T_{amb} - T_{s,a}\right) \qquad x_A = 0 \quad t > 0 \tag{3.3}$$

Na literatura há muitas correlações para se calcular o coeficiente de convecção externo, que são determinadas a partir de experimentos. Essas correlações são dadas em função da velocidade do vento (m/s) e da direção do vento em relação ao ângulo azimute de janelas e paredes planas verticais (ISMAIL, 2010).

Segundo Ismail (2010), a correlação utilizada para cálculo do coeficiente convectivo externo sugerida pela International Stardards Organization (ISO) é escrita da seguinte forma:

$$h_{ext} = 10 + 4,1u \tag{3.4}$$

Onde u (m/s) é a velocidade do vento e h_{ext} (W/m^{2}K) é o coeficiente convectivo externo. Sendo esta a correlação adotada na solução do problema em estudo.

- **Interface A/B**

Para os pontos da interface a T_A é igual a T_B, pois são pontos coincidentes.

$$T_A = T_B$$

$$-k_A \frac{\partial T_A}{\partial x_A} = -k_B \frac{\partial T_B}{\partial x_B} \qquad \boldsymbol{x_A = x_B = L_A}\ ,\ t > 0 \tag{3.5}$$

- **Parede Interna**

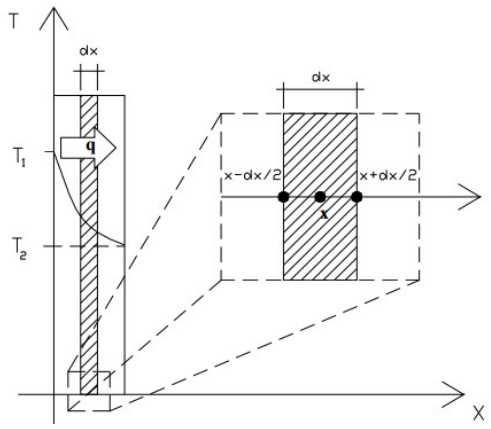
$$T_{s,b} = cte \qquad\qquad x_B = L_B\,, \quad t > 0$$

3.2 Solução numérica

A solução para Equação 3.2 foi encontrada utilizando-se técnicas numéricas baseadas no método dos volumes finitos. O domínio de discretização numérica envolve toda a parede, dividindo-se esta em *n* intervalos, na direção x, as equações válidas para os pontos internos do domínio são obtidas discretizando a equação da energia.

Segundo Ismail (2010), uma vez estabelecidas as equações que representam o modelo matemático e as condições de contorno válidas para o fenômeno físico que estamos estudando, o próximo passo é proceder com a solução do problema. A Figura 12 mostra de forma simplificada como foi feita a divisão da área de interesse em volumes de controle infinitesimais.

Figura 12 - Componentes construtivos para análise de difusão de calor.

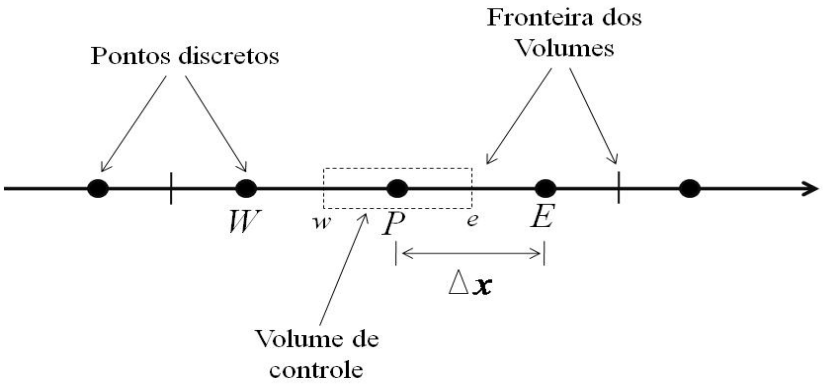


Fonte: Ordenes et al. (2008).

3.2.1 Discretização do domínio de simulação

A discretização do domínio consiste na divisão da área total de interesse em pequenos volumes de controle. A Figura 13 trata-se apenas uma ilustração, na realidade o a malha computacional do problema em estudo possui um número muito maior de volumes de controle.

Figura 13 - Malha unidimensional mostrando típico volume de controle.



Fonte: Fortuna (pag. 110, 2000).

Para os pontos internos, as equações válidas são obtidas discretizando a equação da energia, enquanto que para os pontos situados na fronteira externa e na interface A/B, as equações são obtidas da discretização das equações de balanço de energia nos volumes de controle envolvendo o ponto de fronteira e seus vizinhos.

3.2.1.1 Discretização das equações

A discretização pelo método dos volumes finitos da equação de energia, válida para todos os pontos situados dentro do domínio de interesse é feita como é mostrado a seguir.

$$\int_{w}^{e} \frac{d}{dx_{A,B}}\left(\frac{dT_A}{dx_A}\right)dx = 0 \tag{3.6}$$

$$\left(\frac{dT_A}{dx_A}\right)_e - \left(\frac{dT_A}{dx_A}\right)_w = 0 \tag{3.7}$$

$$\left(\frac{T_e - T_P}{\delta x_e}\right) - \left(\frac{T_P - T_w}{\delta x_w}\right) = 0 \tag{3.8}$$

Desenvolvendo a equação acima, temos:

$$T_e\left(\frac{1}{\delta x_e}\right)+T_w\left(\frac{1}{\delta x_w}\right)=T_p\left(\frac{1}{\delta x_e}+\frac{1}{\delta x_w}\right) \tag{3.9}$$

Fazendo as seguintes convenções,

$$A_e=\frac{1}{\delta x_e} \tag{3.10}$$

$$A_w=\frac{1}{\delta x_w} \tag{3.11}$$

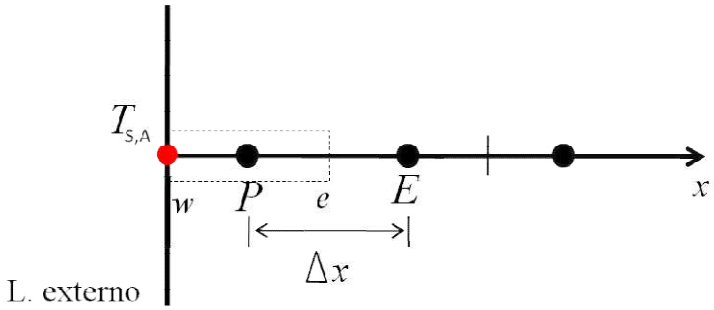
$$A_p=A_e+A_w \tag{3.12}$$

Encontramos a seguinte equação:

$$T_pA_p=T_eA_e+T_wA_w \tag{3.13}$$

- **Para nó próximo à Superfície Externa (Material A)**

Figura 14 - Nó próximo à superfície externa.



Autor: Autora (2016).

$$-k_A\frac{dT_A}{dx_A}=h_{ext}(T_{amb}-T_{S,A}) \tag{3.14}$$

$$-k_A\left(\frac{T_p-T_{S,A}}{\frac{\delta x_w}{2}}\right)=h_{ext}(T_{amb}-T_{S,A}) \tag{3.15}$$

$$T_{S,A}(2k_A + h_{ext}\delta x_w) = h_{ext}T_{amb}\delta x_w + 2k_A T_p \tag{3.16}$$

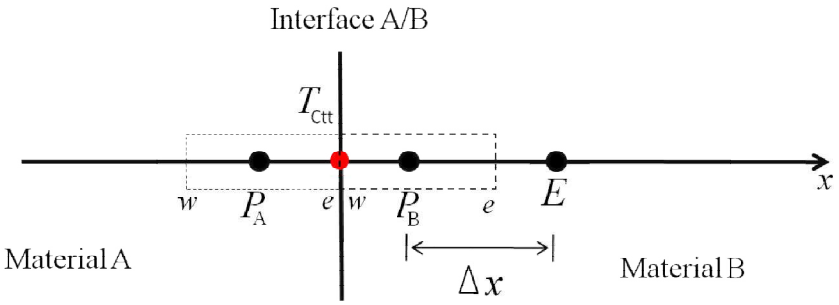
$$T_{S,A} = \frac{h_{ext}T_{amb}\delta x_w + 2k_A T_p}{2k_A + h_{ext}\delta x_w} \tag{3.17}$$

Através da Equação 3.17 determina-se a temperatura na superfície externa no material A. Para este trabalho, a temperatura ambiente, T_{amb}, foi considerada constante, igual a 30°C.

- **Interface**

A Figura 15 mostra os volumes de controle que estão envolvidos, diretamente, para a determinação da temperatura na interface de contato do material A com o material B.

Figura 15 - Nós próximos à interface de contato A/B.



Fonte: Autora (2016).

Na interface de contato dos materiais A e B, podemos utilizar a seguinte igualdade:

$$-k_A \frac{dT_A}{dx_A} = -k_B \frac{dT_B}{dx_B} \tag{3.18}$$

$$-k_A \left(\frac{T_{ctt} - T_{p,A}}{\frac{\delta x_e}{2}} \right) = -k_B \left(\frac{T_{p,B} - T_{ctt}}{\frac{\delta x_w}{2}} \right) \tag{3.19}$$

$$T_{ctt} - T_{p,A} = \frac{k_B}{k_A} \left(\frac{T_{p,B} - T_{ctt}}{\delta x_w} \right) \delta x_e \tag{3.20}$$

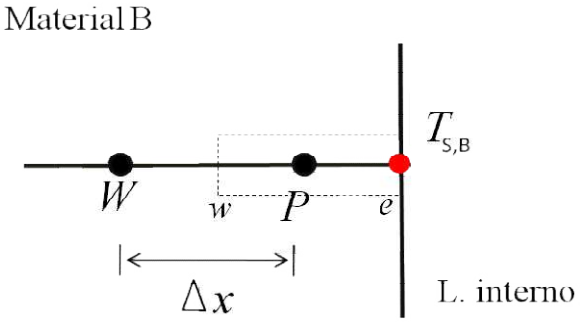
Chamando $\frac{k_B}{k_A} = k_{B,A}$,temos:

$$T_{ctt} = \frac{k_{B,A} T_{p,B} \delta x_e + T_{p,A} \delta x_w}{\delta x_w + k_{B,A} \delta x_e} \tag{3.21}$$

- **Superfície interna da parede (Material B)**

Para a superfície interna da parede (material B) foi considerado que a temperatura do ambiente interno era igual à temperatura da superfície da parede e ambas foram mantidas constantes e com valor especificado. A Figura 16 mostra um esquema onde podemos ver o ponto onde foi especificado a temperatura da superfície interna, $T_{S,B}$ (°C).

Figura 16 - Nó próximo à superfície interna da parede.



Fonte: Autora (2016).

Por fim, as equações discretizadas formam um sistema de equações que foram resolvidas simultaneamente para determinar o campo de temperatura no domínio formado pela parede composta.

3.3 Validação do modelo

De acordo com Ismail (2010), toda e qualquer implementação de um novo código computacional para a simulação numérica de um processo físico, requer antes a sua validação de modo a garantir que as futuras simulações com o mesmo sejam confiáveis. Diante disso, a validação do programa antes do seu uso extensivo é uma boa prática.

Existem diversas possibilidades para levar adiante a validação do programa numérico. Uma das formas como isto pode ser feito é comparando-se resultados de simulações com dados experimentais obtidos para este fim, e sob as mesmas condições geométricas e operacionais. Também podem ser usadas informações, numéricas ou experimentais disponibilizadas por outros autores ao respeito de problemas similares. Finalmente, simulações de casos simples que tenham solução analítica é outra possibilidade (ISMAIL, pag. 161, 2010).

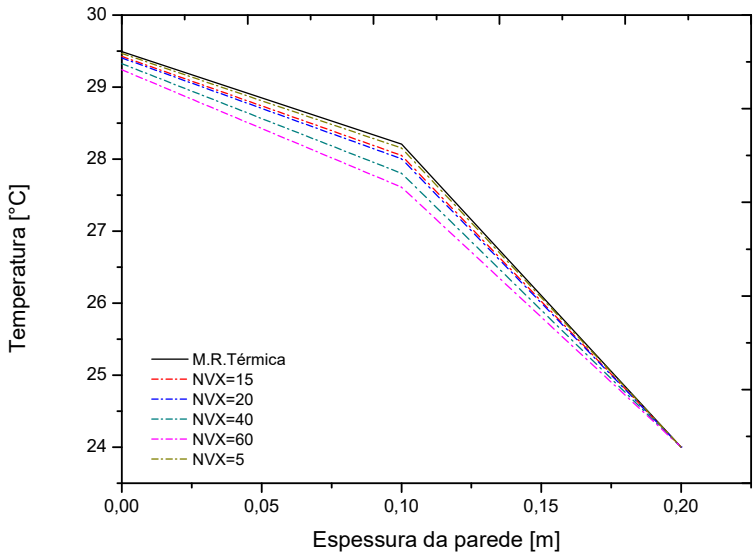
Seguindo o que foi dito, a validação deste código foi feita comparando-se resultados da simulação com soluções analíticas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos depois de se ter seguido os procedimentos necessários para a simulação do problema proposto são mostrados a seguir.

A Figura 17 mostra a comparação entre a distribuição de temperatura encontrada através do modelo de resistência térmica e a distribuição de temperatura encontrada a partir do modelo desenvolvido em MATLAB para diversos valores de NVX (número de volumes na direção x).

Figura 17 - Comparação dos valores de temperatura encontrados por meio do modelo de resistência térmica e o modelo desenvolvido em MATLAB.

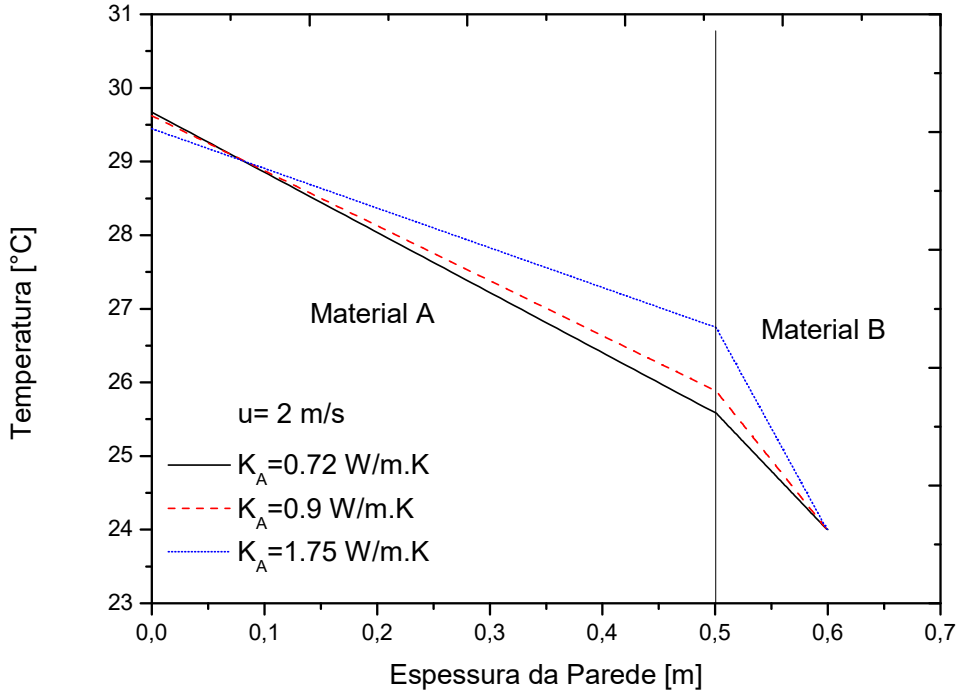


Fonte: Autora (2016).

Analisando o gráfico da Figura 17 e comparando os valores de temperatura encontrados utilizando-se o modelo de resistência térmica com os valores de temperatura encontrados através do código computacional desenvolvido, podemos dizer que se mostram mais próximos quando usamos os valores de número de volumes na direção x (NVX) variando de 5 a 20.

O gráfico da figura 18 mostra o resultado da comparação entre três simulações seguidas, nas quais foram mantidas constates a velocidade do vento, u= 2 m/s; a espessura da parede do material A, x_A= 0,5 m; a espessura da parede constituída pelo material B, x_B= 0,1 m, a condutividade térmica do material B, K_B= 0,22 W/m.K e fez-se variar os valores da condutividade térmica do material A, K_A (W/m.K).

Figura 18 - Influência da condutividade térmica do material A na temperatura da superfície externa.



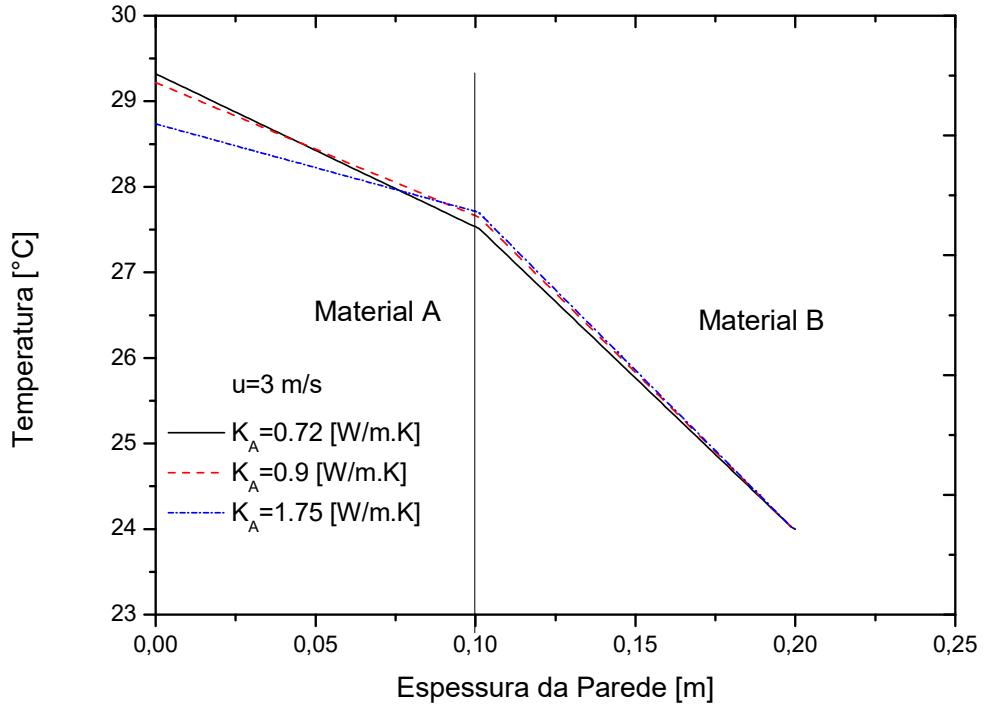
Fonte: Autora (2016).

Fazendo a análise do gráfico da figura 18, com base na equação 3.3, podemos afirmar que a temperatura em qualquer ponto da superfície externa é função de propriedades térmicas do material que a constitui e das condições convectivas ao seu entorno. As condições externas foram mantidas constantes durante a geração das três linhas mostradas no gráfico da Figura 18. Podemos, então, associar a variação temperatura observada na referida superfície à variação da condutividade térmica do material que a constitui. Nota-se no gráfico que a variação de temperatura, $T_p - T_{s,A}$, diminui à medida que se aumenta o valor da condutividade

térmica do material, ou seja, são valores inversamente proporcionais, mostrando o que, de fato, se esperava. No gráfico também é possível observar a variação da inclinação da reta em função da variação da condutividade térmica em que percebe-se um ângulo de inclinação maior para a reta em que se usou o menor valor de condutividade térmica (K = 0,72 W/m.K). Essas mesmas análises são feitas para o gráfico da Figura 19, que segue.

No gráfico da Figura 19, são mostrados os resultados de mais três simulações onde foram mantidas constantes a espessura do material A, x_A= 0,1 m, a espessura do material B, x_B= 0,1 m e a velocidade do vento, u = 3 m/s, e a condutividade térmica do material B, K_B= 0,22 W/m.K (valores diferentes dos que foram utilizados nas simulações que geraram o gráfico mostrado na Figura 18), fazendo-se variar apenas os valores da condutividade térmica do material A.

Figura 19 - Influência da condutividade térmica na temperatura da superfície externa.

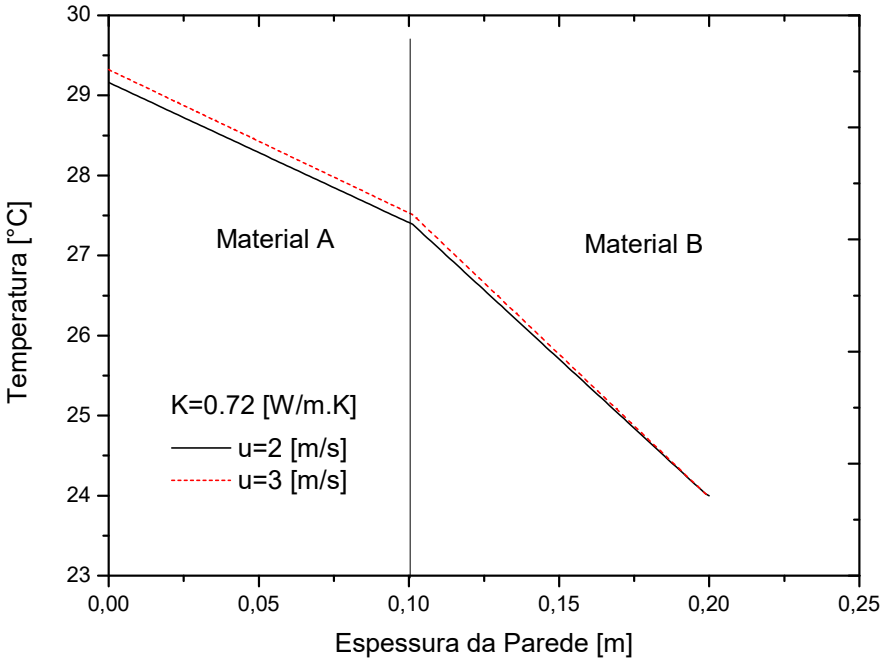


Fonte: Autora (2016).

No gráfico da Figura 20, temos a comparação entre as retas de distribuição de temperatura em duas condições diferentes. Uma para a velocidade do vento igual a 2 m/s e na

outra foi considerado uma velocidade igual a 3 m/s, como o objetivo nesse caso era verificar a influência da variação da velocidade do vento na temperatura da parede externa, todos os outros parâmetros (espessura das paredes A e B, condutividade térmica dos materiais A e B) foram mantidos iguais para as duas situações (situação 1, u= 2 m/s e situação 2, u= 3 m/s).

Figura 20 - Influência da velocidade do vento na temperatura da superfície externa.



Fonte: Autora (2016).

Com base na análise da Figura 20, podemos afirmar que houve uma variação na temperatura da superfície externa na parede (material A) em função, exclusivamente, da variação da velocidade do vento. Reforçando o resultado encontrado, Ismail (pag. 130, 2010) afirma que o coeficiente de transferência de calor por convecção, natural ou forçada, é uma forte função da velocidade do fluido. Podemos observar no gráfico que a temperatura na superfície é mais elevada para a condição em que a velocidade do vento é maior (3m/s) o que é perfeitamente justificado tomando como base a equação 2.3. Sabemos que a correlação (Equação 3.4) utilizada para a determinação do coeficiente convectivo relaciona-o à velocidade do vento, de modo que à medida em que se aumenta a velocidade do vento aumenta também o valor do coeficiente convectivo e que este é inversamente proporcional à

diferença de temperatura (T_{amb} - $T_{s,A}$) na superfície externa da parede A, ou seja quanto maior a velocidade do vento, *u*, maior será o valor do coeficiente convectivo, h_{ext} , e, consequentemente, menor a variação de temperatura, (T_{amb} - $T_{s,A}$).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O código computacional desenvolvido de acordo com a metodologia anteriormente citada pode ser facilmente alterado com características físicas de outros materiais e condições de contornos diferentes permitindo assim a predição da distribuição de temperaturas para nossos casos de simulação. Este trabalho limitou-se a aplicação do método dos volumes finitos a uma geometria simples e com malha de discretização ortogonal. Os resultados obtidos mostraram-se condizentes com as análises das equações que regem os mecanismos de transferência de calor relacionados a este trabalho.

Para o código computacional anteriormente citado, recomenda-se que sejam utilizados valores de NVX variando entre 5 e 20, pois foi para esse intervalo que os valores encontrados para temperatura mais se aproximaram daqueles encontrados através do modelo de resistência térmica. Destaca-se positivamente neste artigo o detalhamento de um código computacional mostrado no Apêndice A, como referência básica para elaboração de outras aplicações com maior grau de complexidade.

REFERÊNCIAS

BATCHELOR, G.K.; **An Introduction to Fluid Dynamics**. Cambridge University Press; 1967.

BECKETT, R. E.; CHU, S. C. **Finite Element Method Applied to Heat Conduction in Solids with Monlinear Boundary Conditions**. Journal of Heat Transfer, v. 95, p. 126-129, 1973.

BENNETT, Carrol., MYERS, John. **Fenômenos de transporte: quantidade de movimento, calor e massa**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1978.

BLASEK, J.; **Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications**; Elsevier; 2001.

BORTOLI, Á.L.; **Introdução à Dinâmica de Fluidos Computacional**. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS, 2000.

ÇENGEL, Yunas A.; CIMBALA, Jhon M. **Mecânica dos Fluidos Fundamentos e Aplicações**. 5ª ed. São Paulo, McGraw-Hill, 2006.

CHEN, H. T.; LIN, J. Y. **Application of the Hybrid Method to Transient Heat Conduction in One-Dimensional Composite Layers**. Computer & Structures, v. 39, n 5, p. 451-458, 1991.

CHWIF, L.; MEDINA, A.C. **Modelagem e simulação de eventos discretos: teoria e aplicações**. 2ª Edição. São Paulo, Editora dos Autores, 2007.

COSTA, E. C. D. **Física aplicada à construção: conforto térmico**. 2. ed. São Paulo: Blücher, 1974. 259 p.

DE SOUZA, R. M. **O Método dos Elementos Finitos Aplicado ao Problema de Condução de Calor**. Texto didático, NiCAE, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Belém, 2003.

FORTUNA, A. O. **Técnicas computacionais para dinâmica dos fluidos: Conceitos básicos e aplicação**. Edusp, São Paulo, 2000.

GONÇALVES, N. D. Ferreira. **Método dos Volumes Finitos em Malhas Não-Estruturadas**. Tese de mestrado, Departamento de Matemática Aplicada, Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2007.

HARREL, C.R.; GHOSH, B.K.; BOWDEN, R. **Simulation using Promodel**. McGraw-Hill, 2000.

HOLMAN, Jack Philip. **Transferência de calor**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1983.

INCROPERA, Frank P., DE WITT, David. **Fundamentos de transferência de calor e massa.** 4 ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1998.

INCROPERA, Frank P., DE WITT, David. **Fundamentos de transferência de calor e massa**. 6 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

ISMAIL, A.R KAMAL. **Janelas térmicas: modelagem e aplicação**. Departamento de Engenharia Térmica e de Fluidos. Campinas, SP, Ed. Do Autor, 2007.

KERN, Donald. **Processos de transmissão de calor**. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1980.

KREITH, Frank. **Princípios da transmissão de calor**. São Paulo: Edgard Blucher, 1973.

LAMBERTS, R; DUTRA, L; PEREIRA, F. **Eficiência Energética nas Edificações**. PW Editores. São Paulo, 1997. 188 p.

LAW, A.M.; KELTON, W. D. **Simulation modeling and analysis**. 3rd ed. McGraw-Hill, New York, 2000.

LI, Ronghua; CHEN, Zhongying; WU, Wei; **Generalized Difference Methods for Differential Equations – Numerical Analysis of Finite Volume Methods**; Marcel Dekker; 2000.

MALISKA, C. R.; **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional**. Rio de Janeiro: Ed. LTC – Livros Técnicos e Científicos, 1995.

MIDDLEMAN, Stanley. **An introduction to mass and heat transfer: principles of analysis and design**. New York: John Wiley, 1998.

MONTEVECHI, J.A.B.; COSTA, R.F. da S.; LEAL, F.; PINHO, A.F. de; MARINS, F.A.S. **Combined use of modeling techniques for the development of the conceptual model in simulation**. Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference, Miami, FL, USA, 2008.

MORAIS, Emerson Luiz de. **Verificação de soluções numéricas de escoamentos laminares obtidas com o método dos volumes finitos e malhas não-estruturadas**. Teses de Mestrado. Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná - Curitiba, 2004.

ORDENES, M; LAMBERTS,R; GÜTHS, S. **Transferência De Calor Na Envolvente Da Edificação**. 2008. 41 p. Departamento De Engenharia Civil . UFSC. Florianópolis. 2008.

ÖZISIK, M. N. **Transferência de Calor: um texto básico**. Guanabara: Rio de Janeiro, Brasil, 1990.

PATANKAR, Suhas V.; **Numerical Heat Transfer and Fluid Flow**; Hemisphere Publishing Corporation, 1980.

PITTS, D.; SISSOM, Leighton. **Fenômenos de transporte: transferência de calor, momento e massa**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1988.

RUPP, R. F. **Análise da Transferência de Calor em Paredes Compostas por Tijolos Maciços**. 2009. 119 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Civil) – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, 2009.

SILVA, J. P. S.; SILVA, D. O.; VIEIRA, L. G. M.; **Determinação de coeficientes convectivos de transferência de calor por meio das técnicas de fluidodinâmica computacional**, p. 6241-6248 . In: Anais do XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química - COBEQ 2014. São Paulo: Blucher, 2015.

SILVA, Remy Benedito. **Manual de termodinâmica e transmissão de calor**. 6 ed. São Paulo: Grêmio Politécnico,1980.

SUN, L.; JIA, L.; HUANG, L. **Numerical Temperature Prediction Model and Thermal Properties for Asphalt Pavement**. In: LOIZOS; SCARPAS; AL-QADI (Ed.). Advanced Characterisation of Pavement and Soil Engineering Materials. London: Taylor & Francis Group, 2007.

TEIXEIRA, M.B., BRANDÃO, S.C. **Trocadores de calor na indústria de alimentos**. Viçosa:UFV,1993.

THOMAS, Lindon C. **Fundamentos de transferência de calor**. Rio de Janeiro: Prentice-Hall do Brasil, 1980.

TU, Jiyuan; YEOH, Guan-Heng; LIU, Chaoqun. **Computacional Fluid Dynamics: A Practical Approach**. Second Edition, Waltham, USA, 2013.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics: the Finite Volume Method**. Pearson Education Limited: England, 2007.

WELTY, J. et al. **Fundamentals of Momentum, Heat and Mass Transfer**. 5th. ed. [s.l.] John Wiley & Sons, Inc., 2008.

APÊNDICE A - MODELO COMPUTACIONAL EM MATLAB

O código computacional para resolver o problema foi elaborado em Matlab® conforme listado a seguir.

```
%=================================================================
% ESTE PROGRAMA CALCULA A DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA EM UMA PLACA
% PLANA COMPOSTA, COM SUPERFICIE NA EXTREMIDADE ESQUERDA CONVECTIVA E
% NA EXTREMIDADE DIREITA TEMPERATURA ESPECIFICA.
% O PROBLEMA É DITO PERMANENTE E UNIDIMENSIONAL.
%=================================================================
clear all
clc
global DIFEA DIFWA DIFEB DIFWB AEA AWA APA AEB AWB APB Ta Tb Ta1 Tb1 a_a...
    b_a c_a d_a a_b b_b c_b d_b
%
%% DADOS DO PROBLEMA
%
% Entrada Geometrica
XLA = 0.1;         % Espessura da placa A[m]
XLB = 0.1;          % Espessura da placa B [m]
XL = XLA + XLB;

%
% Entrada Térmica do material A
%
u = 3;                  % velocidade média do vento [m/s]
Ka = 0.72;              % Condutividade térmica do material [W/m.K]
ha = 10+4.1*u;          % Coeficiente de pelicula [W/m².K]
Tinfa = 30;             % Temperatura infinita
%
% Entrada Térmica do material B
%
Tb = 24;          % Temperatura da parede do material B [°C]
Kb = 0.22;        % Condutividade térmica do tijolo cerâmico, oco, 1
furo[W/mK]
Kab = Ka/Kb;
Text = 24;
%
%% PARAMETRO COMPUTACIONAL
%
NITER = 500000; % Número de maximo de iterações
ERRO = 1E-4; % Critério de Convergencia
alfaT = 1.0;
%
%% QUANTIDADE DE VOLUME DE CONTROLE NA DIREÇÃO X
%
NVX = 80;
XAB = linspace(XLA,XL,NVX+2);
%
%% PARAMETRO QUE DETERMINA SE A MALHA É UNIFORME OU GEOMETRICA
%
RX = 1;
%
%% QUANTIDADE DE PONTOS NA DIREÇÃO X
%
[L1,L2,L3] = NUVCX (NVX);
%
%% GERA AS FACES DOS VOLUMES DE CONTROLE NO MATERIAL A E B
%
```

```
[XUA] = GRID2XA(XLA,NVX,RX,L1);
[XUB] = GRID2XB(XLB,NVX,RX,L1);
%
%% GERA OS PONTOS DA MALHA NA DIREÇÃO X NO MATERIAL A E B
%
[XA] = GRIDXA(XUA,L1);
[XB] = GRIDXB(XUB,L1);
%
%% CALCULA O COMPRIMENTO DO VOLUME DE CONTROLE E A DISTANCIA ENTRE
%  OS PONTOS DA MALHA
%
[DXA ,XVCA] = WIDTHGRIDXA(XA,XUA,L1);
[DXB ,XVCB] = WIDTHGRIDXB(XB,XUB,L1);
%
%% CALCULO DO TERMO DIFUSIVO DO MATERIAL A E B
%
for i=2:L2
    %% MATERIAL A
    DIFEA(i)= 1/DXA(i+1);
    DIFWA(i)= 1/DXA(i);
    %% MATERIAL B
    DIFEB(i)= 1/DXB(i+1);
    DIFWB(i)= 1/DXB(i);
end
%
%% CALCULO DOS COEFICIENTES DA MATRIZ
%
for i=2:L2
    %% MATERIAL A
    AEA(i)= DIFEA(i);
    AWA(i)= DIFWA(i);
    APA(i)= AEA(i)+AWA(i);
    %% MATERIAL B
    AEB(i)= DIFEB(i);
    AWB(i)= DIFWB(i);
    APB(i)= AEB(i)+AWB(i);
end
%
%% CONDIÇÃO DE CONTORNO E INICIAL
%
%   MATERIAL A e B
for i=2:L2
    Ta(i)= 0;
    Tb(i)= 0;
end
termo1 = DXA(2)*ha*Tinfa;
termo2 = Ka*Ta(2);
termo3 = DXA(2)*ha+Ka;
termo4 = Kab*DXB(2);
termo5 = DXA(L1);
termo6 = termo5+termo4;
%=========== CONDIÇÃO DE CONTORNO =============
Ta(1)= (termo1+termo2)/termo3;
Ta(L1) = ((termo4*Ta(L2))+termo5*Tb(2))/termo6;
Tb(1) = Ta(L1);
Tb(L1) = Text;
%
%% ATUALIZAÇÃO DA TEMPERATURA
%
for i=1:L1
    Ta1(i)=Ta(i); % nova iteração
```

```
    Tb1(i)=Tb(i); % nova iteração
end
%% INICIO DA SOLUÇÃO DO PROBLEMA
%
for ITER=1:NITER
%================ MATERIAL A =================
    for i=2:L2
        if i==2
            a_a(i)= APA(i);
            b_a(i)= AEA(i);
            c_a(i)= 0;
            d_a(i)= AWA(i)*Ta(i-1);
        elseif i==L2
            a_a(i)= APA(i);
            b_a(i)= 0;
            c_a(i)= AWA(i);
            d_a(i)= AEA(i)*Ta(i+1);
        else
            a_a(i)= APA(i);
            b_a(i)= AEA(i);
            c_a(i)= AWA(i);
            d_a(i)= 0;
        end
    end
%=============================================================
%    ALGORITMO DE THOMAS - TDMA
%=============================================================
%
[Ta1] = TDMA1D_A(a_a,b_a,c_a,d_a,L2);
%
termo1 = DXA(2)*ha*Tinfa;
termo2 = Ka*Ta(2);
termo3 = DXA(2)*ha+Ka;
Ta1(1)= (termo1+termo2)/termo3;
Ta1(L1) = ((termo4*Ta1(L2))+termo5*Tb1(2))/termo6;
%================= MATERIAL B ========================
    for i=2:L2
        if i==2
            a_b(i)= APB(i);
            b_b(i)= AEB(i);
            c_b(i)= 0;
            d_b(i)= AWB(i)*Tb(i-1);
        elseif i==L2
            a_b(i)= APB(i);
            b_b(i)= 0;
            c_b(i)= AWB(i);
            d_b(i)= AEB(i)*Tb(i+1);
        else
            a_b(i)= APB(i);
            b_b(i)= AEB(i);
            c_b(i)= AWB(i);
            d_b(i)= 0;
        end
    end
%=============================================================
%    ALGORITMO DE THOMAS - TDMA
%=============================================================
%
[Tb1] = TDMA1D_B(a_b,b_b,c_b,d_b,L2);
%
termo4 = Kab*DXB(2);
```

```
termo5 = DXA(L1);
termo6 = termo5+termo4;
Tb1(1) = Ta1(L1);
Tb1(L1) = Text;
for i=1:L1
    Ta1(i)= alfaT*Ta1(i)+(1-alfaT)*Ta(i);
    Tb1(i)= alfaT*Tb1(i)+(1-alfaT)*Tb(i);
end
%-----------------------------------------------------------
%               CRITERIO DE PARADA
%-----------------------------------------------------------
erroTa= abs((Ta(i)-Ta1(i))/Ta(i));
erroTb= abs((Tb(i)-Tb1(i))/Tb(i));
if erroTa<=ERRO
   break
end
%-------------------------------------------------------------
%       CONDIÇÃO DE CONTORNO E ATUALIZAÇÃO DA VARIAVEL
%-------------------------------------------------------------
%
for i=1:L1
    Ta(i)= Ta1(i);
    Tb(i)= Tb1(i);
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    Iter=ITER+1;
    fprintf(' %2d       %8.4e\n',ITER, erroTa);
end
%% PÓS-PROCESSAMENTO - SAIDA DOS RESULTADOS
%
plot(XA,Ta,'k',XAB,Tb,'r','LineWidth',2);
xlabel('Distancia  x (m)')
ylabel('Temperatura (°C)')
X1 = XA';
X2 = XAB';
T1 = Ta';
T2 = Tb';
```