

R

CONSULTA
FD-3585
Ed.rev.

São Paulo
2003

Dissertação apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para obtenção
do Título de Mestre em Engenharia.

**EFEITOS TÉRMICOS DA INCIDÊNCIA DE RADIAÇÃO
ELETROMAGNÉTICA EM SUPERFÍCIES REVESTIDAS
DE COMPOSITO EPÓXI-FERRITA**

MÁRIO RODRIGUEZ AMIGO

MÁRIO RODRIGUEZ AMIGO

**EFEITOS TÉRMICOS DA INCIDÊNCIA DE RADIAÇÃO
ELETROMAGNÉTICA EM SUPERFÍCIES REVESTIDAS
DE COMPOSITO EPOXI-FERRITA**

Dissertação apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para obtenção
do Título de Mestre em Engenharia.

Área de concentração:
Engenharia Mecânica

Orientador:

Prof. Dr. José Roberto Simões Moreira

São Paulo

2003

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, por terem colaborado para que eu pudesse sonhar e me tornar um homem livre, por terem dedicado grande parte de suas vidas em prol do meu bem estar, por nunca terem sido egoístas ao compreender as leis naturais da vida.

Ao professor Simões, por ter me orientado, ensinado, e, também, ter sido responsável por parte de minha formação pessoal e profissional.

Aos colegas do laboratório SISBA e da EPUSP, em especial a Edvaldo Ângelo e Fernando Dotta por terem colaborado e estarem sempre disponíveis a me ajudar.

Ao professor Migliano, por sua valiosa colaboração e cooperação que possibilitaram a realização deste trabalho.

Ao professor Marcos Pimenta, por ter possibilitado o enriquecimento de meus conhecimentos, ensinando-me que o bom crítico é sábio em agregar idéias.

A Sra. Regina, por dispor de seu tempo para corrigir a redação deste trabalho. A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro.

São Paulo, novembro de 2003.

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo analisar o comportamento térmico de uma placa composta por um substrato, que pode ser um material metálico ou um termoplástico, coberto por uma camada de epóxi-ferrita que se caracteriza por absorver radiações eletromagnéticas. Estes revestimentos são utilizados como supressores de interferências eletromagnéticas em sistemas eletrônicos, como blindagens em antenas e em diversas outras aplicações civis e militares. A absorção da radiação não-ionizante promove o aquecimento no material absorvedor, modificando, assim, a distribuição de temperatura na placa. Para analisar este efeito, foi realizada a solução numérica da equação do calor para simular diferentes situações de utilização desses materiais, aproximando-se, ao máximo, de casos reais de emprego. Na modelagem numérica foi utilizado o método das diferenças finitas, amplamente empregado em problemas de transferência de calor. Diferentes condições de contorno de convecção, de radiação eletromagnética e térmica foram empregadas. O tratamento da interface do composto epóxi-ferrita com o substrato foi feito através do conceito da resistência térmica de contato. Entender quais são os parâmetros que efetivamente poderiam influenciar nessa distribuição, ou seja, que tipo de efeitos no campo térmico poderiam ser obtidos variando-se valores da resistência térmica de contato e das propriedades térmicas de diferentes materiais de substrato, foi outro objetivo proposto e analisado por este trabalho.

De acordo com os resultados obtidos, verificou-se que para aplicações em que se deseja aumentar a temperatura na superfície do composto absorvedor mantido o valor de irradiação eletromagnética, o arranjo de elevada resistência de contato aliado a um substrato que se caracterize por ter baixa condutividade térmica, mostrou-se mais eficiente. Este aquecimento deve sempre estar abaixo do limite imposto pela restrição da temperatura de Curie, já que nesta temperatura a ferrita deixa de absorver a radiação eletromagnética incidente. Quando se deseja reduzir a temperatura na superfície do composto, o arranjo de baixa resistência térmica de contato aliado a um substrato de elevada condutividade térmica se mostrou a configuração correta. Estes resultados são

pertinentes desde que a potência de radiação seja suficientemente elevada para que o mecanismo de aquecimento, devido à absorção eletromagnética, promova um aumento de temperatura perceptível.

ABSTRACT

This work has the goal of analyzing the thermal behavior of a plate composed by a substrate, which can be a metal or a thermoplastic, coated with a plain film of epoxy-ferrite composite that is characterized by absorbing electromagnetic radiation. These coverings are used as electronic noise suppressors in embarked electronic systems, as antenna shields and in several other civil and military applications. The non-ionizing radiation absorption promotes the heating of the absorbing material, which diffuses into the plate. To analyze this effect, a numerical solution was carried out to simulate different types for practical applications of these materials. The numerical method of finite differences was used to solve the heat equation. Different boundary conditions such as electromagnetic and thermal radiation, constant temperature and heat convection were used. The interfacial region between the composite and the substrate was analyzed using the concept of thermal contact resistance. In order to understand which are the parameters that could influence the plate heating and the temperature distribution, several values of the thermal contact resistance in combination with the thermal properties of different substrates were studied.

It was verified that in applications in which one wants to have a high surface temperature of the absorbing composite, an arrangement of a high contact resistance in combination with a low conductivity substrate should be used. However, the temperature should not be above the limit imposed by the temperature of Curie, because above this temperature, the ferrite stops absorbing electromagnetic radiation. On the other hand, when it is desired to reduce the composite surface temperature, the arrangement with a low thermal contact resistance coated on a high thermal conductivity substrate, is the correct configuration. These results are pertinent if the radiation power is sufficiently high to promote a measurable composite heating.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO	ii
ABSTRACT	iv
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	xv
LISTA DE ABREVIACOES	xvii
LISTA DE SIMBOLOS	xviii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Apresentação e Revisão Bibliográfica	1
1.2 Objetivos	9
1.3 Divisão da Dissertação	10
2. CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL	12
2.1 Materiais Magnéticos	12
2.1.1 Ferrita	13
2.1.2 Processos de obtenção das misturas das ferritas	15
2.1.3 Propriedades relevantes das ferritas	18
2.2 Composição da Resina Epóxi	18
2.3 Propriedades Finais do Composito	19
2.4 Temperatura de Curte	22
3. TEORIA DOS MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR APLICADOS AO MODELO	25
3.1 Absorção das Ondas Eletromagnéticas	25
3.1.1 Radiações Eletromagnéticas	27
3.1.2 Comportamento de absorção do composito epóxi-ferrita	29
3.1.3 Modelagem da absorção para o Método da Capacitância Global	31
3.2 Equação da Difusão de Calor	33
3.3 Convecção	35
3.4 Radiação Térmica	36
3.5 Resistência Térmica De Contato	39
3.6 Descrição do Problema	42

44	4. MODELAGEM NUMÉRICA
44	4.1 Discretização
45	4.2 Método de Solução
45	4.2.1 Discretização no composto
45	4.2.2 Discretização no substrato
53	4.3 Critério de Estabilidade
68	4.4 Acoplamento do Tempo
70	4.4 Acoplamento do Tempo
73	5. ESTUDO DOS CASOS
73	5.1 Escolha dos Parâmetros de Simulação
74	5.2 Microondas
80	5.3 Limite Ocupacional ANATEL
84	5.4 Radares (RCS)
88	5.5 Estudo da Malha
90	6. RESULTADOS E DISCUSSÕES
90	6.1 Resultados e Sugestões para Aplicações em Microondas
90	6.1.1 Resultados
90	6.1.1.1 Situação padrão de simulação
90	6.1.1.2 Convecção forçada
93	6.1.1.3 Elevada resistência de contato
94	6.1.1.4 Baixa resistência de contato
95	6.1.1.5 Substrato com espessura de 5 mm
96	6.1.1.6 Substrato com espessura de 10 mm
97	6.1.1.7 Substrato de aço carbono
98	6.1.1.8 Substrato de acrílica-butadieno-estireno (ABS)
99	6.1.2 Análise dos resultados para aplicação em Microondas
100	6.2 Resultados e Sugestões para Limite ANATEL
101	6.2.1 Resultados
101	6.2.1.1 Situação padrão de simulação
103	6.2.1.2 Elevada resistência de contato
103	6.2.1.3 Baixa resistência de contato
103	6.2.1.4 Substrato de aço carbono
104	6.2.1.5 Substrato de acrílica-butadieno-estireno (ABS)
105	6.2.2 Análise dos resultados para o limite ocupacional ANATEL
106	6.3 Resultados e Sugestões para Radares (RCS)
107	6.3.1 Resultados
107	6.3.2 Análise dos resultados para aplicação em radares (RCS)
109	6.3.2 Análise dos resultados para aplicação em radares (RCS)

114	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS
112	7.2 Continuidade do Trabalho
111	7.1 Conclusões
110	7. CONCLUSÕES E CONTINUIDADE DO TRABALHO

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.1 - Comparação entre modelos teóricos e experimentais na medição da SAR em pessoas expostas a várias frequências (Gandhi, 1990)..... 4
- Figura 1.2 - Manta absorvedora composta por epóxi-ferrita (Migliano, 2000)..... 8
- Figura 2.1 - Célula unitária da estrutura spinélio(Von Aulock,1965)..... 14
- Figura 2.2 - Moimho de bolas para a mistura do pó (Freitas, 2001)..... 15
- Figura 2.3 - Amostra da ferrita após o descarregamento e a penetração (Freitas, 2001)..... 16
- Figura 2.4 - Micronizador de partículas (Freitas, 2001)..... 16
- Figura 2.5 - Representação gráfica do processo de sinterização..... 17
- Figura 2.6 - Produto final do pó de ferrita (Freitas, 2001)..... 17
- Figura 2.7 - Variação da permeabilidade inicial com a temperatura, para ferritas $Mn_{0,48}Zn_{0,47}Fe_{2,05}O_4$ após os seguintes tratamentos: a) 4h a 1320°C, $P_{O_2} = 2$ Torr.b) 4h a 1320°C, $P_{O_2} = 2 \times 10^{-2}$ Torr c) o mesmo, removendo a camada superficial (Vogler, 1971)..... 23
- Figura 2.8 - Temperatura de Curie de ferritas Ni-Zn que foram sinterizadas a 1400°C (Heck, 1974)..... 24
- Figura 3.1 - Representação de uma onda eletromagnética..... 26

Figura 3.2 - Desenho esquemático do balanço de energia proveniente de radiação eletromagnética que incide sobre uma placa..... 26

Figura 3.3 - Esquema da instrumentação utilizada (Migliano e Freitas, 2002)..... 28

Figura 3.4 - Gráfico da intensidade de potência irradiada (Migliano e Freitas, 2002)..... 29

Figura 3.5 - Gráfico do coeficiente de absorção α_a em função da frequência com os dados obtidos pelo experimento de Migliano e Freitas (2002)..... 30

Figura 3.6 - Ilustração da simplificação proposta pelo Método da Capacitância Global. A camada de composto com uma determinada espessura se reduz a uma superfície em que as ondas eletromagnéticas são absorvidas..... 33

Figura 3.7 - Volume de controle infinitesimal para os balanços de energia..... 34

Figura 3.8 - A cavidade com duas superfícies (placa e meio externo). (a) Diagrama esquemático. (b) Representação pelo circuito equivalente..... 36

Figura 3.9 - Ilustração da interface de dois materiais. A condução de calor se dá, sobretudo por condução onde os picos se tocam..... 40

Figura 3.10 - Detalhe ampliado da região de contato entre dois materiais distintos (Gebhart, 1993)..... 41

42 Desenho esquemático do fenômeno físico de transferência de calor sobre a placa.

44 Figura 4.1 - Discretização de uma placa plana.

45 Figura 4.2 - Representação gráfica do balanço energético nos nós internos situados na face superior da placa onde se localiza o composto.....

47 Figura 4.3 - Representação gráfica do balanço energético nos nós situados na aresta frontal da placa onde se localiza o composto.....

50 Figura 4.4 - Representação gráfica do balanço energético no nó situado no vértice frontal esquerdo da placa onde se localiza o composto.

53 Figura 4.5 - Representação gráfica do balanço energético nos nós situados à face superior do substrato.....

55 Figura 4.6 - Representação gráfica do balanço energético nos nós situados na aresta superior frontal do substrato.

58 Figura 4.7 - Representação gráfica do balanço energético no nó situado no vértice frontal esquerdo do substrato.....

67 Figura 4.8 - Representação gráfica do balanço energético nos nós situados no interior da placa de alumínio.....

70 Figura 4.9 - Representação gráfica da convergência de um ponto ao centro da placa do composto e outro ao centro do substrato para o sistema desacoplado.....

Figura 4.10 - Representação gráfica da convergência de um ponto ao centro da placa do composto e outro ao centro do substrato para o sistema acoplado. 71

Figura 5.1 - Representação esquemática do fenômeno físico de absorção eletromagnética em fornos microondas. 75

Figura 5.2 - Gráfico do coeficiente de absorção em função da frequência (1-3,5 GHz). 76

Figura 5.3 - Representação esquemática do fenômeno físico de absorção eletromagnética em aparelhos de telefonia celular. 81

Figura 5.4 - Representação esquemática do fenômeno físico de absorção eletromagnética em radares. 84

Figura 5.5 - Gráfico do coeficiente de absorção em função da frequência (1-15 GHz). 85

Figura 5.6 - Gráfico da Diferença percentual da temperatura de dois pontos em função do refinamento da malha. O primeiro ponto se localiza no centro do composto e o segundo, no centro do substrato. 89

Figura 6.1 - Campo de temperaturas do substrato coberto pelo composto (substrato de alumínio, $e = 3$ mm, $\text{grad} = 2$ W/cm², $h = 10$ W/m²K, $R_{t,c} = 6,64 \times 10^{-4}$ m²K/W). 91

- 91 Vista em corte vertical da camada central do arranjo da
 Figura 6.2 - $10 \text{ W/m}^2\text{K}$, $R_{lc} = 6,64 \times 10^{-4} \text{ m}^2\text{K/W}$
- 92 Distribuição de temperatura no eixo central da placa para
 a situação padrão de simulação ($X=Y=0,15 \text{ m}$) (substrato
 de alumínio, $e = 3 \text{ mm}$, $q_{rad} = 2 \text{ W/cm}^2$, $h = 10 \text{ W/m}^2\text{K}$,
 $R_{lc} = 6,64 \times 10^{-4} \text{ m}^2\text{K/W}$).....
- 93 Distribuição de temperatura no eixo central da placa para
 a situação de convecção forçada ($X=Y=0,15 \text{ m}$) (substrato
 de alumínio, $e = 3 \text{ mm}$, $q_{rad} = 2 \text{ W/cm}^2$, $h = 40 \text{ W/m}^2\text{K}$,
 $R_{lc} = 6,64 \times 10^{-4} \text{ m}^2\text{K/W}$).....
- 94 Distribuição de temperatura no eixo central da placa para
 a situação de elevada resistência de contato ($X=Y=0,15 \text{ m}$)
 (substrato de alumínio, $e = 3 \text{ mm}$, $q_{rad} = 2 \text{ W/cm}^2$,
 $h = 10 \text{ W/m}^2\text{K}$, $R_{lc} = 5 \times 10^{-3} \text{ m}^2\text{K/W}$).....
- 95 Distribuição de temperatura no eixo central da placa para
 a situação de baixa resistência de contato ($X=Y=0,15 \text{ m}$)
 (substrato de alumínio, $e = 3 \text{ mm}$, $q_{rad} = 2 \text{ W/cm}^2$, $h =$
 $10 \text{ W/m}^2\text{K}$, $R_{lc} = 5 \times 10^{-5} \text{ m}^2\text{K/W}$).....
- 96 Distribuição de temperatura no eixo central da placa para
 a situação de substrato com espessura de 5 mm
 ($X=Y=0,15 \text{ m}$) (substrato de alumínio, $e = 5 \text{ mm}$, $q_{rad} =$
 2 W/cm^2 , $h = 10 \text{ W/m}^2\text{K}$, $R_{lc} = 6,64 \times 10^{-4} \text{ m}^2\text{K/W}$).....
- 97 - Figura 6.7 -

- 97 - Distribuição de temperatura no eixo central da placa para a situação de substrato com espessura de 10 mm ($X=Y=0,15$ m) (substrato de alumínio, $e = 10$ mm, $q_{rad} = 2$ W/cm², $h = 10$ W/m²K, $R_{tc} = 6,64 \times 10^{-4}$ m²K/W).....
- 98 - Distribuição de temperatura no eixo central da placa para a situação de substrato de aço carbono ($X=Y=0,15$ m) (substrato de aço, $e = 3$ mm, $q_{rad} = 2$ W/cm², $h = 10$ W/m²K, $R_{tc} = 6,64 \times 10^{-4}$ m²K/W).....
- 99 - Distribuição de temperatura no eixo central da placa para a situação de substrato de ABS ($X=Y=0,15$ m) (substrato de ABS, $e = 3$ mm, $q_{rad} = 2$ W/cm², $h = 10$ W/m²K, $R_{tc} = 6,64 \times 10^{-4}$ m²K/W).....
- 101 - Campo de temperaturas do substrato e composto (substrato de alumínio, $e = 3$ mm, $q_{rad} = 50$ W/m², $h = 10$ W/m²K, $R_{tc} = 6,64 \times 10^{-4}$ m²K/W).....
- 102 - Vista em corte vertical da camada central, para a cota X constante e equivalente a 0,15 m (substrato de alumínio, $e = 3$ mm, $q_{rad} = 50$ W/m², $h = 10$ W/m²K, $R_{tc} = 6,64 \times 10^{-4}$ m²K/W).....
- 103 - Distribuição de temperatura no eixo central da placa para a situação de elevada resistência de contato ($X=Y=0,15$ m) (substrato de alumínio, $e = 3$ mm, $q_{rad} = 50$ W/m², $h = 10$ W/m²K, $R_{tc} = 5 \times 10^{-3}$ m²K/W).....

- 104 10 W/m²K, $R_{t,c} = 5 \times 10^{-5} \text{ m}^2\text{K/W}$),
 (substrato de alumínio, $e = 3 \text{ mm}$, $q_{rad} = 50 \text{ W/m}^2$, $h =$
 a situação de baixa resistência de contato ($X=Y=0,15 \text{ m}$)
Figura 6.14 - Distribuição de temperatura no eixo central da placa para
- 105 10 W/m²K, $R_{t,c} = 6,64 \times 10^{-4} \text{ m}^2\text{K/W}$),
 (substrato de aço, $e = 3 \text{ mm}$, $q_{rad} = 50 \text{ W/m}^2$, $h =$
 a situação de substrato de aço carbono ($X=Y=0,15 \text{ m}$)
Figura 6.15 - Distribuição de temperatura no eixo central da placa para
- 106 10 W/m²K, $R_{t,c} = 6,64 \times 10^{-4} \text{ m}^2\text{K/W}$),
 (substrato de ABS, $e = 3 \text{ mm}$, $q_{rad} = 50 \text{ W/m}^2$, $h =$
 para a situação de substrato de ABS ($X=Y=0,15 \text{ m}$)
Figura 6.16 - Distribuição de temperatura no eixo central da placa
- 107 $R_{t,c} = 6,64 \times 10^{-4} \text{ m}^2\text{K/W}$),
 de alumínio, $e = 3 \text{ mm}$, $q_{rad} = 0,05 \text{ W/m}^2$, $h = 40 \text{ W/m}^2\text{K}$,
 a situação padrão de simulação ($X=Y=0,15 \text{ m}$) (substrato
Figura 6.17 - Distribuição de temperatura no eixo central da placa para
- 108 0,05 W/m², $h = 40 \text{ W/m}^2\text{K}$, $R_{t,c} = 5 \times 10^{-3} \text{ m}^2\text{K/W}$),
 0,15 m) (substrato de alumínio, $e = 3 \text{ mm}$, $q_{rad} =$
 a situação de elevada resistência de contato ($X=Y=$
Figura 6.18 - Distribuição de temperatura no eixo central da placa para
- 109 40 W/m²K, $R_{t,c} = 6,64 \times 10^{-4} \text{ m}^2\text{K/W}$),
 (substrato de aço, $e = 3 \text{ mm}$, $q_{rad} = 0,05 \text{ W/m}^2$, $h =$
 a situação de substrato de aço carbono ($X=Y=0,15 \text{ m}$)
Figura 6.19 - Distribuição de temperatura no eixo central da placa para

LISTA DE TABELAS

5	Limites de Exposição Ocupacional a Campos Eletromagnéticos (IRPA – ICNIRP).....
6	Limites de Exposição ao Público a Campos Eletromagnéticos (IRPA-ICNIRP).....
13	Características e classes de materiais magnéticos (Lovel e outros, 1976).....
14	Sumário dos tipos de estruturas das ferritas. (Buchaman e Reynolds, 1991).....
18	Propriedades termofísicas da mistura de ferritas por autor.....
18	Tabela 2.4 – Composição e características das resinas (CIBA).....
19	Tabela 2.5 – Propriedades termofísicas da mistura da resina final.....
19	Tabela 2.6 – Propriedades termofísicas do compósito.....
21	Tabela 2.7 – Propriedades termofísicas do compósito para um β de 0,186.....
73	Tabela 5.1 – Grandezas e condições de contorno empregadas nas simulações.....
77	Tabela 5.2 – Propriedades e condições de contorno para a situação padrão (microondas).....

78	Propriedades termofísicas de diferentes substratos (Van Vlaak, 1970) e (Bolton, 1998).....
79	Simulações Propostas para a Faixa de frequência das microondas (1-3,5 GHz).....
82	Propriedades e condições de contorno para a condição padrão (limite AnateI).....
83	Simulações Propostas para o limite ocupacional proposto pela ANATEL (1-2,5 GHz).....
86	Propriedades e condições de contorno para a condição padrão (radar).....
87	Simulações Propostas para a faixa de frequência de radares (1-15 GHz).....

LISTA DE ABREVIACÕES

ABS	Acrinolitrila-butadieno-estireno
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
CM1	Camada Fina de Composito
CM2	Camada Final de Composito
CTA	Centro Técnico Aeroespacial
ICNIRP	Proteção Contra Radiações Não-Ionizantes
INIRC	Comité Internacional de Radiação Não-Ionizante
IRPA	Associação Internacional de Proteção à Radiação
Me	Metal de transição bivalente
RCS	Radar Cross Section
RF	Radiofrequência
SAR	Specific Absorption Rate
WC	Sem Cobertura de Composito

LISTA DE SIMBOLOS

A	Area de troca de calor
Bi	Numero de Biot
C_p	Calor especifico a pressao constante
E	Campo elétrico interno
f	Frequência
F	Fator de forma
$ Fo$	Numero de Fourier
h	Coefficiente de transferência de calor por convecção
h_r	Coefficiente de transferência de calor por troca radiante
H	Campo Magnético
I	Irradiação
I_a	Irradiação absorvida
I_o	Irradiação incidente
I_r	Irradiação refletida
I_t	Irradiação transmitida
k	Condutividade térmica
L	Comprimento característico
M_E	Massa de epóxi
M_{FE}	Massa de ferrita

M_T	Massa total do composto
P_A	Potência absorvida pela de circuito
$P_{I(CM2)}$	Potência irradiada pela de circuito com a camada final de epóxi
$P_{I(WC)}$	Potência irradiada pela de circuito em vazio
$q_{ger}^{\#}$	Taxa de energia térmica gerada
q_{rad}	Calor trocado por radiação térmica
R_r	Resistência total a troca de radiação térmica
$R_{i,c}$	Resistência térmica de contato
S	Vetor de Poynting
T_{ext}	Temperatura absoluta do meio externo
T_{sup}	Temperatura absoluta da superfície
T_{∞}	Temperatura absoluta do fluido
T	Temperatura absoluta
V_E	Volume do epóxi
V_{FE}	Volume da ferrita
V_T	Volume total do composto
α_A	Coefficiente de absorção
α_v	Coefficiente de absorção
β	Porcentagem em fração volumétrica de ferrita
ϵ	Emissividade total hemisférica
γ	Porcentagem em massa de ferrita

Conductividade elétrica do material	η
Difusividade térmica	λ
Permeabilidade magnética	μ
Massa específica	ρ
Massa específica do epóxi	ρ_E
Massa específica da ferrita	ρ_{FE}
Massa específica da mistura epóxi-ferrita	ρ
Constante de Stefan-Boltzman	σ
Poder emissivo total	ξ
Variação do tempo por passo de integração	Δt
Salto de temperatura devido na interface de materiais	ΔT_c
Subscritos:	
Propriedades referentes ao composto	A
Propriedades referentes ao substrato	B
Propriedades referentes à placa como um todo	I
Propriedades referentes ao meio externo	2

1 INTRODUÇÃO

O capítulo introdutório apresenta o problema em estudo proposto por este trabalho. Uma revisão bibliográfica dos pontos mais relevantes é feita em conjunto com a motivação, expondo o interesse e os esforços que vêm sendo realizados para conhecer melhor o comportamento de materiais que absorvem radiações eletromagnéticas. Posteriormente são apresentados os objetivos do trabalho e a divisão utilizada neste trabalho.

1.1 Apresentação e Revisão Bibliográfica

A busca por materiais que apresentem características de blindagens eletromagnéticas vem se apresentando como uma nova preocupação mundial. Isto se deve ao fato do crescente aumento de equipamentos emissores de ondas eletromagnéticas e, conseqüentemente, a adoção de normas mais rígidas para a sua utilização. Pode-se encontrar diversas aplicações para estes materiais nas indústrias eletroeletrônicas, nas telecomunicações e na aeronáutica. A influência da radiação não se resume apenas às interferências em equipamentos eletrônicos, mas também às alterações em tecidos biológicos, como muitos estudos vêm comprovando ao longo das últimas três décadas. Pesquisas demonstraram alterações comportamentais (D'Andrea, 1991) e biológicas (Cleary, 1987; Adair, 1987 e Lin, 1980) em homens e animais devido à absorção de energia eletromagnética principalmente na faixa das microondas (Gandhi, 1990).

A poluição eletromagnética causada por antenas de celulares, televisão, equipamentos eletroeletrônicos e fornos microondas se localiza na faixa de não-ionizante. Isto significa que a energia emitida não é forte suficiente para produzir ions em sua passagem pela matéria, ou seja, é incapaz de remover elétrons de átomos e moléculas. A energia necessária para fazer com que um elétron de valência escape de sua órbita num átomo, varia de 2,5 a 25 eV ($1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$) dependendo do elemento.

interna específica) devido ao efeito térmico, dado pela Eq. 1.2.

A SAR é diretamente proporcional ao aumento local de temperatura (energia

ρ é a massa específica [kg/m³].

E é o campo elétrico interno [V/m] e

η é a condutividade elétrica do material [S/m].

onde:

$$SAR = \frac{\eta E^2}{2\rho}, \quad (1.1)$$

Eq. 1.1.

grandeza representa a taxa de potência absorvida por unidade de massa sendo dado pela (SAR), foi definida como um parâmetro de exposição de radiações eletromagnéticas. Esta e conceito de taxa de absorção específica, ou, em inglês, "Specific Absorption Rate" padrões mais sofisticados foram criados para relacionar a quantidade de RF absorvida e Com o desenvolvimento do conhecimento da dosimetria de radiofrequência (RF),

eletromagnética externa (Carrington e McLachlan, 1967).

estados energéticos dos átomos devido à absorção de fótons provenientes dessa radiação frequência de excitação eletromagnética externa, e o outro, pela transição entre dois primeiro se dá pela movimentação dos domínios magnéticos do material devido à composto em estudo neste trabalho utilizado como blindagem eletromagnética. O entre os campos eletromagnéticos e os materiais magnéticos, como é o caso do observável. Esta transferência se dá através de dois mecanismos básicos de interação desprezível, mas, acima destes valores, o aumento da temperatura é facilmente frequências inferiores a 100 kHz resulta, normalmente, em absorção de energia elétrico para as cargas do material. A exposição a campos eletromagnéticos com com o aquecimento de materiais como resultado da transferência da energia do campo encontrar o espectro das microondas e da radiofrequência. Seu principal efeito é térmico radiações cujo comprimento de onda λ são maiores que 200 nm em que se pode 10 eV, são chamadas de radiações não-ionizantes. Nesta faixa se apresentam as De um modo geral, radiações eletromagnéticas que possuam energia menores que

sendo:

$$SAR = C_p \frac{dT}{dt}, \quad (1.2)$$

T a temperatura [K] e

C_p o calor específico do material [W/kg K].

A SAR média e a distribuição da SAR, podem ser computadas ou estimadas a partir de medidas em laboratório. Seus valores dependem dos seguintes fatores:

- Parâmetros do campo incidente como: frequência, intensidade, polarização e configuração da fonte-objeto (campo próximo ou distante);
- Características do corpo exposto como: tamanho, geometria e propriedades dielétricas;
- Efeitos de aterramento e de reflexão de outros objetos no campo próximo ao corpo exposto.

Com respeito à absorção da energia pelo corpo humano, os campos eletromagnéticos podem ser divididos em quatro faixas (Durney e outros, 1985).

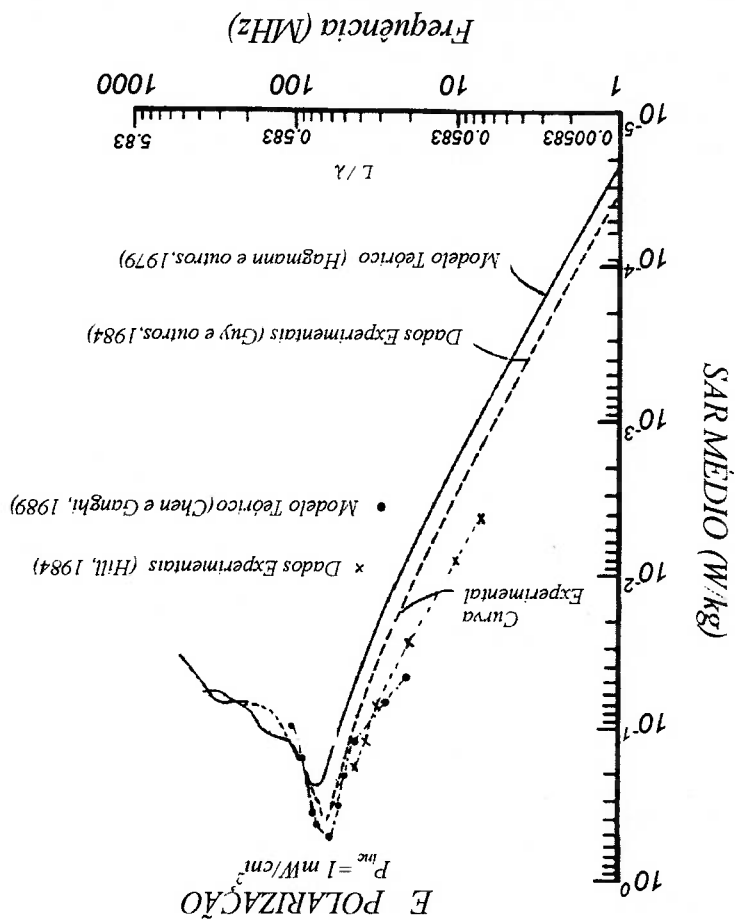
- Frequências de 100 KHz a 20 MHz, nas quais a absorção no tronco decresce rapidamente com a frequência decrescente e pode ocorrer uma absorção significativa no pescoço e nas pernas;
- Frequências de 20 MHz a 300 MHz, nas quais pode ocorrer uma absorção relativamente alta em todo o corpo;
- Frequências de 300 MHz a 10 GHz, nas quais ocorre absorção local significativa e não uniforme;
- Frequências acima de 10 GHz, nas quais a absorção de energia ocorre principalmente na superfície do corpo.

Curvas de absorção humana de corpo inteiro comparando-se dados experimentais (Guy e outros, 1984 e Hill, 1984, apud Gandhi, 1990) com modelos teóricos (Hagman e outros, 1979 e Chen e Gandhi, 1989, apud Gandhi, 1990) são apresentadas no gráfico da Fig. 1.1.

Quando o maior eixo do corpo humano é paralelo ao vetor do campo elétrico, sob condições de exposição de onda plana, a SAR de corpo alcança valores máximos. A quantidade de energia absorvida depende de vários fatores, incluindo o tamanho do corpo exposto. Pode-se observar pelo gráfico que a frequência que apresenta o valor mais alto de SAR é a 70 MHz. Para indivíduos mais altos, a frequência ressonante de absorção é algo inferior, e para adultos mais baixos, crianças, bebês e indivíduos sentados pode ser superior a 100 MHz.

Sendo assim, o Comitê Internacional de Radiação Não-Ionizante (INIRC) da Associação Internacional de Proteção à Radiação (IRPA) publicou em 1988 um guia dos limites à exposição de campos de RF sendo, posteriormente, em 1998, revisada pela

Figura 1.1 – Comparação entre modelos teóricos e experimentais na medição da SAR em pessoas expostas a várias frequências (Gandhi, 1990).



Intensidade do Campo Elétrico E (V/m)	Intensidade do Campo Magnético H (A/m)	Densidade de Potência (W/m ²)	SAR (W/kg)
-	$1,63 \times 10^5$	-	-
20000	$1,63 \times 10^5 / f^2$	-	-
20000	$2 \times 10^4 / f$	-	-
500 / f	20 / f	-	-
610	24,4	-	-
610	1,6 / f	-	-
610 / f	1,6 / f	-	0,4
61	0,16	10	0,4
$3 f^{0,5}$	1,6 / f	f / 40	0,4
137	0,36	50	0,4

Tabela 1.1 - Limites de Exposição Ocupacional a Campos Eletromagnéticos (IRPA – ICNIRP).

Comissão Internacional para a Proteção Contra Radiações Não-Ionizantes (ICNIRP). No Brasil, a Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) também adotou este guia como referência para avaliação da exposição humana a campos eletromagnéticos através da resolução 303 de 02/07/02. Os valores destes limites à exposição a campos eletromagnéticos são dados pela Tab. 1.1 para a exposição ocupacional e pela Tab. 1.2 para a exposição do público em geral. A população ocupacionalmente exposta compreende adultos que estão geralmente expostos às condições conhecidas e são treinados para estarem atentos ao risco potencial e tomarem precauções apropriadas. Em contraste, o público em geral consiste de pessoas de todas as idades e estados de saúde, podendo incluir grupos ou indivíduos particularmente suscetíveis. Estes valores foram levantados através de muitos estudos de absorção do corpo inteiro percebendo-se que estão altamente relacionados com a frequência, a orientação do campo elétrico, as propriedades dielétricas dos tecidos vivos e a dimensão de comprimento do corpo absorvedor (Gandhi, 1974 e Durney e outros, 1975 apud Gandhi, 1990).

Outro dado importante do efeito em tecidos humanos é que, diferentemente das radiações com comprimentos de ondas menores (infravermelho), as radiações de RF e de microondas são absorvidas tanto pela pele como, também, dependendo da frequência, por camadas mais profundas dos tecidos. Uma vez que os sensores de temperatura se localizam na pele, efeitos prejudiciais aos tecidos humanos podem ocorrer devido ao aquecimento em regiões mais profundas, sem serem percebidos pelas pessoas.

Um outro emprego nobre e necessário para materiais que absorvem radiações eletromagnéticas é na blindagem de aparelhos eletrônicos, que são fontes geradoras de interferência eletromagnéticas. Se não receberem nenhum tipo de revestimento, esses equipamentos podem promover alterações de funcionamento em outros que são receptores. É de conhecimento público que marca-passos, válvulas cardíacas, rádios, entre outros, sofrem modificações no seu funcionamento se influenciados por aparelhos transmissores e fontes de alimentação. Os principais fatores que influenciam a ocorrência de interferências irradiadas são:

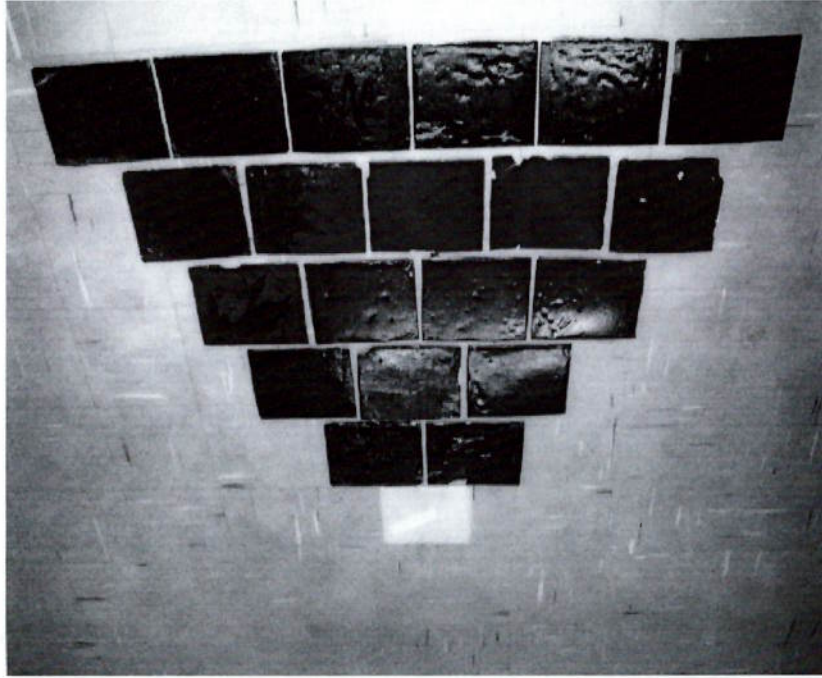
Frequência f	Intensidade do Campo Elétrico E (V/m)	Intensidade do Campo Magnético H (A/m)	Densidade de Potência (W/m^2)	SAR (W/kg)
Até 1 Hz	-	$3,2 \times 10^4$	-	-
1 - 8 Hz	10000	$3,2 \times 10^4 / f^2$	-	-
8 - 25 Hz	10000	$4000 / f$	-	-
0,025 - 0,82 kHz	$250 / f$	$4 / f$	-	-
0,82 - 65 kHz	87	5	-	-
0,065 - 1 MHz	87	$0,73 / f$	-	-
1 - 10 MHz	$87 / f^{0,5}$	$0,73 / f$	-	0,08
10 - 400 MHz	28	0,073	2	0,08
400 - 2000 MHz	$1,375 f^{0,5}$	$0,0046 f^{0,5}$	$f / 200$	0,08
2 - 300 GHz	61	0,16	10	0,08

Tabela 1.2 - Limites de Exposição ao Público a Campos Eletromagnéticos (IRPA- ICNIRP)

Soluções para minimização e eliminação destas interferências irradiadas, como blindagens eletromagnéticas, são amplamente empregadas com o intuito de tornar os equipamentos receptores menos suscetíveis. Com este mesmo fim, há atualmente um grande interesse da indústria militar em reduzir a emissão eletromagnética de equipamentos eletrônicos, além de minimizar a reflexão eletromagnética de superfícies metálicas que formam os radares. Sendo assim, os aspectos eletromagnéticos de projeto de um material absorvedor de radiação eletromagnética são focalizados, principalmente, sobre a síntese no arranjo dos materiais dielétrico e magnético que proporcionam um perfil de impedância especificado para uma determinada onda eletromagnética incidente. Desta forma, a evolução da tecnologia de manufatura de materiais absorvedores está relacionada diretamente com o estudo dos materiais e exploração de técnicas para obtenção de revestimentos com qualidade de absorção da radiação eletromagnética, para uma faixa cada vez mais ampla do espectro. A adição de partículas de óxidos de metais em matrizes poliméricas, revisadas por Weidenfeller e outros (2002), aumenta significativamente as condutividades elétrica e térmica, podendo substituir metais em aplicações de blindagens de interferência em rádio frequência e fontes de calor. Um óxido muito utilizado na indústria de absorção e blindagem de radiação é o óxido de ferro (Fe_3O_4), sendo que sua utilização em matrizes termoplásticas é relativamente nova. O mecanismo de absorção desta radiação eletromagnética é refletido no termo de fonte que aparece na equação do calor. Trabalhos recentes, como o de Pingkuan e outros (2000), empregam este conceito no estudo da transferência de calor em solos, para a análise da absorção da água e sua evaporação quando exposta à radiação na frequência de microondas. Na faixa de frequência das microondas, muitos estudos propõem o decaimento exponencial da potência de absorção da superfície exposta para o interior do material, também conhecido como lei de Lambert, para o modelagem do aquecimento devido à absorção eletromagnética (Perkin, 1980; Zhang e Datta, 2000).

- Os valores de frequência gerados pela fonte de ruído;
- A potência, tensão e corrente da fonte de ruído e, consequentemente, o valor do campo gerado;
- A suscetibilidade dos equipamentos presentes no ambiente.

Figura 1.2 – Manta absorvedora composta por epóxi-ferrita (Migliano, 2000).



As mantas, utilizadas como blindagens eletromagnéticas, são constituídas por misturas de óxidos metálicos denominados ferritas. De acordo com a composição e frações das misturas, diferentes propriedades de absorção são conseguidas para diferentes tipos de aplicações. Uma classe de materiais que vem sendo estudada pelos pesquisadores do Centro Técnico Aeroespacial (CTA) é a das ferritas que operam na faixa de microondas (Migliano e outros, 1999), resultando em patentes de fabricações (CTA, 1998 e CTA, 2002). Estas ferritas apresentam a estrutura cristalina spinélio e foram originalmente observadas pelos pesquisadores Bragg e Nishikawa em 1915 (Smit e Wijn, 1959). Uma das razões para a utilização e o estudo desses materiais é a elevada resistência elétrica desses elementos e, por causa da alta resistência, em altas frequências, ondas eletromagnéticas podem penetrar no corpo do material e, assim, este servir como absorvedor dessa radiação e, conseqüentemente, como gerador de calor. Comumente essas ferritas são misturadas com matrizes de resinas poliméricas, como no caso o epóxi, constituindo, assim, em uma manta rígida que pode ser aderida em substratos metálicos, como pode ser visualizado na Fig. 1.2.

Este trabalho tem como objetivo analisar o comportamento térmico de uma placa composta por um substrato, que pode ser um metal ou um termoplástico, coberto por uma camada de composto epóxi-ferrita que apresenta a característica de absorção de ondas eletromagnéticas. É de interesse entender quais são os parâmetros que influenciam de forma relevante na distribuição de temperatura desses materiais, já que a absorção de radiação eletromagnética resulta em um aumento de temperatura no material absorvedor por estar na faixa de frequência não-ionizante. Situações reais de emprego são simuladas

1.2 Objetivos

A característica absorvedora de radiação estimula o estudo detalhado dos mecanismos de transferência de calor onde a absorção se apresenta como o termo fonte na equação do calor. Isto mostra que na parte interna da manta absorvedora, além do mecanismo de difusão por condução, existe a geração de calor resultante da absorção da radiação pela ferrita que se encontra na matriz polimérica. A resina epóxi, por sua vez, é transparente à radiação eletromagnética e, conseqüentemente, é um meio não absorvente. Experimentalmente existe uma dificuldade para a medição de temperatura interna da manta, pois o emprego de termopares é limitado devido sofrer alterações em suas respostas quando submetido a um campo eletromagnético (Cabrerá e outros, 2000; Fingkuán e outros, 2000 e Gandhi, 1990).

Uma região de grande interesse para o conhecimento do mecanismo de transferência de calor é a interface entre os materiais, pois apresenta uma resistência ao fluxo de calor devido às imperfeições superficiais de ambos os materiais de contato. Fatores como acabamento superficial e pressão de contato promovem uma grande influência no valor desta resistência (Laraqi e Bairi, 2002).

Um grande limitador da utilização destas ferritas como blindagens eletromagnéticas é a temperatura de Curie, pois ela estabelece o limite máximo da temperatura de utilização destes materiais, uma vez que, acima desta temperatura o material perde a característica absorvedora eletromagnética.

Este capítulo aborda a apresentação, a revisão bibliográfica e o objetivo, apresentando uma descrição inicial do problema e os trabalhos que vêm sendo desenvolvidos sobre o assunto. O Capítulo 2 apresenta as características dos materiais do composto, seu processo de obtenção e as propriedades térmicas relevantes. No Capítulo 3 é apresentada a teoria das ondas eletromagnéticas, o conceito da resistência térmica de contato e dos mecanismos de transferência de calor. O capítulo seguinte descreve o método clássico da diferenças finitas, bem como, as equações discretizadas para as diferentes faces, arestas e vértices da placa, além do critério de estabilidade necessário para a convergência do método. O Capítulo 5 trata do estudo de casos para as diferentes

1.3 Divisão da Dissertação

através de uma modelagem numérica por meio da solução explícita através do método térmica e de convecção são utilizadas para simular estes casos de emprego, procurando verificar os fatores predominantes no fenômeno de transferência de calor entre substrato e composto.

A região de interface entre composto epóxi-ferrita e substrato é modelada através do conceito da resistência térmica de contato, simulando o comportamento de salto de temperatura promovido pela resistência ao fluxo de calor proveniente por imperfeições superficiais de ambos os materiais. Entender como este parâmetro se comporta no arranjo da blindagem eletromagnética é outro objetivo deste trabalho, já que diferentes acabamentos superficiais podem ser aplicáveis para o controle do valor da resistência térmica do mesmo.

Além do substrato de alumínio, dois outros materiais (aço carbono e acrílico-butadieno-estireno), com diferentes espessuras são simulados objetivando analisar qual é o grau de influência dos mesmos na distribuição de temperatura. A escolha destes materiais vai de acordo com a viabilidade de emprego e sua utilização. Para finalizar, objetiva-se propor o melhor arranjo para cada situação de emprego simulado.

aplicações, expondo as condições de contorno que são aplicadas para cada caso. No Capítulo 6 são apresentados os resultados obtidos e são emitidas sugestões visando melhorias para os casos simulados. O Capítulo 7 descreve as possibilidades de continuidade deste trabalho e as conclusões que foram extraídas do mesmo. Finalizando, estão as referências bibliográficas utilizadas neste trabalho.

2 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL

Este capítulo tem por finalidade apresentar os materiais que compõem o composto epóxi-ferrita. São caracterizados os materiais, bem como, são apresentadas as propriedades de interesse para o estudo e simulação em questão. Restrições dos materiais pertinentes ao estudo térmico também estão presentes neste capítulo.

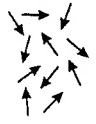


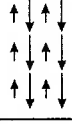
2.1 Materiais Magnéticos

Antes de se apresentar as características físicas e estruturais das ferritas, é importante conhecer o que são materiais magnéticos e quais são os tipos de orientação magnética que se pode obter nestes materiais.

Existem basicamente duas fontes que dão origem ao momento magnético dos átomos que são: o momento orbital dos elétrons em torno do núcleo e o momento de rotação (spin) do elétron em torno de seu eixo. A orientação destes momentos é que dividem o magnetismo nos sólidos em cinco classes distintas: materiais diamagnéticos, paramagnéticos, ferromagnéticos, antiferromagnéticos e ferrimagnéticos (Lovel e outros, 1976). Em simples palavras, os sólidos são diamagnéticos se forem repelidos por um ímã permanente, ao contrário das outras quatro classes de materiais magnéticos que são atraídos pelo ímã permanente (Chen, 1986). Nestas, pode-se fazer uma classificação mais precisa em termos da orientação dos momentos magnéticos e da permeabilidade magnética como se pode observar na Tab. 2.1.

A classe de interesse neste trabalho é a de materiais ferrimagnéticos, pois a ferrita se encaixa dentro do comportamento desses materiais. Estes se caracterizam por apresentar duas ou mais espécies de íons magnéticos e um arranjo de acoplamento de íons ferromagnéticos e antiferromagnéticos promovendo uma magnetização macroscópica do material, como se pode visualizar na ilustração da Tab. 2.1. O efeito desses átomos no arranjo antiparalelo mantém a força magnética destes materiais geralmente menor do que a de sólidos puramente ferromagnéticos.

Tabela 2.1 - Características e classes de materiais magnéticos (Lovel e outros, 1976).

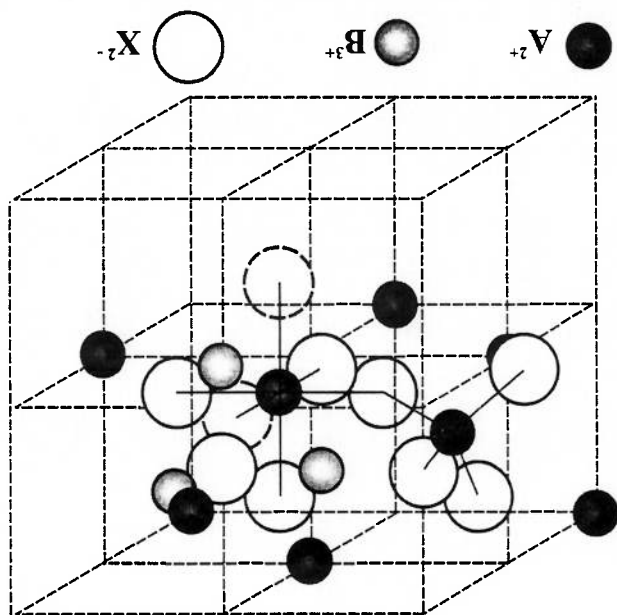
Exemplos	Permeabilidade	Orientação dos momentos
Ouro Mercúrio Água Sódio Alumínio Vanádio	< 1 ≈ 1	— 
—	—	
Ferro Cobalto Níquel	$>> 1$	
Ferritas	$>> 1$	

2.1.1 Ferrita

As ferritas (Chen, 1986) são misturas de óxidos metálicos, sendo o óxido de ferro seu constituinte comum. As suas estruturas cristalinas podem ser spinélio, hexagonal e granada ("garnet") e o sumário de suas estruturas se encontra na Tab. 2.2 (Buchaman e Reynolds, 1991).

As ferritas em estudo neste trabalho, ou seja, que são normalmente empregadas na confecção das mantas como, por exemplo, $Ni_xZn_{1-x}Fe_2O_4$ e $Mn_xZn_{1-x}Fe_2O_4$, apresentam a estrutura spinélio caracterizada pelo arranjo estrutural AB_2X_4 (Fig. 2.1). Sua composição química é $MeFe_2O_4$ a qual A do arranjo da estrutura corresponde a Me, que é um metal de transição bivalente, B corresponde ao ferro (Fe) e X corresponde ao oxigênio (O).

Figura 2.1 – Célula unitária da estrutura spinélio (Von Aulock, 1965).



A célula unitária (Fig. 2.1) consiste de oito moléculas de $MeFe_2O_3$ sendo 32 átomos de oxigênio, 16 íons trivalentes (no caso o ferro) e 8 íons bivalentes (Zn, Mn, Co, Cu). Misturas de ferritas em que Me é uma mistura de íons (p.ex. $Mg_{1-x}Mn_xFe_2O_4$), podem ser preparadas sem grandes dificuldades, portanto é possível se conseguir uma grande variedade de composições com propriedades de interesse específico (Tebble e Craik, 1969).

Observações	Composição Química	Estrutura Cristalina
MeO é um óxido metálico de transição bivalente.	$1 Fe_2O_3 : 1 MeO$	Spinélio
Me_2O_3 é uma óxido metálicos terras raras	$5 Fe_2O_3 : 3 Me_2O_3$	Hexagonal
MeO são óxidos metálicos do grupo 2A (CaO, CaO)	$6 Fe_2O_3 : 1 MeO$	Granada

Tabela 2.2 – Sumário dos tipos de estruturas das ferritas. (Buchaman e Reynolds, 1991).

2.1.2 Processo de obtenção das misturas de ferritas

Para a confecção das misturas de ferritas foram utilizadas, neste trabalho, a metalurgia do pó e a seqüência de preparo será descrita abaixo.

Inicialmente, é feita uma análise química dos óxidos envolvidos, sendo estes pesados por uma balança de precisão, para a formulação adequada e precisa dos tipos de ferritas empregadas nas misturas. A seguir, a mistura de óxido é colocada em um moinho de bolas Fig. 2.2, por volta de 8 horas, com o intuito de homogeneizar e reduzir o tamanho do particulado da mistura dos óxidos envolvidos.

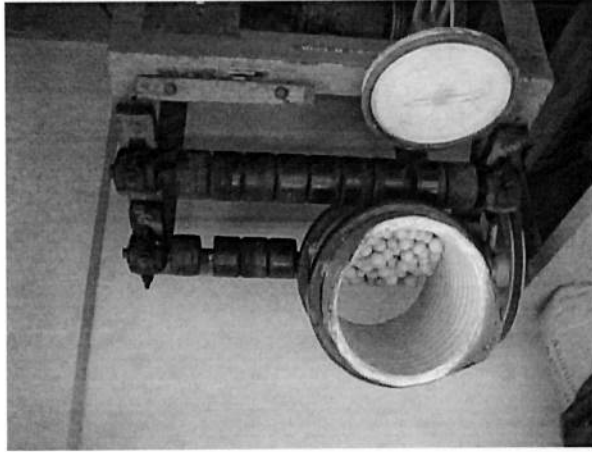
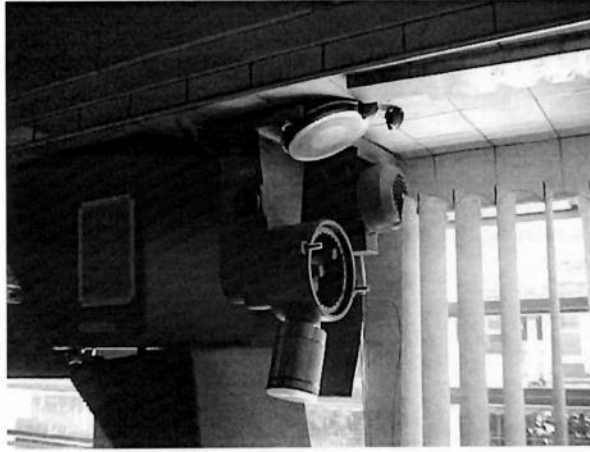


Figura 2.2–Moinho de bolas para a mistura do pó (Freitas, 2001).

Após a moagem, são feitos o descarregamento da mistura de ferritas e a sua penetração, atingindo-se uma forma pastosa ilustrada na Fig. 2.3. Após isto, é feita a secagem da mistura em uma estufa com temperatura de 150 °C por um período de 8 horas, resfriando-se posteriormente, em ambiente natural. A próxima fase é a calcinação a 900 °C por duas horas, a fim de reduzir o tempo de sinterização ao promover o início das reações químicas.

Figura 2.4 – Micronizador de partículas (Freitas, 2001).

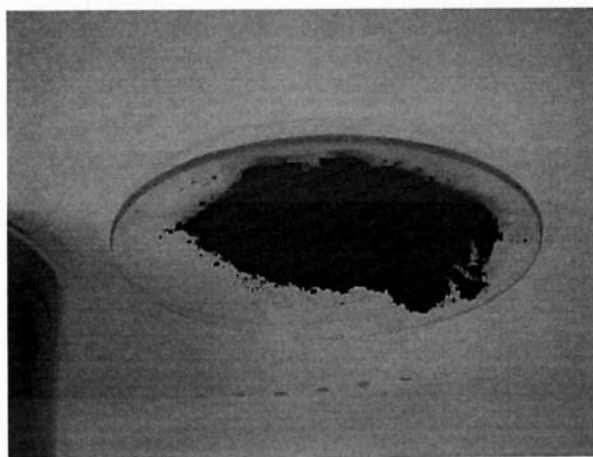


Após isto, o agregado é pulverizado atingindo-se uma granulometria de 20 μm , indo posteriormente a mistura para o micronizador (Fig. 2.4) para reduzir ainda mais a granulometria até o valor de 3 μm . Antes da sinterização propriamente dita, é colocado um aglutinante à mistura de ferritas para a prensagem e obtenção da forma final. Logo após é realizada a sinterização em um forno programável, seguindo uma taxa de aquecimento de 200 $^{\circ}\text{C}/\text{h}$, durante um período de aproximadamente 6 horas, até atingir o patamar de 1300 $^{\circ}\text{C}$, o qual se estabiliza por 2 horas. A rampa de resfriamento também apresenta a taxa de 200 $^{\circ}\text{C}$ totalizando, assim, 15 horas de sinterização como pode ser observado no gráfico esquemático da Fig. 2.5.

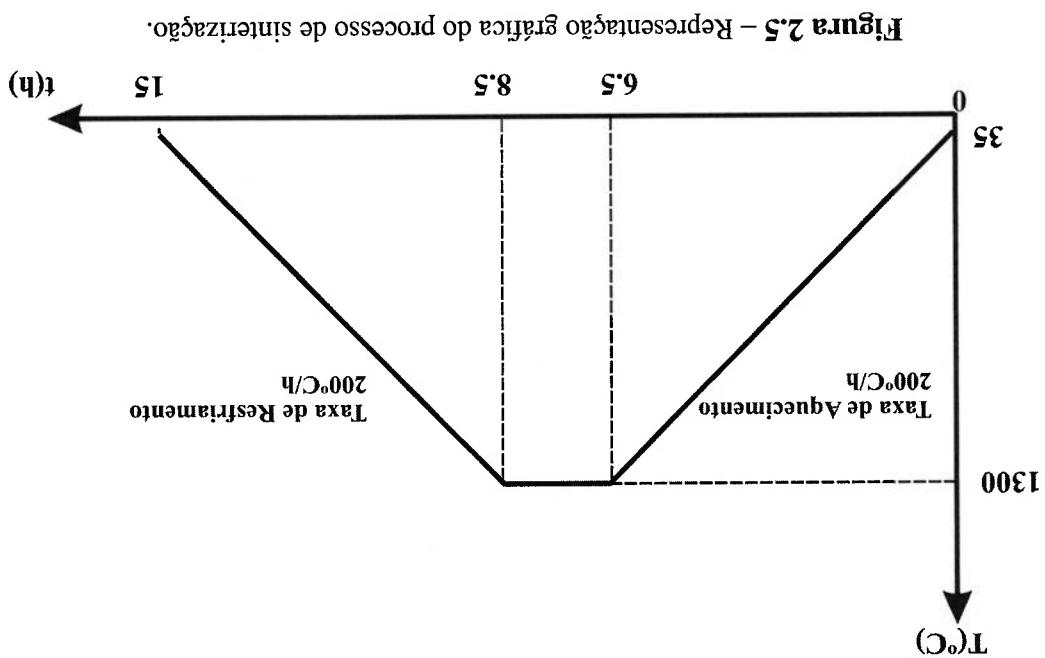
Figura 2.3 – Amostra da ferrita após o descarregamento e a peneiragem (Freitas, 2001).



Figura 2.6 – Produto final do pó de ferrita (Freitas, 2001).



Antes de realizar a mistura com a resina epóxi para a confecção final da manta, a mistura sintetizada sofre um novo processo de micronização até atingir um particulado de tamanho 10 µm. O produto final está ilustrado na Fig. 2.6.



Código da Resina (CIBA)	Porcentagem	Característica
GY298	46,5%	Resina epóxi líquida, alifática, modificada de cadeia longa
DY3601	33,5%	Resina epóxi de baixa viscosidade, formulada a base de propileno glicol
HY840	20%	Endurecedor

Tabela 2.4 – Composição e características das resinas (CIBA).

Segundo Migliano (1998), a resina utilizada na confecção das mantas absorvedoras apresentam a composição dada pela Tab. 2.4.

2.2 Composição da Resina Epóxi

Propriedade	Von Aulock (1959)	Carl Heck (1974)	Smit e Wijn (1959)	Médio Valor
Densidade (kg / m ³)	4500-5000	-	4200-4800	4625
Condutividade Térmica (W/m K)	-	4,2-6,3	6,28	5,78
Calor Específico (J / kg K)	-	711,76	837,36	774,56

Tabela 2.3 – Propriedades termofísicas da mistura de ferritas por autor.

Em referências bibliográficas sobre o assunto (Smit e Wijn, 1959 e Heck, 1974), as propriedades térmicas dos diferentes tipos de ferritas não apresentam grandes variações, sendo apresentadas como valores comuns. Para o presente trabalho, é tirada uma média aritmética simples das referências de onde foram extraídas as propriedades das ferritas, como pode ser visto na Tab. 2.3. Os valores de mínimo e máximo são decorrentes das pequenas variações de composição e de mistura das ferritas.

2.1.3 Propriedades relevantes das ferritas

Propriedades			
Ferrita	Epóxi	Manta	
4625	1060	2842,5	Densidade (kg / m ³)
5,78	0,4	3,09	Condutividade Térmica (W/m K)
774,56	300	537,28	Calor Específico (J / kg K)

Tabela 2.6 – Propriedades termofísicas do composto.

O composto estudado apresenta, na sua concepção final, a composição dada pela mistura em massa de 50% de resina adesiva epóxi e 50% de ferritas. Estes valores são normalmente utilizados nas confecções das mantas (CTA, 1998). Para esta mistura, as propriedades são dadas pela porcentagem em massa e estão apresentadas na Tab. 2.6.

2.3 Propriedades Finais do Composto

Propriedades		
Resina Final		
1060	Densidade (kg / m ³)	
0,4	Condutividade Térmica (W/m K)	
300	Calor Específico (J / kg K)	

Tabela 2.5 – Propriedades termofísicas da mistura da resina final.

Estas codificações de resinas são designadas pelo fabricante CIBA. As propriedades térmicas pertinentes para a simulação deste trabalho estão apresentadas na Tab. 2.5. Os valores das propriedades da resina final são dados pela porcentagem em fração volumétrica das propriedades de seus respectivos componentes (HY840, DY3601, GY298).

As propriedades que são utilizadas nesta simulação são obtidas por leis de mistura em fração volumétrica, sendo necessário equações que correlacionem as porcentagens de massa com as frações em volume. Sendo γ a porcentagem em massa de ferrita no composto e β a porcentagem em fração volumétrica do respectivo material, as equações de mistura em massa são dadas por:

$$(2.1) \quad M_T = \bar{\rho} V_T,$$

$$(2.2) \quad M_E = (1 - \gamma) M_T = \rho^E (1 - \beta) V_T \text{ e}$$

$$(2.3) \quad M_{Fe} = \gamma M_T = \rho^{Fe} \beta V_T.$$

sendo:

M_T a massa total do composto,

M_E a massa do epóxi,

M_{Fe} a massa da ferrita,

$\bar{\rho}$ a densidade da mistura,

ρ^E a densidade do epóxi,

ρ^{Fe} a densidade da ferrita e

V_T o volume total do composto.

Evidentemente, a massa total, M_T , é dada pela soma das massas dos dois componentes, isto é:

$$(2.4) \quad M_T = M_E + M_{Fe}.$$

Substituindo as Eqs. (2.1), (2.2) e (2.3) em (2.4), têm-se:

$$(2.5) \quad \bar{\rho} V_T = \rho^E (1 - \beta) V_T + \rho^{Fe} \beta V_T.$$

Propriedades			
Ferrita	Epóxi	Manta	
4625	1060	1724,1	Densidade (kg / m ³)
5,78	0,4	1,4	Condutividade Térmica (W/m K)
774,56	300	388,5	Calor Específico (J / kg K)

Tabela 2.7 – Propriedades termofísicas do compósito para um β de 0,186.

Portanto, as propriedades empregadas nas equações propostas pelo modelo deste trabalho seguem a lei de mistura de fração volumétrica e estão apresentadas na Tab. 2.7.

$$(2.10) \quad \frac{\rho}{I} = \frac{\rho^E}{(1-\gamma)} + \frac{\rho^{Fe}}{\gamma}.$$

Simplificando a Eq. 2.9, obtêm-se:

$$(2.9) \quad M_T = \frac{\rho}{(1-\gamma)M_T + \rho^{Fe}}.$$

Substituindo as Eq. 2.2 e 2.3 na Eq. 2.8, têm-se:

$$(2.8) \quad \frac{\rho}{M_T} = \frac{\rho^E}{M_E} + \frac{\rho^{Fe}}{M^{Fe}}.$$

Também podem ser substituídos por:

$$(2.7) \quad V_T = V^E + V^{Fe}.$$

da mistura pode ser dado por:

Já que a ferrita e o epóxi curado se apresentam no estado sólido, o volume total

$$(2.6) \quad \beta = \frac{\rho - \rho^E}{\rho^{Fe} - \rho^E}.$$

Simplificando a Eq. 2.5, obtêm-se:

2.4 Temperatura de Curie

A temperatura de Curie (Chen, 1986) é uma das propriedades magnéticas importantes dos materiais magnéticos, pois estabelece um limite máximo de temperatura de utilização. Ela é a temperatura crítica em que a energia térmica é suficiente para destruir a magnetização espontânea, o que causa uma drástica redução da permeabilidade magnética μ do material, como ilustrado na Fig. 2.7. Além disso, é um indicador sensível de variações de composição química e, consequentemente, de propriedades magnéticas.

A temperatura de Curie é uma transição de segunda ordem, ou seja, não é como uma transformação de fase tipo fusão em que, ao ultrapassar-se a temperatura de fusão, todo o material estará fundido. Nesta transformação o material vai tendo sua polarização de saturação paulatinamente reduzida, num certo intervalo de temperatura. Com isso, a determinação de uma única Temperatura de Curie envolve a definição de um critério que esteja relacionado com a temperatura de utilização do material. O seu valor pode ser determinado pela variação da polarização magnética com a temperatura (valor que depende fortemente da intensidade do campo magnetizante aplicado). A Fig. 2.7, mostra que a permeabilidade magnética passa por um pico antes de reduzir-se a valores muito baixos. Isso ocorre, pois a energia de anisotropia magneto-cristalina também se reduz a praticamente zero ao aproximar-se da temperatura de Curie, possibilitando o crescimento da permeabilidade. O critério de determinação da temperatura de Curie é dado pelo ponto em que a derivada da permeabilidade com relação a temperatura é nula (Turtelli, 2000). Exemplificando, na Fig. 2.7 (curva a), a temperatura de Curie seria aproximadamente 115°C , pois é o ponto onde a permeabilidade encontra o máximo valor, ou seja, quando a derivada é nula.

Gráficos mais genéricos da temperatura de Curie em função dos diferentes tipos de composição de ferritas são facilmente encontrados na literatura. Para os casos de interesse neste trabalho, seus valores estão indicados na Fig. 2.8. O caso da ferrita do tipo $\text{Ni}_x\text{Zn}_{1-x}\text{Fe}_3\text{O}_4$, na porcentagem de 15% de NiO, 35% de ZnO e 50% Fe_2O_3 , porcentagem usualmente empregada na confecção de algumas mantas absorvedoras, a temperatura de Curie é de 100 °C, como indicado na Fig. 2.8. Neste trabalho será admitida a temperatura média de Curie, para as ferritas de um modo geral, como sendo 110 °C. Sendo assim, a temperatura de Curie se caracteriza como uma restrição à absorção de energia eletromagnética, uma vez que, acima desta temperatura o material perde a capacidade de absorver e, conseqüentemente, a função de blindagem eletromagnética.

Figura 2.7 - Variação da permeabilidade inicial com a temperatura, para ferritas $\text{Mn}_{0.48}\text{Zn}_{0.47}\text{Fe}_{2.05}\text{O}_4$ após os seguintes tratamentos: a) 4h a 1320°C, $P_{\text{O}_2} = 2 \times 10^{-2}$ Torr. b) 4h a 1320°C, $P_{\text{O}_2} = 2$ Torr. c) o mesmo, removendo a camada superficial (Vogler, 1971).

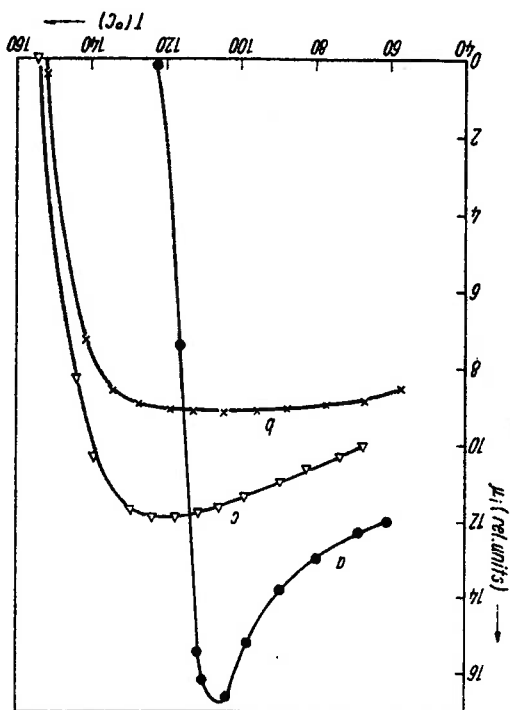
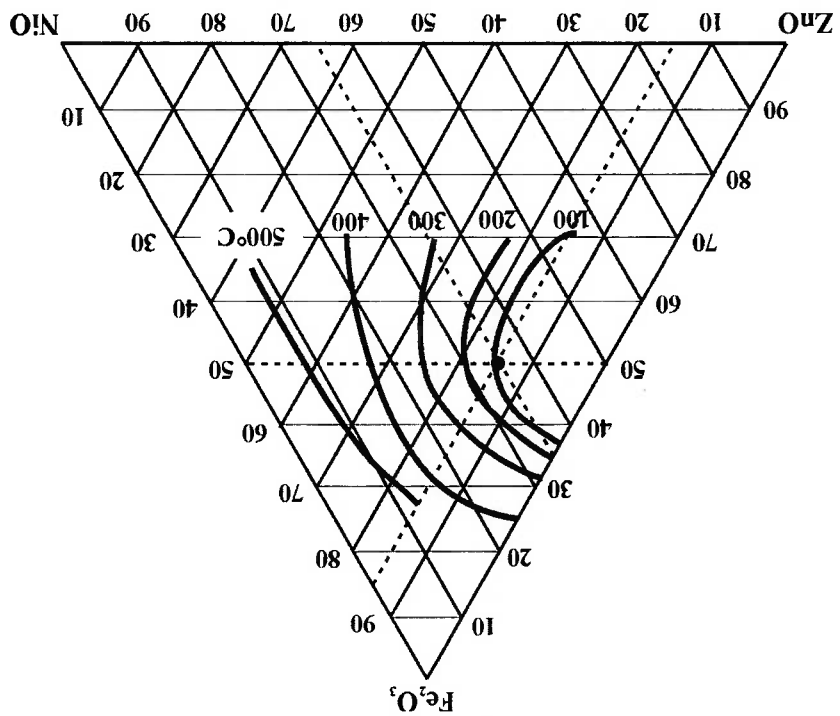


Figura 2.8 – Temperatura de Curie de ferritas Ni-Zn que foram sintetizadas a 1400°C (Heck, 1974).



3 TEORIA DOS MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR APLICADOS AO MODELO

Este capítulo tem como finalidade introduzir conceitos fundamentais das ondas eletromagnéticas e de seu comportamento de absorção, além dos conceitos básicos de troca de calor. As hipóteses simplificadoras também são apresentadas. Dentro deste contexto são apresentadas linearizações de termos que, posteriormente, são empregados nas equações discretizadas, bem como, a similaridade da resistência térmica de contato para modelar o comportamento da interface do composto com o substrato. Finalizando, é apresentada a descrição do problema em estudo neste trabalho.

3.1 Absorção das Ondas Eletromagnéticas

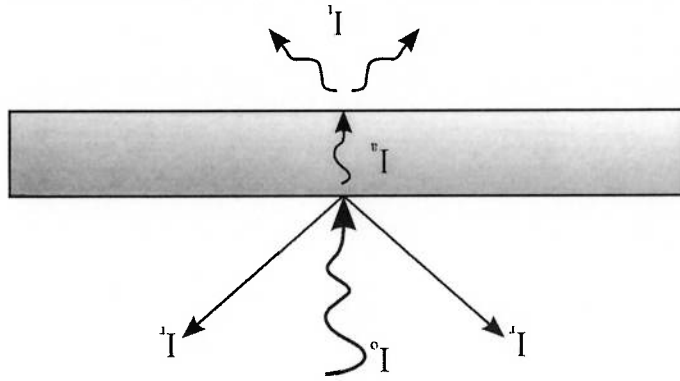
Para o entendimento do mecanismo de absorção empregado no modelo desenvolvido por este trabalho, inicialmente é feita uma breve explanação do conceito de onda eletromagnética e de seu mecanismo de transporte de energia.

3.1.1 Radiações eletromagnéticas

As radiações eletromagnéticas são compostas por ondas transversais, que se propagam perpendicularmente às direções das oscilações dos campos elétrico e magnético, como ilustra a Fig. 3.1. Uma das características mais importantes das ondas eletromagnéticas é o fato de poder transportar energia de um ponto a outro. Este transporte perpendicular é descrito pelo vetor de Poynting (S), definido como a taxa de energia por unidade de área [W/m^2] com que uma onda eletromagnética se propaga, dado por:

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H} . \quad (3.1)$$

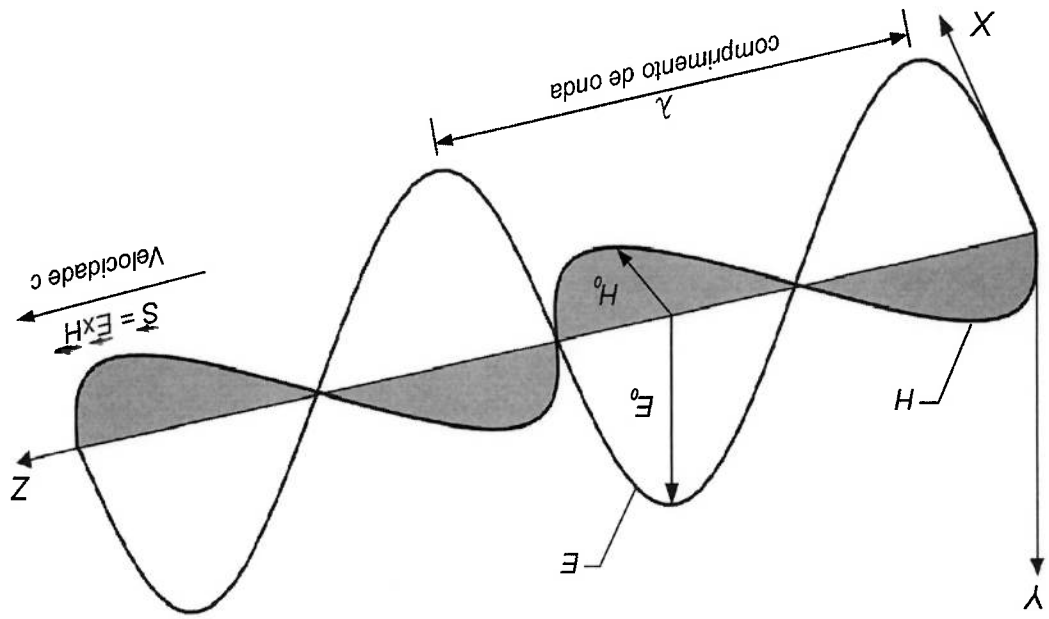
Figura 3.2 – Desenho esquemático do balanço de energia proveniente de radiação eletromagnética que incide sobre uma placa.



irradiação pode ser vista na Fig. 3.2.

Uma representação gráfica dos mecanismos de absorção, reflexão e transmissão da onda. A irradiação (I) sobre uma superfície pode ser definida como a taxa de incidência de radiação por unidade de superfície [W/m^2] e será igual a S , se for desprezada qualquer tipo de perda no transporte de energia durante a propagação da onda. Os vetores \vec{E} e \vec{H} se referem aos valores instantâneos dos respectivos campos elétrico e magnético, no ponto considerado.

Figura 3.1 – Representação de uma onda eletromagnética.



Antes de se exibir o modelo do mecanismo de absorção das ondas eletromagnéticas, é necessário conhecer o comportamento de absorção do composto de ferrita-epoxi usado. O estudo da absorção do material analisado por este trabalho foi realizado por Migliano e Freitas (2002), os quais verificaram o comportamento de absorção do composto na blindagem de circuitos eletrônicos, para avaliar a eficiência da mesma. O esquema da instrumentação utilizada no experimento está apresentado na

Fig. 3.3.

3.1.2 Comportamento de absorção do composto epóxi-ferrita

De acordo com o balanço da irradiação que incide sobre o corpo, uma parcela é refletida, outra parcela é absorvida e a resultante é transmitida. De todas estas parcelas da irradiação incidente, a absorvida é a de interesse no estudo deste trabalho e, portanto, conhecer seu comportamento e saber modelá-la é de fundamental importância para o entendimento do mecanismo aquecimento da superfície absorvedora.

onde:

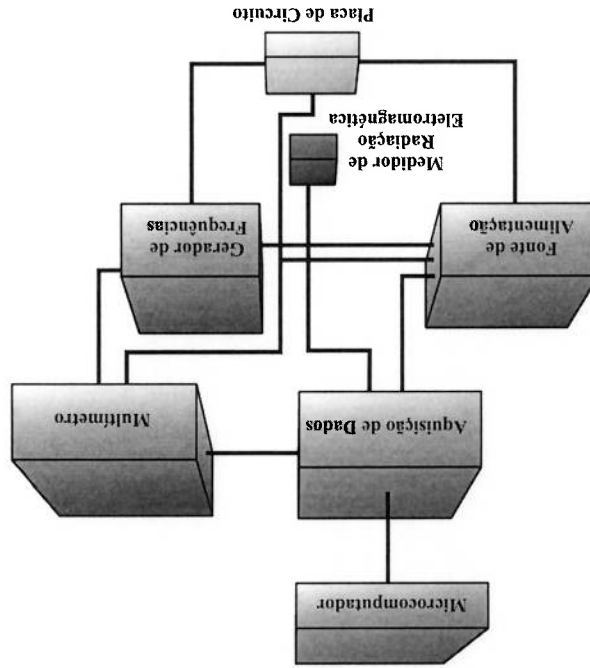
- I_o é a irradiação que incide sobre o corpo,
- I_r a parcela de irradiação que é refletida pelo corpo,
- I_a a parcela de irradiação que é absorvida pelo corpo e
- I_t a parcela de irradiação que é transmitida.

$$I_o = I_r + I_a + I_t, \quad (3.2)$$

Fazendo-se o balanço de energia proveniente da radiação eletromagnética sobre o corpo, pode-se verificar:

Conforme o esquema da Fig. 3.3, uma tensão de 5V é aplicada à borda da placa de circuito medindo-se os valores de potência de irradiação para diferentes valores de frequências geradas pelo gerador de frequências. A aquisição de dados é feita para três tipos de situações de revestimento sendo: o primeiro, sem cobertura do composto (WC); o segundo, com uma fina camada da mistura epóxi-ferrita (CMI); e o terceiro, com uma segunda camada da mistura (CM2), atingindo uma espessura final de 3 mm. O resultado deste experimento pode ser verificado na Fig. 3.4. Com referência a essa figura, nota-se que os valores medidos após a aplicação da primeira camada (CMI) apresentam uma redução considerável da potência irradiada, principalmente na faixa de 1 a 20 GHz. Verifica-se também, que, com a aplicação da segunda camada de mistura (CM2), houve uma atenuação ainda maior da potência irradiada que atravessou a camada na faixa de frequência até 9 MHz, se comparada com o caso anterior. O gráfico ainda apresenta a potência irradiada sem revestimento algum (WC). A diminuição da irradiação se deve ao fato da onda eletromagnética ser absorvida pela mistura de ferrita, presentes nas camadas CMI e CM2, caracterizando-se assim, como uma blindagem eletromagnética.

Figura 3.3 – Esquema da instrumentação utilizada (Migliano e Freitas, 2002).



onde: P_a é a potência absorvida [W/m^2] pela placa de circuito com a camada de 3 mm de composto e $P_{I(WC)}$ a potência irradiada pela placa do circuito em vazio [W/m^2].

$$\alpha_a = \frac{P_a}{P_{I(WC)}} \quad (3.3)$$

Através dos resultados levantados pelo experimento de absorção apresentados na Fig.3.4, fica evidente a absorção quase que completa da irradiação incidente. Mas uma pequena quantidade de irradiação é transmitida, sendo necessário, assim, utilizar-se de um parâmetro de absorção α_a que quantifique a parcela absorvida pelo composto. Este parâmetro é chamado de coeficiente de absorção e é descrito por:

Figura 3.4 – Gráfico da intensidade de potência irradiada (Migiliano e Freitas, 2002).

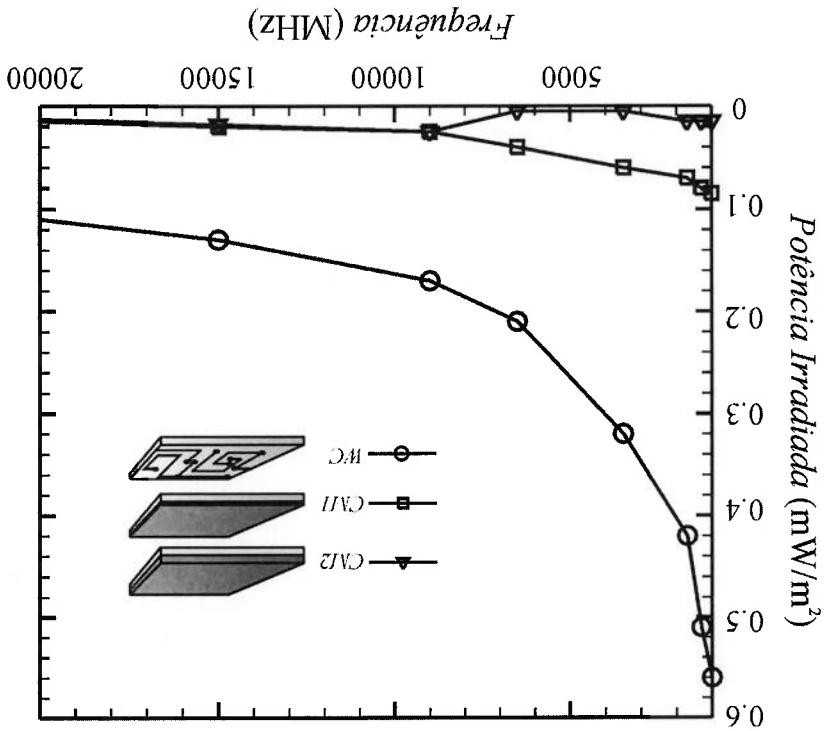
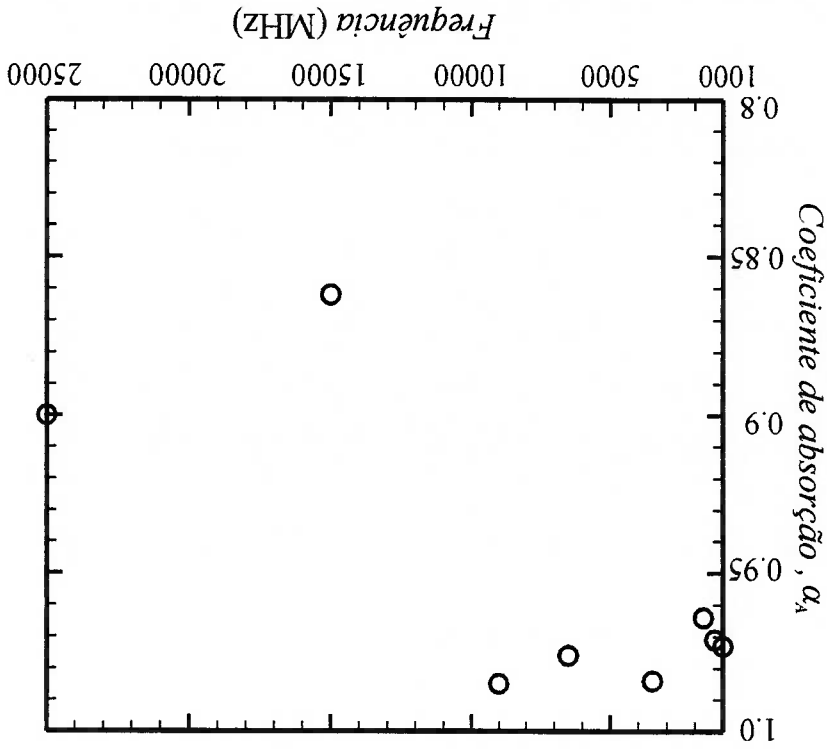


Figura 3.5 – Gráfico do coeficiente de absorção α_a em função da frequência com os dados obtidos pelo experimento de Migliano e Freitas (2002).



Aplicando-se a equação Eq. 3.5 aos dados obtidos pelo experimento de Migliano e Freitas (2002) pode-se construir o gráfico dos valores do coeficiente de absorção α_a . Estes dados podem ser verificados no gráfico da Fig. 3.5.

$$\alpha_a = \frac{P_{I(WC)}}{P_{I(CM2)} - P_{I(WC)}} \quad (3.5)$$

Substituindo a Eq. 3.4 na Eq. 3.3, têm-se a Eq. 3.5 dada por:

$$P_a = P_{I(WC)} - P_{I(CM2)} \quad (3.4)$$

O valor da irradiação absorvida pelo composto epóxi-ferrita aplicado à placa de circuito (P_a) no experimento da Fig. 3.3 é calculado a partir da diferença da potência irradiada pela placa sem cobertura da mistura epóxi-ferrita ($P_{I(WC)}$), com a potência irradiada pela placa do circuito com a camada de espessura final 3 mm ($P_{I(CM2)}$), ou seja:

onde:

$$Bi = \frac{hL}{k}, \quad (3.7)$$

resistência térmica convectiva externa dada pela Eq.3.7. número de Biot (Bi) que é a razão entre a resistência térmica interna de um sólido e a Para a validade da simplificação deste método, faz-se necessária a análise de

vários livros texto de transferência de calor como, por ex., Incropera e Witt (1996). convecção entre o composto e meio externo. Este método esta amplamente discutido em for pequeno, se comparado com a resistência térmica à transferência de calor por aproximado se o valor da resistência térmica à condução de calor no interior do sólido levaria a crer que a condutividade térmica teria um valor infinito, o que pode ser processo transiente, ou seja, os gradientes no interior do sólido são desprezíveis. Isto interior do sólido é uniforme no espaço, em qualquer instante de tempo, durante um capacidade global. A essência deste método é a hipótese de que a temperatura no eletromagnética utiliza, neste trabalho, a simplificação proposta pelo método da A modelagem do termo fonte de absorção da energia proveniente da onda

3.1.3 Modelagem da absorção para o Método da Capacitância Global

representa os pontos discretos contidos no intervalo de frequência estudado. $\alpha(f)$ a função interpolada obtida através do método dos mínimos quadrados que Δf a diferença entre os intervalos de integração f_{min} e f_{max} e $\bar{\alpha}_v$ o coeficiente de absorção médio da faixa de frequência em estudo,

sendo:

$$\bar{\alpha}_v = \frac{1}{\int_{f_{min}}^{f_{max}} \alpha(f) df}, \quad (3.6)$$

para cada faixa de frequência pode-se calcular um $\bar{\alpha}_v$ médio ($\bar{\alpha}_v$) dado pela Eq.3.6. por apresentam faixas de frequências distintas. Portanto, para cada aplicação, ou seja, As aplicações que serão estudadas neste trabalho se diferem, entre outros fatores,

Com esta simplificação, toda a absorção de radiação eletromagnética estará concentrada em uma fina camada, ou seja, o compósito epóxi-ferrita com espessura de 3 mm é reduzido a uma superfície em que a lei de absorção, para uma determinada faixa de frequência, é dada pela Eq. 3.8. Esta equação é válida desde que a parcela refletida, ou espalhada, da radiação eletromagnética que incide sobre o compósito, seja desprezível. Isto pode ser considerado, já que menos de 1 % da radiação eletromagnética é refletida para a espessura de 3 mm de compósito (Migliano e Freitas, 2002). Já o substrato não é simplificado e na direção da espessura apresenta um perfil térmico diferenciado em função da variação de cota de espessura. A representação esquemática desta simplificação pode ser verificada na Fig.3.6.

onde: q_{ger} " é a taxa na qual a energia térmica é gerada [W/m^2].

$$q_{ger} = \alpha^A I_o, \quad (3.8)$$

verificar na Eq. 3.8. dada por:

Através da simplificação do método da capacitância global, o calor gerado pela absorção da radiação eletromagnética é dado pelo valor da potência que incide sobre a camada de compósito multiplicado pelo coeficiente de absorção médio, como se pode analisar de transferência de calor por condução através do método da capacitância global. promove, em conjunto com as propriedades térmicas, um baixo Biot e torna possível a A espessura da camada do compósito de epóxi ferrita é da ordem de 3 mm o que que, para corpos como placas, este erro é inferior a 5% (Kreith, 1973).

para admitir que o erro associado à utilização do método seja pequeno é $Bi < 0,1$, sendo possibilitando, assim, a utilização do modelo da capacitância global. Uma medida usual interior do sólido é muito menor do que a resistência térmica convectiva externa, É facilmente verificável que para um $Bi \ll 1$, a resistência térmica condutiva no k a condutividade térmica [W/mK].

L o comprimento característico (no caso a espessura da placa) [m] e

h é o coeficiente de transferência de calor por convecção [W/m^2K],

onde: q_x'' é a taxa de transferência de calor na direção x [W/m^2].

$$(3.9) \quad q_x'' = -k \frac{dT}{dx}$$

O mecanismo de transferência de calor interno a um sólido se dá através da condução e a equação que descreve este fenômeno é a Lei de Fourier, que para uma parede plana unidimensional, pode ser descrita por:

3.2 Equação da Difusão de Calor

Substratos metálicos, como é o caso do alumínio e do aço, apresentam a característica de refletividade total da radiação eletromagnética, sendo assim, a parcela da radiação transmitida para o substrato, dado pelo valor $F_{I(CM2)}$, não promoverá nenhum tipo de aquecimento nestes materiais. O substrato de acrílico-butadieno-estireno (ABS), muito usado na indústria de telecomunicações, é transparente às radiações eletromagnéticas e, conseqüentemente, do mesmo modo que os substratos metálicos, não aquece.

Figura 3.6 – Ilustração da simplificação proposta pelo Método da Capacitância Global. A camada de composto com uma determinada espessura se reduz a uma superfície em que as ondas eletromagnéticas são absorvidas.

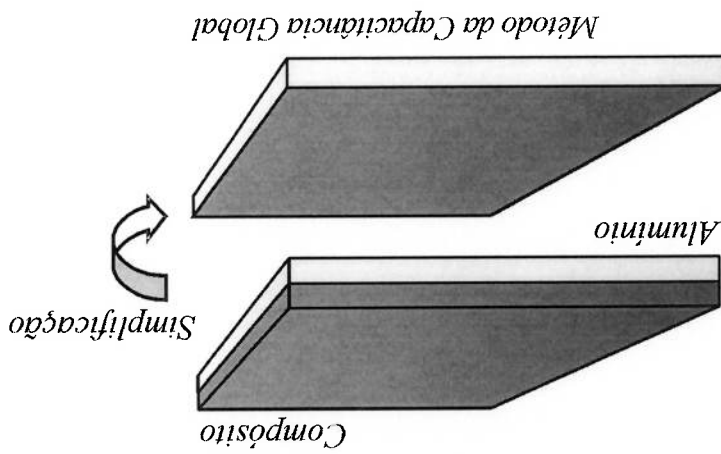
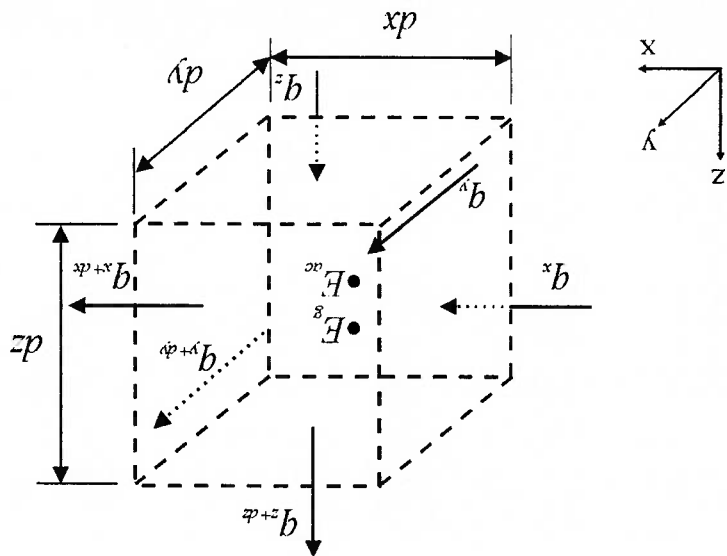


Figura 3.7 - Volume de controle infinitesimal para os balanços de energia.



$$\dot{E}_{ac} = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} (dx dy dz). \tag{3.11}$$

específico a pressão constante (C_p), é dado por:

O termo da taxa de acúmulo de energia (\dot{E}_{ac}) para uma densidade (ρ) e um calor

\dot{E}_g a taxa de energia gerada no volume de controle [W].

\dot{E}_{ac} a taxa de variação de energia térmica acumulada no volume de controle [W].

\dot{E}_s a taxa de energia que sai do volume de controle [W].

\dot{E}_e é a taxa de energia que entra no volume de controle [W].

onde:

$$\dot{E}_e + \dot{E}_g - \dot{E}_s = \dot{E}_{ac}, \tag{3.10}$$

Aplicando-se o princípio de conservação da energia dada por:

volume de controle infinitesimal, como pode ser representado pela Fig.3.7.

Para se obter a equação de calor faz-se o balanço de energia para um

h é o coeficiente de transferência de calor por convecção [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$],
 q'_{conv} é o fluxo de calor por convecção [W/m^2],

onde:

$$(3.15) \quad q'_{conv} = h(T_{sup} - T_{\infty}),$$

O mecanismo de transferência de calor por convecção se dá através da transferência de calor do fluido em movimento e uma superfície, quando os dois se encontram a temperaturas diferentes. Esta transferência ocorre tanto em função do movimento molecular aleatório (difusão) quanto pelo movimento global do fluido. A equação apropriada para a taxa de transferência de calor por convecção é dada pela Lei do Resfriamento de Newton e possui a forma:

3.3 Convecção

$$(3.14) \quad \lambda = \frac{\rho c_p}{k}.$$

Sendo que λ é a difusividade térmica do meio dado por:

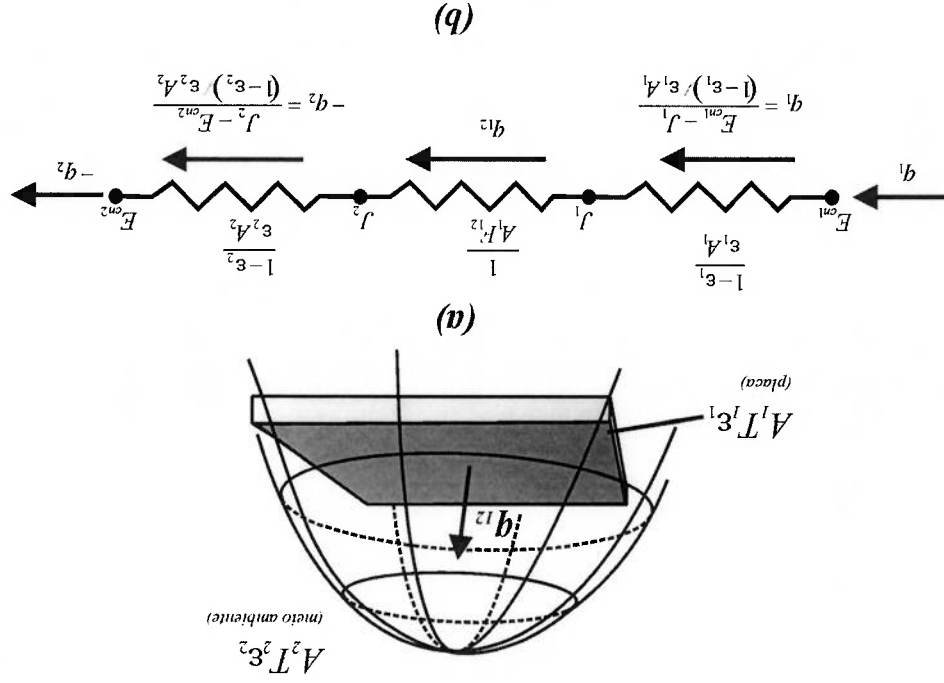
$$(3.13) \quad \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{1}{q} \frac{\partial q}{\partial t} = \lambda \frac{\partial T}{\partial t},$$

Reconhecendo que as taxas de condução de calor respondem pela entrada, E_e , e pela saída de energia, E_s , substituindo as Eqs. 3.12 e 3.11 na Eq. 3.10 e, considerando que a condutividade térmica é constante em todas as direções, a equação da difusão também conhecida como a equação do calor, pode ser descrita por:

$$(3.12) \quad E_g = q(dx dy dz).$$

Já o termo da taxa de energia térmica gerada (E_g) é dado por:

Figura 3.8 - A cavidade com duas superfícies (placa e meio externo). (a) Diagrama esquemático. (b) Representação pelo circuito equivalente.



Para a modelagem da troca de energia radiante entre a placa, composta pelo substrato coberto com o composto epóxi-ferrita, e o meio externo é utilizado o conceito de cavidade com duas superfícies. A placa troca radiação térmica com o meio externo devido à diferença de temperatura entre sua superfície e o meio que o envolve. Sendo assim, pode-se modelar a troca radiante da placa com meio externo por uma cavidade de duas superfícies como pode ser observado na Fig. 3.8a.

3.4 Radiação Térmica

Este coeficiente de transferência de calor depende das condições da camada limite, as quais são influenciadas pela geometria da superfície, pela natureza do fluido e por uma série de propriedades termodinâmicas e de transporte do fluido. O cálculo do h para o caso de escoamento paralelo sobre uma placa plana é facilmente encontrada na literatura sobre o assunto.

T^{sup} é a temperatura da superfície do material [K] e T^∞ é a temperatura do fluido [K].

termo $A_1/A_2 \approx 0$ e a Eq. 3.19 resume-se a,
 Sendo a área do meio ambiente (A_2) muito maior que a área da placa (A_1), o

$$(3.19) \quad R_r = \frac{1}{A_1} \left(\frac{A_1}{1-\epsilon_1} + 1 + \left(\frac{\epsilon_2}{1-\epsilon_2} \right) \left(\frac{A_2}{A_1} \right) \right)$$

Rearranjando a Eq. 3.18, tem-se a Eq. 3.19:

$$(3.18) \quad R_r = \frac{1-\epsilon_1}{A_1} + \frac{1}{A_1} + \frac{A_2}{1-\epsilon_2} \left(\frac{\epsilon_2}{A_1} \right)$$

Pode-se simplificar a Eq. 3.17 para obter a Eq. 3.18, ou seja:

A_2 área do meio ambiente.

A_1 área da placa e

F_{12} o fator de forma que assume valor unitário devido a placa ser plana,

ϵ_2 a emissividade total hemisférica do meio ambiente,

ϵ_1 a emissividade total hemisférica da placa,

sendo:

$$(3.17) \quad R_r = \frac{1-\epsilon_1}{A_1} + \frac{A_1 F_{12}}{1-\epsilon_2} + \frac{\epsilon_2 A_2}{1-\epsilon_2}$$

resistência espacial Fig. 3.8b, dadas pela Eq. 3.17.
 resistência total à troca de radiação é composta por duas resistências superficiais e pela
 Este arranjo pode ser representado por um circuito elétrico equivalente, cuja

$$(3.16) \quad q_1 = -q_2 = q_{12}$$

Conseqüentemente,

ser iguais à taxa líquida na qual a radiação é trocada entre a placa e o meio ambiente.
 deve ser igual a taxa radiante líquida que chega ao meio ambiente, $-q_2$, e as duas devem
 Como há somente duas superfícies, a taxa de radiação líquida saindo da placa, q_1

O poder emissivo hemisférico total é definido como a energia térmica radiante total emitida por um material, em todo o espectro de onda, em todas as direções. Objetivando manter a linearidade da equação descrita em diferenças finitas no modelo proposto por este trabalho, emprega-se o conceito de coeficiente de transferência de calor por troca de radiante (h_r) definido por:

$$\epsilon_l = \frac{\zeta_l}{\zeta_N} \quad (3.23)$$

A emissividade ϵ_l é utilizada justamente para quantificar a irradiação da placa como a de um corpo real, também chamado de corpo cinzento. Este parâmetro relaciona o poder emissivo hemisférico total do corpo cinzento ζ_l , dado pela placa, com o poder emissivo hemisférico total do corpo negro ζ_N , que é utilizado como padrão por ser o irradiador que emite a máxima quantidade possível de energia para uma dada temperatura, sendo dado pela Eq. 3.23.

onde:

$$q_{12} = \epsilon_l \sigma A_1 [T_1^4 - T_2^4] \quad (3.22)$$

Portanto, a troca radiante líquida entre as duas superfícies é dada pela Eq.3.22, descrita por:

$$R_r \equiv \frac{A_l \epsilon_l}{I} \quad (3.21)$$

ou seja,

$$R_r \equiv \frac{A_l}{I} \left(\epsilon_l - I + I \right) \quad (3.20)$$

Em sistemas térmicos compostos por materiais distintos em contato, existe uma queda considerável de temperatura na interface como é o caso entre o composto epóxi-ferrita e o substrato. Isto se deve às imperfeições superficiais de ambos os materiais (rugosidade), bem como, devido à pressão de contato que os une. A transferência de calor se dá através da condução entre áreas de contato, enquanto que basicamente, por radiação nas áreas das falhas, como se pode ver de forma esquemática na Fig. 3 9.

3.5 Resistência Térmica de Contato

$$q_{rad} = h_r A (T_1 - T_2). \quad (3.28)$$

linearizado é dado por:

sendo h_r calculado iterativamente, pois depende do valor da temperatura na superfície no passo correspondente. Portanto, a equação final empregada para a troca de calor por radiação térmica entre a blindagem eletromagnética e o meio externo com o termo h_r

$$h_r = \varepsilon_1 \sigma (T_3^4 + T_2^4 T_1 + T_2^4 T_3 + T_3^4 T_2 + T_2^4 T_3), \quad (3.27)$$

ou seja,

$$h_r = \varepsilon_1 \sigma (T_1 + T_2) (T_1^2 + T_2^2), \quad (3.26)$$

Simplificando a Eq. 3.26,

$$h_r = \frac{\varepsilon_1 \sigma A_1 [T_1^4 - T_2^4]}{A_1 (T_1 - T_2)}. \quad (3.25)$$

Substituindo a Eq. 3.22 na Eq. 3.24, obtêm-se:

$$h_r = \frac{q_{12}}{A_1 (T_1 - T_2)}. \quad (3.24)$$

As áreas de contato físico aumentam à medida que a pressão de contato entre as regiões aumenta devido à deformação mecânica imposta reduzindo, assim, a resistência térmica de contato. Isto explica por que este é um dos fatores importantes a ser considerado. Um experimento típico que demonstra esta relação foi apresentado por Chen e outros (2001) e relaciona a diminuição da resistência térmica de contato com o aumento do torque de parafusos em um arranjo mecânico onde duas placas de materiais distintos estão fixadas por parafusos.

Fig. 3.10.

Uma explanação mais detalhada do mecanismo de transferência de calor na interface de materiais distintos é apresentada em Gebhart (1993) e está representada pela

T_A é a temperatura da superfície do material A na localização média do contato, T_B é a temperatura da superfície do material B na localização média do contato, q_x é o fluxo de calor que atravessa a área de contato [W/m^2], R_c é a resistência térmica de contato entre os materiais [m^2K/W],

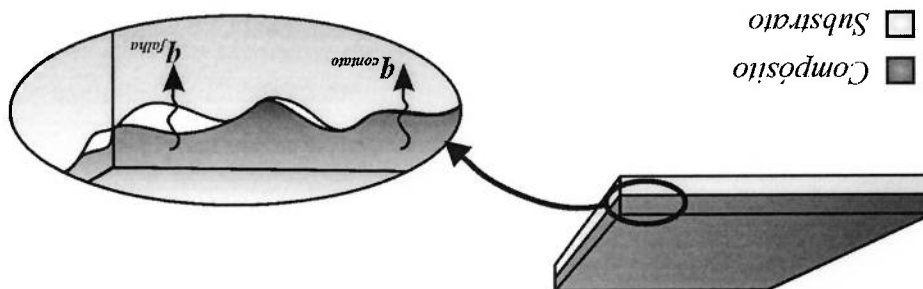
onde:

$$R_c = \frac{q_x}{T_A - T_B}, \quad (3.29)$$

pode ser definida como:

Para modelar este comportamento físico da transferência de calor foi atribuído um novo conceito que é a resistência térmica de contato que, para uma área unitária,

Figura 3.9 - Ilustração da interface de dois materiais. A condução de calor se dá, sobretudo por condução onde os picos se tocam.



Na Fig. 3.10, as linhas tracejadas representam a localização média da rugosidade da região A e da B, sendo que Y é a distância entre estas duas linhas. A distribuição de temperaturas nas duas regiões definidas por t_A e t_B , respectivamente, com diferentes inclinações decorrentes de $k_A > k_B$, considerando que o fluxo de calor é uniforme em toda a estrutura.

Se existisse um contato perfeito entre as duas regiões, a distribuição de temperatura dada por t_A e t_B apresentaria um ponto de intersecção na localização média do ponto de contato, como mostrado na Fig. 3.10. Mas, devido à resistência existente na área de contato, existe um elevado gradiente de temperatura nessa região resultando numa variação de temperatura dada por ΔT_c .

Em sólidos, com condutividade superior à do fluido das falhas, a resistência térmica de contato é diminuída com o aumento dos pontos de contato, o que explica o seu aumento com o aumento da pressão de contato e a redução da rugosidade.

Figura 3.10 – Detalhe ampliado da região de contato entre dois materiais distintos (Gebhart, 1993).

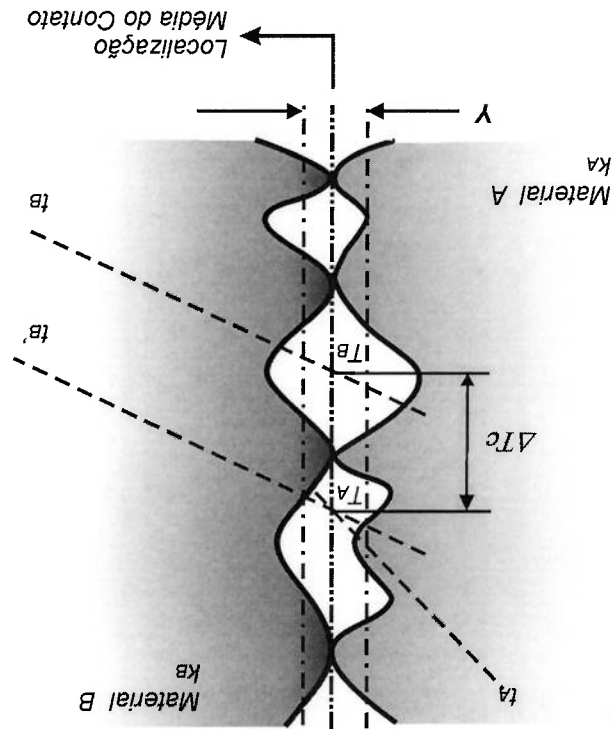


Figura 3.11 – Desenho esquemático do fenômeno físico de transferência de calor sobre a placa.

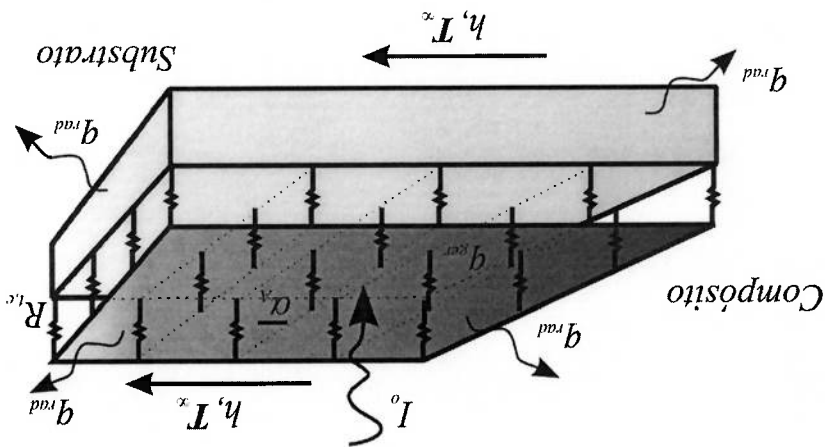


Fig. 3.11.

O problema em análise neste trabalho é encontrar o campo de temperaturas para uma solução de regime permanente de uma placa composta por um substrato, coberto por um composito epóxi-ferrita que se caracteriza por aquecer, quando radiações eletromagnéticas incidem sobre sua superfície. O substrato não apresenta a característica absorvedora, sendo considerado como um material transparente às ondas eletromagnéticas. O desenho esquemático do fenômeno físico, pode ser visto na

numérico que é apresentado no próximo capítulo. Após o entendimento dos mecanismos de troca de calor e do modelo de aquecimento devido à absorção eletromagnética empregado por este trabalho, é interessante descrever o problema em estudo para facilitar a compreensão do modelo

3.6 Descrição do Problema

Vários modelos foram desenvolvidos para o cálculo desses valores em função da geometria do material, das características térmicas do material e do tipo de montagem empregada. Esses modelos são, geralmente, baseados em contatos idealizados como em Laraqi (2002), o qual a área de contato é modelada por discos de diferentes diâmetros distribuídos aleatoriamente sobre uma área.

Outra parte do problema é procurar verificar que parâmetros e condições de contorno efetivamente influenciam na distribuição de temperaturas da placa. Detalhes de como são empregadas as condições de contorno nos casos simulados estão presentes no Capítulo 5.

4 MODELAGEM NUMÉRICA

Neste capítulo é apresentado a discretização da equação da condução de calor e o método empregado para a sua solução. É abordado, também, o critério de estabilidade para a convergência das equações discretizadas, bem como, o acoplamento de soluções dos dois materiais para a integração conjunta das equações.

4.1 Discretização

Soluções analíticas caracterizam-se por serem contínuas, ou seja, por apresentarem os valores das grandezas passíveis de determinação em todo o campo. Mas estas soluções são geralmente válidas para condições de contorno simples e geométricas elementares, de forma que situações mais complexas exigem solução numérica. Nesse caso, faz-se necessário tornar o campo contínuo em um campo discreto, ou seja, com um número finito de pontos, onde o seu arranjo é chamado de malha. Sendo assim, as equações discretizadas são escritas em função da geometria da malha e a distribuição e densidade dos pontos são de grande importância para acuidade da solução.

Neste trabalho, a discretização é feita através da substituição do domínio contínuo por uma série de pontos discretos, introduzindo-se aproximações por diferenças finitas entre esses pontos. Este método de aproximação é conhecido como método das diferenças finitas e é amplamente empregado para soluções numéricas de problemas de transferência de calor. Para uma placa plana a discretização é muito simples, pois o emprego de uma malha regular torna-se facilmente aplicável como pode ser verificado na Fig. 4.1.

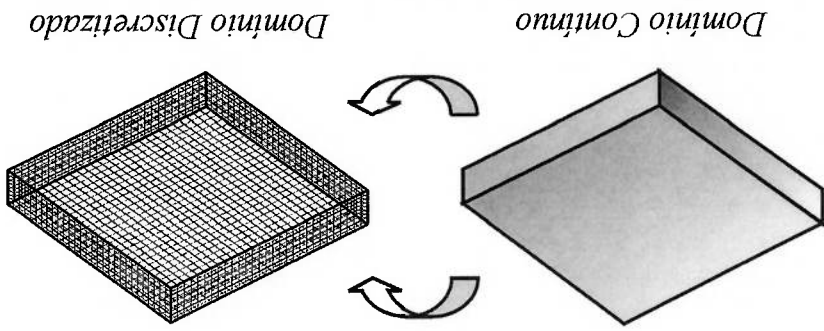


Figura 4.1 - Discretização de uma placa plana.

4.2 Método de Solução

O método empregado para solução numérica deste problema é o método explícito, modelando o transiente iterativamente até atingir o regime permanente. A equação discretizada da conservação da energia térmica na forma explícita é descrita diferentemente para cada face, aresta e vértice da placa. Ela apresenta a característica explícita porque as temperaturas nodais desconhecidas para o novo instante de tempo são determinadas exclusivamente a partir de temperaturas nodais conhecidas no instante de tempo anterior.

4.2.1 Discretização no composto

Para os nós internos localizados na face superior da placa, ou seja, onde está localizado o composto, a representação gráfica é dada pela Fig. 4.2.

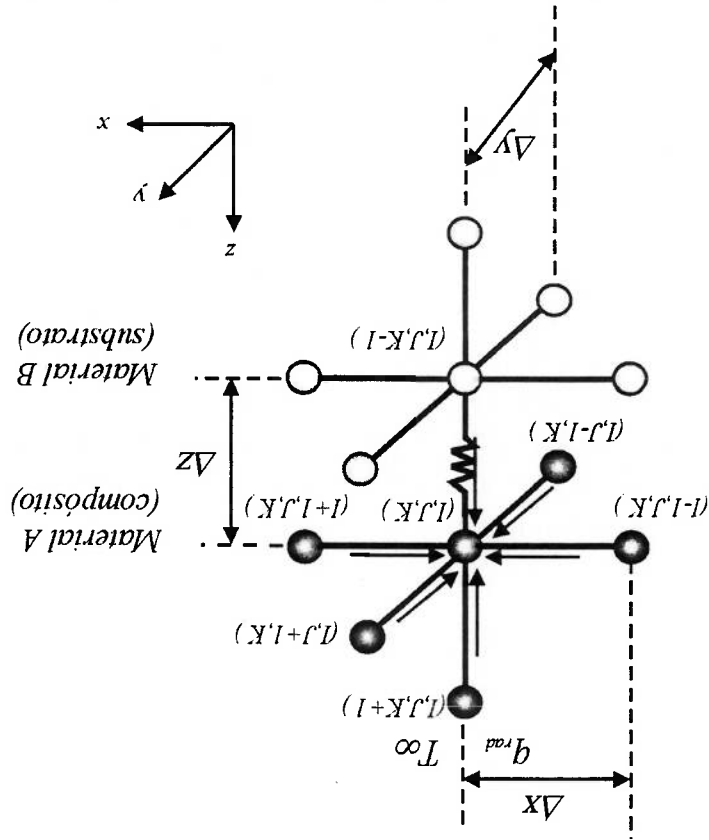


Figura 4.2 – Representação gráfica do balanço energético nos nós internos situados na face superior da placa onde se localiza o composto.

onde:
 Δt é a variação de tempo por passo de integração.
 Já, o Biot (Bi) do material A é dado por:

$$Fo_A = \frac{\lambda_A \Delta t}{(\Delta \Delta z)}, \quad (4.3)$$

Sabendo-se que Fourier (Fo_A) é dado por:

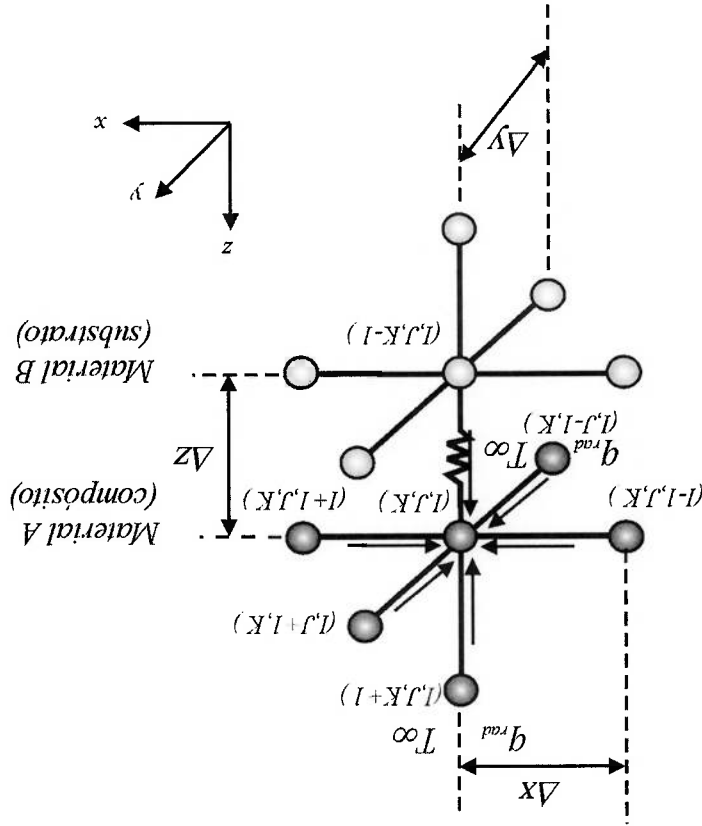
$$(4.2) \quad \frac{\Delta z}{\Delta z} (T_p^{(i-1,j,k)} - T_p^{(i,j,k)}) + \frac{\Delta z}{\Delta z} (T_p^{(i+1,j,k)} - T_p^{(i,j,k)}) + 2 \frac{k_A}{h} \Delta (T_\infty - T_p^{(i,j,k)}) + 2 \frac{k_A}{h} \Delta (T_{ex} - T_p^{(i,j,k)}) + \frac{2 \Delta (T_p^{(i,j,k-1)} - T_p^{(i,j,k)})}{\Delta z} + \frac{R_{i,c} k_A}{2 \Delta (T_p^{(i,j,k-1)} - T_p^{(i,j,k)})} q(\Delta \Delta z) = \frac{k_A \Delta t}{\rho_A c_p (\Delta \Delta z) (T_p^{(i,j,k)} - T_p^{(i,j,k)})} \Delta t$$

As propriedades acompanhadas do subscrito A relacionam-se ao composto de epóxi-ferrita. Considerando $\Delta = \Delta x = \Delta y$ e k_A constante em todas as direções, têm-se:

$$(4.1) \quad k_A \left(\frac{\Delta y}{\Delta z} (T_p^{(i-1,j,k)} - T_p^{(i,j,k)}) + \frac{\Delta x}{\Delta z} (T_p^{(i,j,k-1)} - T_p^{(i,j,k)}) \right) + \frac{\Delta y}{\Delta z} \left(\frac{\Delta x}{\Delta z} (T_p^{(i,j,k)} - T_p^{(i,j,k)}) + \frac{\Delta x}{\Delta z} (T_p^{(i,j,k)} - T_p^{(i,j,k)}) \right) + \frac{\Delta x}{\Delta z} \left(\frac{\Delta y}{\Delta z} (T_p^{(i,j,k)} - T_p^{(i,j,k)}) + \frac{\Delta x}{\Delta z} (T_p^{(i,j,k)} - T_p^{(i,j,k)}) \right) + \frac{R_{i,c} k_A}{2 \Delta (T_p^{(i,j,k-1)} - T_p^{(i,j,k)})} q(\Delta x \Delta y) = \frac{\Delta z}{\Delta z} \Delta y \Delta x \Delta y \frac{\Delta t}{\rho_A c_p (\Delta x \Delta y) (T_p^{(i,j,k)} - T_p^{(i,j,k)})}$$

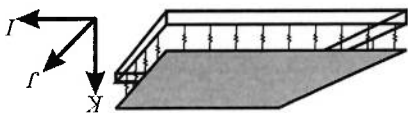
os nós internos é dada pela Eq. 4.1:
 A equação de conservação da energia térmica discretizada explicitamente para

Figura 4.3 – Representação gráfica do balanço energético nos nós situados na aresta frontal da placa onde se localiza o composto.



representados graficamente pela Fig. 4.3.

Os nós localizados na aresta frontal do composto epóxi-ferrita estão



Nós Internos

$$T_{p+1}^{(I,J,K)} = F_{0\lambda} \left[\frac{\Delta}{k} \left(T_p^{(I-1,J,K)} + T_p^{(I+1,J,K)} + T_p^{(I,J,K-1)} + T_p^{(I,J,K+1)} \right) + \frac{k_a R_{fc}}{q \Delta k} + \frac{k_a}{q \Delta k} \right] + \left(I - F_{0\lambda} \right) \left[2B_i T_{\infty} + 2 \frac{h}{k_a} \Delta + 2 \frac{k_a}{h} \Delta + 2 \frac{\Delta}{k} + 2 \frac{k_a R_{fc}}{\Delta} \right] T_p^{(I,J,K)} \tag{4.5}$$

A equação final discretizada fica sendo:

$$B_i^a = \frac{h \Delta}{k_a} \tag{4.4}$$

$$Biz_a = \frac{k_a}{h \Delta z} \quad (4.8)$$

Sendo Biot em função de Δz dado por:

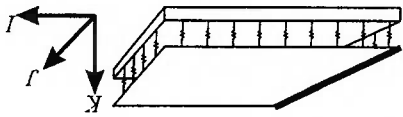
$$(4.7) \quad \frac{k_a}{\Delta z} \left(T_p^{(i-1,j,k)} - T_p^{(i,j,k)} \right) + \frac{\Delta}{\Delta z} \left(T_p^{(i+1,j,k)} - T_p^{(i,j,k)} \right) + 2 \frac{\Delta}{\Delta z} \left(T_p^{(i,j,k)} - T_p^{(i,j,k-1)} \right) + \frac{\Delta}{\Delta z} \left(T_p^{(i,j,k)} - T_p^{(i,j,k+1)} \right) + 2 \frac{h}{h} \Delta z \left(T_\infty - T_p^{(i,j,k)} \right) + 2 \frac{h}{h} \Delta z \left(T_{ex} - T_p^{(i,j,k)} \right) + 2 \frac{k_a}{h} \Delta \left(T_{ex} - T_p^{(i,j,k)} \right) + 2 \frac{k_a}{h} \Delta \left(T_\infty - T_p^{(i,j,k)} \right) + \frac{R_{i,c}}{q \Delta \Delta z} = \frac{\rho^{ac} p_a}{\Delta z} \left(\Delta \Delta z \right) \left(T_p^{(i,j,k)} - T_p^{(i,j,k-1)} \right) \Delta t$$

Simplificando, têm-se:

$$(4.6) \quad k_a \left(\frac{\Delta y}{\Delta z} \right) \left(\frac{\Delta x}{2} \right) \left(T_p^{(i-1,j,k)} - T_p^{(i,j,k)} \right) + k_a \left(\frac{\Delta x}{\Delta z} \right) \left(\frac{\Delta y}{2} \right) \left(T_p^{(i,j,k-1)} - T_p^{(i,j,k)} \right) + h_r \left(\frac{\Delta x}{\Delta z} \right) \left(T_{ex} - T_p^{(i,j,k)} \right) + h_r \left(\frac{\Delta y}{\Delta z} \right) \left(T_\infty - T_p^{(i,j,k)} \right) + \left(T_{ex} - T_p^{(i,j,k)} \right) + \left(T_\infty - T_p^{(i,j,k)} \right) + \frac{\Delta x}{\Delta z} \left(\frac{\Delta y}{\Delta z} \right) \left(\frac{\Delta x}{2} \right) \left(T_p^{(i,j,k)} - T_p^{(i,j,k-1)} \right) + \frac{\Delta x}{\Delta z} \left(\frac{\Delta y}{\Delta z} \right) \left(\frac{\Delta x}{2} \right) \left(T_p^{(i,j,k)} - T_p^{(i,j,k+1)} \right) + q \left(\frac{\Delta x}{\Delta z} \right) \left(\frac{\Delta y}{\Delta z} \right) \left(\frac{\Delta x}{2} \right) \left(T_p^{(i,j,k)} - T_p^{(i,j,k-1)} \right) + \frac{R_{i,c}}{\Delta t} = \rho^{ac} p_a \left(\Delta x \frac{\Delta y}{\Delta z} \right) \left(\frac{\Delta x}{2} \right) \left(T_p^{(i,j,k)} - T_p^{(i,j,k-1)} \right) \Delta t$$

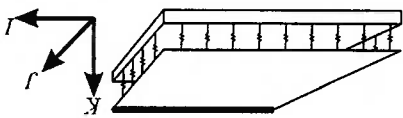
é dada pela Eq. 4.6:

A equação discretizada explicitamente para os nós da aresta frontal do composto



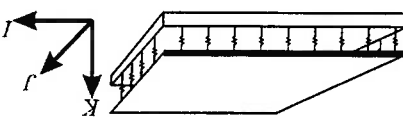
Nós da Aresta Frontal

$$T_{P+I}^{(i,j,k)} = Fo_A \left[\frac{\Delta z}{\Delta} (T_P^{(i-1,j,k)} + T_P^{(i+1,j,k)} + T_P^{(i,j-k)} + T_P^{(i,j+k)}) + 2(Biz_A + Bi_A) T_\infty + 2 \left(\frac{k_A}{h_r} \Delta z + \frac{k_A}{h_r} \Delta \right) T^{ext} + 2 \frac{k_A}{\Delta} \frac{R_{i,c}}{(T_P^{(i,j,k-1)})} + \frac{k_A}{q \Delta \Delta z} \right] + (I - Fo_A) (2Bi_A + 2Biz_A + T_{P+I}^{(i,j,k)}) \left(\frac{\Delta}{\Delta} + 2 \frac{k_A}{\Delta} R_{i,c} \right) \left(T_P^{(i,j,k)} \right) \quad (4.9)$$



Nós da Aresta Lateral Esquerda

$$T_{P+I}^{(i,j,k)} = Fo_A \left[\frac{\Delta z}{\Delta} (T_P^{(i-1,j,k)} + T_P^{(i+1,j,k)} + 2T_P^{(i,j,k)} + 2T_P^{(i,j-k)}) + 2(Biz_A + 2Bi_A) T_\infty + 2 \left(\frac{k_A}{h_r} \Delta z + \frac{k_A}{h_r} \Delta \right) T^{ext} + 2 \frac{k_A}{\Delta} \frac{R_{i,c}}{(T_P^{(i,j,k-1)})} + \frac{k_A}{q \Delta \Delta z} \right] + (I - Fo_A) (2Bi_A + 2Biz_A + T_{P+I}^{(i,j,k)}) \left(\frac{\Delta}{\Delta} + 2 \frac{k_A}{\Delta} R_{i,c} \right) \left(T_P^{(i,j,k)} \right) \quad (4.10)$$



Nós da Aresta Traseira

$$T_{P+I}^{(i,j,k)} = Fo_A \left[\frac{\Delta z}{\Delta} (T_P^{(i-1,j,k)} + T_P^{(i+1,j,k)} + T_P^{(i,j,k)} + T_P^{(i,j+k)}) + 2(Biz_A + 2Bi_A) T_\infty + 2 \left(\frac{k_A}{h_r} \Delta z + \frac{k_A}{h_r} \Delta \right) T^{ext} + 2 \frac{k_A}{\Delta} \frac{R_{i,c}}{(T_P^{(i,j,k-1)})} + \frac{k_A}{q \Delta \Delta z} \right] + (I - Fo_A) (2Bi_A + 2Biz_A + T_{P+I}^{(i,j,k)}) \left(\frac{\Delta}{\Delta} + 2 \frac{k_A}{\Delta} R_{i,c} \right) \left(T_P^{(i,j,k)} \right) \quad (4.11)$$

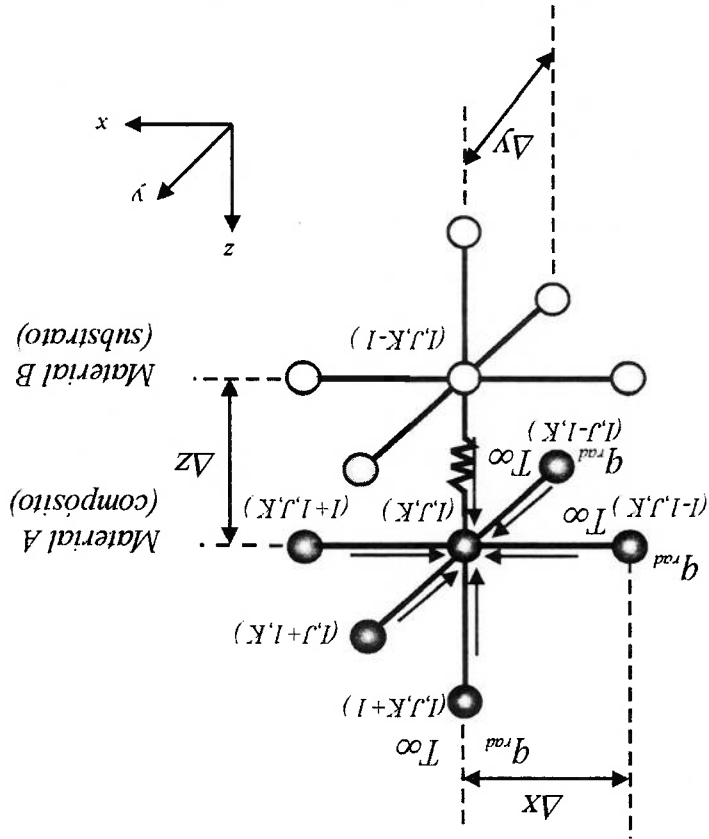
de condução e são dadas por:

Para as demais arestas, as equações sofrem apenas alterações nos termos

por:

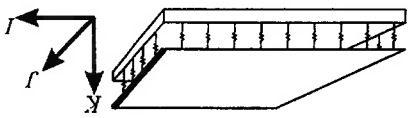
A equação discretizada final para os nós da aresta frontal do composto é dada

Figura 4.4 – Representação gráfica do balanço energético no vértice frontal esquerdo da placa onde se localiza o composto.



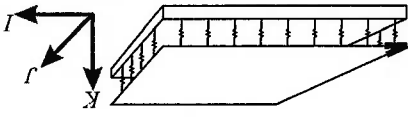
representação gráfica na Fig. 4.4.

Para os nós localizados nos vértices do composto epóxi – ferrita têm-se a



Nós da Aresta Lateral Direita

$$\begin{aligned}
 T_{(l,j,k)}^{P+1} = F_{0A} \left[\frac{\Delta z}{2} (2T_{(1-l,j,k)}^P + T_{(l,j-l,k)}^P + T_{(l,j+l,k)}^P) + 2(Biz_A + Bi^A)T_{\infty} + \right. \\
 \left. 2 \left(\frac{h_r}{k_A} \Delta z + \frac{k_A}{h_r} \Delta \right) T_{ex} + 2 \frac{k_A}{\Delta} (T_{(l,j,k-1)}^P) + \frac{q \Delta \Delta z}{k_A} \right] + (I - F_{0A})(2Bi^A + 2Biz_A + \\
 2 \frac{k_A}{h_r} (\Delta + \Delta z) + 4 \frac{\Delta}{\Delta z} + 2 \frac{k_A R_{t,c}}{\Delta}) \left(T_{(l,j,k)}^P \right)
 \end{aligned}
 \tag{4.12}$$



No do Vértice Frontal Esquerdo

$$(4.15) \quad T_{P+1}^{(I,J,K)} = F_{O^A} \left[2 \frac{\Delta z}{\Delta x} (T_P^{(I+1,J,K)} + T_P^{(I,J,K)}) + T_\infty^{(I,J,K)} \right] + 2B!_A^A + 4B!z_A^A + F_{O^A} \left[4 \frac{k_A}{h_r} \Delta z + 2 \frac{k_A}{h_r} \Delta x \right] \left(T_P^{(I,J,K)} - T_P^{(I,J,K-1)} \right) + \frac{q \Delta \Delta z}{\Delta x} \left(T_P^{(I,J,K-1)} + T_P^{(I,J,K)} \right) + (1 - F_{O^A}) (2B!_A^A + 4B!z_A^A + 4 \frac{k_A}{h_r} \Delta z + 2 \frac{k_A}{h_r} \Delta x) \left(T_P^{(I,J,K)} - T_P^{(I,J,K-1)} \right) + \frac{k_A R_{r,c}}{\Delta x} \left(T_P^{(I,J,K)} - T_P^{(I,J,K-1)} \right)$$

A equação final para o nó do vértice frontal esquerdo de composto é dada por:

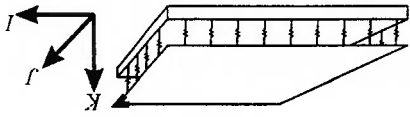
$$(4.14) \quad \frac{k_A}{q \Delta \Delta z} = \frac{k_A}{\Delta x} \frac{\Delta z}{\Delta x} \left(T_P^{(I+1,J,K)} - T_P^{(I,J,K)} \right) + 2 \frac{k_A}{h_r} \Delta z \left(T_P^{(I,J,K)} - T_P^{(I,J,K-1)} \right) + 2 \frac{k_A}{h_r} \Delta x \left(T_P^{(I,J,K)} - T_P^{(I,J,K-1)} \right) + \frac{k_A R_{r,c}}{\Delta x} \left(T_P^{(I,J,K)} - T_P^{(I,J,K-1)} \right) + 2 \frac{k_A}{h_r} \Delta z \left(T_P^{(I,J,K)} - T_P^{(I,J,K-1)} \right) + 2 \frac{k_A}{h_r} \Delta x \left(T_P^{(I,J,K)} - T_P^{(I,J,K-1)} \right) + \frac{k_A}{\Delta x} \frac{\Delta z}{\Delta x} \left(T_P^{(I+1,J,K)} - T_P^{(I,J,K)} \right) + 2 \frac{k_A}{h_r} \Delta z \left(T_P^{(I,J,K)} - T_P^{(I,J,K-1)} \right) + 2 \frac{k_A}{h_r} \Delta x \left(T_P^{(I,J,K)} - T_P^{(I,J,K-1)} \right) + \frac{k_A R_{r,c}}{\Delta x} \left(T_P^{(I,J,K)} - T_P^{(I,J,K-1)} \right)$$

Simplificando, tem-se:

$$(4.13) \quad \frac{k_A}{\Delta x} \left(\frac{\Delta z}{\Delta x} \frac{\Delta y}{\Delta z} \left(T_P^{(I+1,J,K)} - T_P^{(I,J,K)} \right) + \frac{\Delta x}{\Delta z} \left(T_P^{(I,J,K)} - T_P^{(I,J,K-1)} \right) \right) + h_r \left(\frac{\Delta z}{\Delta x} \frac{\Delta y}{\Delta z} \left(T_P^{(I,J,K)} - T_P^{(I,J,K-1)} \right) + h_r \left(T_P^{(I,J,K)} - T_P^{(I,J,K-1)} \right) \right) + h_r \left(\frac{\Delta z}{\Delta x} \frac{\Delta y}{\Delta z} \left(T_P^{(I,J,K)} - T_P^{(I,J,K-1)} \right) + h_r \left(T_P^{(I,J,K)} - T_P^{(I,J,K-1)} \right) \right) + \frac{q \Delta x \Delta y}{\Delta x \Delta y \Delta z} \left(T_P^{(I,J,K-1)} + T_P^{(I,J,K)} \right) + \frac{4R_{r,c}}{\Delta x} \left(T_P^{(I,J,K)} - T_P^{(I,J,K-1)} \right)$$

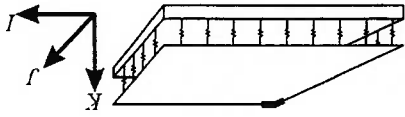
composto, é dada pela Eq. 4.13:

A equação discretizada explicitamente para o nó do vértice frontal esquerdo do



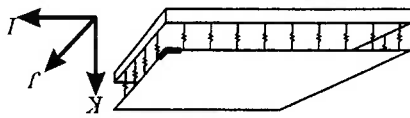
Nó do Vértice Traseiro Direito

$$T_{P+I}^{(I,J,K)} = Fo_A \left[2 \frac{\Delta}{\Delta z} (T_P^{(I+I,J,K)} + T_P^{(I,J-I,K)}) + T_\infty (4Biz_A + 2Bi_A) + \left(4 \frac{k_A}{h_r} \Delta z + 2 \frac{k_A}{h_r} \Delta \right) T^{ext} + 2 \frac{k_A}{\Delta} \frac{R_{r,c}}{(T_P^{(I,J,K-I)})} + \frac{q \Delta \Delta z}{k_A} \right] + (l - Fo_A) (2Bi_A + 4Biz_A + 4.18) \left(\frac{k_A}{h_r} (2\Delta + 4\Delta z) + 4 \frac{\Delta}{\Delta z} + 2 \frac{k_A R_{r,c}}{\Delta} \right) (T_P^{(I,J,K)})$$



Nó do Vértice Traseiro Esquerdo

$$T_{P+I}^{(I,J,K)} = Fo_A \left[2 \frac{\Delta}{\Delta z} (T_P^{(I+I,J,K)} + T_P^{(I,J-I,K)}) + T_\infty (4Biz_A + 2Bi_A) + \left(4 \frac{k_A}{h_r} \Delta z + 2 \frac{k_A}{h_r} \Delta \right) T^{ext} + 2 \frac{k_A}{\Delta} \frac{R_{r,c}}{(T_P^{(I,J,K-I)})} + \frac{q \Delta \Delta z}{k_A} \right] + (l - Fo_A) (2Bi_A + 4Biz_A + 4.17) \left(\frac{k_A}{h_r} (2\Delta + 4\Delta z) + 4 \frac{\Delta}{\Delta z} + 2 \frac{k_A R_{r,c}}{\Delta} \right) (T_P^{(I,J,K)})$$



Nó do Vértice Frontal Direito

$$T_{P+I}^{(I,J,K)} = Fo_A \left[2 \frac{\Delta}{\Delta z} (T_P^{(I-I,J,K)} + T_P^{(I,J+I,K)}) + T_\infty (4Biz_A + 2Bi_A) + \left(4 \frac{k_A}{h_r} \Delta z + 2 \frac{k_A}{h_r} \Delta \right) T^{ext} + 2 \frac{k_A}{\Delta} \frac{R_{r,c}}{(T_P^{(I,J,K-I)})} + \frac{q \Delta \Delta z}{k_A} \right] + (l - Fo_A) (2Bi_A + 4Biz_A + 4.16) \left(\frac{k_A}{h_r} (2\Delta + 4\Delta z) + 4 \frac{\Delta}{\Delta z} + 2 \frac{k_A R_{r,c}}{\Delta} \right) (T_P^{(I,J,K)})$$

termos de condução e são dadas por:

Para os demais vértices, as equações sofrem apenas algumas alterações nos

4.2.2 Discretização no substrato

Para o caso do substrato, as propriedades são acompanhadas do índice B e considerando também que $\Delta = \Delta x = \Delta y$ e k_B constante em todas as direções, tem-se o diagrama esquemático para a região de contato interno na Fig. 4.5.

A equação de conservação da energia térmica discretizada explicitamente para os nós internos da face superior do substrato é dada pela Eq. 4.19:

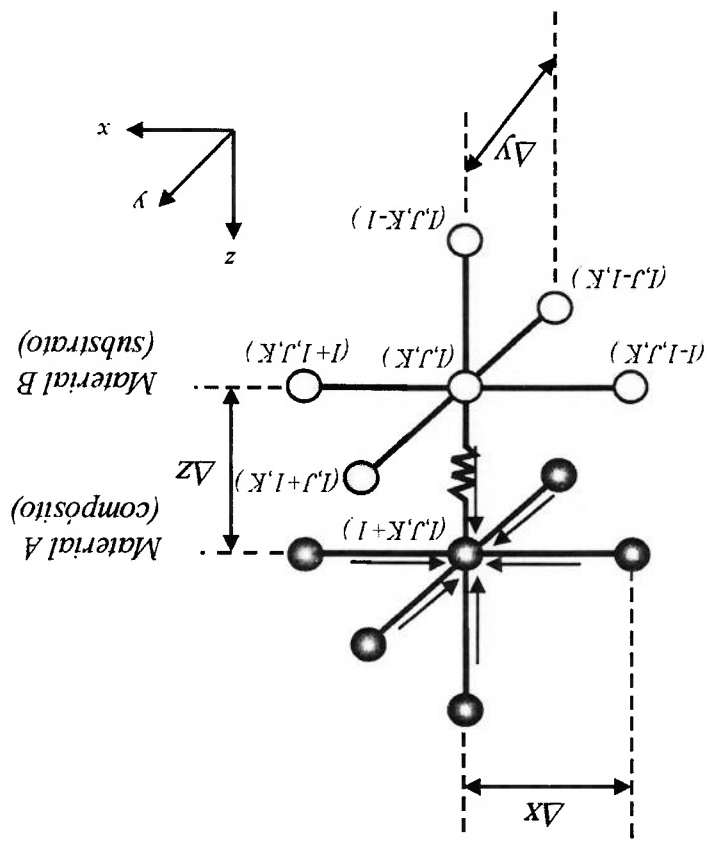


Figura 4.5 – Representação gráfica do balanço energético nos nós situados à face superior do substrato.

Portanto a equação discretizada para a face superior do substrato resume-se a:

$$Fo_B = \frac{\lambda_B \Delta z}{k_B} (\Delta \Delta z) \tag{4.21}$$

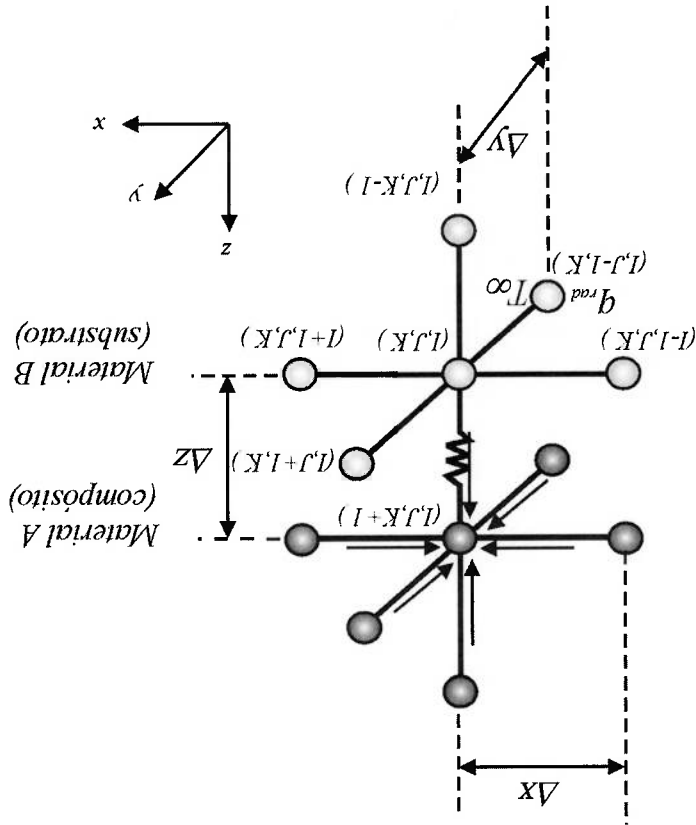
Sabendo-se que Fourier do material B (Fo_B) é dado por:

$$\frac{\Delta z}{k_B} (T_P^{(1-j,k)} - T_P^{(1+j,k)}) + \frac{\Delta z}{k_B} (T_P^{(1-j,k-1)} - T_P^{(1+j,k-1)}) + \frac{\Delta z}{k_B} (T_P^{(1,j,k+1)} - T_P^{(1,j,k)}) + \frac{\Delta z}{k_B} (T_P^{(1,j,k)} - T_P^{(1,j,k-1)}) + \frac{\Delta z}{k_B} (T_P^{(1+j,k)} - T_P^{(1-j,k)}) + \frac{\Delta z}{k_B} (T_P^{(1+j,k)} - T_P^{(1-j,k)}) = \frac{k_B}{\rho_B c_p} (\Delta \Delta z) \tag{4.20}$$

Simplificando a Eq. 4.19, tem-se:

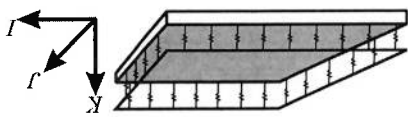
$$\frac{\Delta x}{k_B} (\Delta y \Delta z) (T_P^{(1-j,k)} - T_P^{(1+j,k)}) + \frac{\Delta y}{k_B} (\Delta x \Delta z) (T_P^{(1,j,k+1)} - T_P^{(1,j,k)}) + \frac{\Delta z}{k_B} (\Delta x \Delta y) (T_P^{(1,j,k-1)} - T_P^{(1,j,k)}) + \frac{R_{i,c}}{\Delta z} (\Delta x \Delta y \Delta z) (T_P^{(1+j,k)} - T_P^{(1-j,k)}) = \rho_B c_p (\Delta x \Delta y \Delta z) \tag{4.19}$$

Figura 4.6 – Representação gráfica do balanço energético nos nós situados na aresta superior frontal do substrato.



graticamente pela Fig. 4.6.

Os nós localizados na aresta superior frontal do substrato estão representados



Nós da Face Superior

$$T_{P+1}^{(l,j,k)} = F_{O_B} \left[\frac{\Delta z}{\Delta} \left(T_P^{(l-1,j,k)} + T_P^{(l+1,j,k)} + T_P^{(l,j-l,k)} + T_P^{(l,j+l,k)} \right) + \frac{\Delta z}{\Delta} T_P^{(l,j,k-1)} + \frac{\Delta z}{\Delta} T_P^{(l,j,k+1)} \right] + \left(1 - F_{O_B} \right) \left[\frac{\Delta z}{\Delta} + \frac{\Delta z}{\Delta} + \frac{\Delta z}{\Delta} + \frac{\Delta z}{\Delta} \right] \left(T_P^{(l,j,k)} \right) + \frac{k_B R_{fc}}{\Delta} T_P^{(l,j,k+1)} + q(\Delta z) \left[\frac{k_B}{\Delta} + \frac{k_B R_{fc}}{\Delta} \right] + \left(1 - F_{O_B} \right) \left[\frac{\Delta z}{\Delta} + \frac{\Delta z}{\Delta} + \frac{\Delta z}{\Delta} + \frac{\Delta z}{\Delta} \right] \left(T_P^{(l,j,k)} \right) \quad (4.22)$$

A equação discretizada final para os nós da face superior frontal do substrato é dada por:

$$B_{iz\ B} = \frac{k_B}{h\Delta z}. \quad (4.25)$$

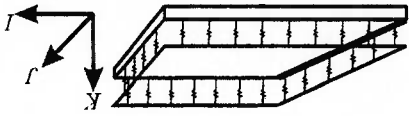
Sabendo-se que Biot (B_i) do material B em função de Δz é dado por:

$$\frac{k_B}{\Delta z} \left(T_p^{(i-1,j,k)} - T_p^{(i,j,k)} \right) + \frac{\Delta z}{2} \left(T_p^{(i-1,j,k)} - T_p^{(i,j,k)} \right) + 2 \frac{k_B}{h} \Delta z \left(T_{ex} - T_p^{(i,j,k)} \right) + \frac{k_B}{\Delta z} \left(T_p^{(i,j,k)} - T_p^{(i+1,j,k)} \right) + \frac{\Delta z}{2} \left(T_p^{(i+1,j,k)} - T_p^{(i,j,k)} \right) + \frac{k_B}{\Delta z} \left(T_p^{(i,j,k+1)} - T_p^{(i,j,k)} \right) + \frac{q\Delta z}{2} = \frac{k_B}{\Delta z} R_{ic}. \quad (4.24)$$

Simplificando, tem-se:

$$\frac{k_B}{\Delta z} \left(\frac{\Delta x \Delta z}{2} \left(T_{ex} - T_p^{(i,j,k)} \right) + h \left(\Delta x \Delta z \right) \left(T_{ex} - T_p^{(i,j,k)} \right) + \left(\frac{\Delta x \Delta y}{2} \right) \left(T_p^{(i,j,k+1)} - T_p^{(i,j,k)} \right) \right) + \frac{k_B}{\Delta z} \left(\Delta x \Delta z \right) \left(T_p^{(i,j,k+1)} - T_p^{(i,j,k)} \right) + k_B \left(\frac{\Delta y}{2} \Delta x \right) \left(T_p^{(i,j,k-1)} - T_p^{(i,j,k)} \right) + \frac{k_B}{\Delta z} \left(\frac{\Delta y}{2} \Delta z \right) \left(T_p^{(i-1,j,k)} - T_p^{(i,j,k)} \right) + k_B \left(\frac{\Delta x}{2} \Delta z \right) \left(T_p^{(i+1,j,k)} - T_p^{(i,j,k)} \right) + \frac{k_B}{\Delta z} \left(T_p^{(i,j,k+1)} - T_p^{(i,j,k)} \right) = \frac{k_B}{\Delta z} R_{ic}. \quad (4.23)$$

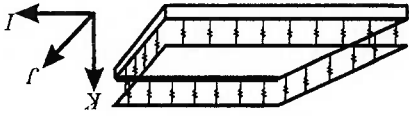
A equação discretizada explicitamente para os nós da aresta superior frontal do substrato é dada pela Eq. 4.23:



Nós da Aresta Superior Lateral Esquerda

$$T_{P+1}^{(i,j,k)} = Fo_B \left[\frac{\Delta z}{\Delta z} (T_P^{(i-1,j,k)} + T_P^{(i+1,j,k)} + T_P^{(i,j-1,k)} + T_P^{(i,j+1,k)}) + \frac{\Delta z}{\Delta z} T_P^{(i,j,k-1)} + 2Biz_B T_\infty + 2 \frac{k_B}{h_r} \Delta z T_{ext} + \frac{k_B}{\Delta} (T_P^{(i,j,k+1)}) + \frac{k_B R_{i,c}}{k_B R_{i,c}} \left(\frac{\Delta}{T_P^{(i,j,k)}} \right) \right] + (1 - Fo_B) \left[\frac{k_B}{q \Delta \Delta z} + \frac{k_B}{\Delta} \left(\frac{\Delta}{\Delta z} + 4 \frac{\Delta}{\Delta z} + \frac{\Delta}{\Delta z} + \frac{\Delta}{\Delta z} \right) \right] + \frac{k_B}{h_r} \Delta z T_{ext} + \frac{k_B}{\Delta} (T_P^{(i,j,k+1)}) + \frac{k_B R_{i,c}}{k_B R_{i,c}} \left(\frac{\Delta}{T_P^{(i,j,k)}} \right)$$

(4.28)



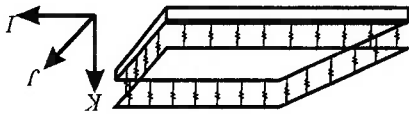
Nós da Aresta Superior Traseira

$$T_{P+1}^{(i,j,k)} = Fo_B \left[\frac{\Delta z}{\Delta z} (T_P^{(i-1,j,k)} + T_P^{(i+1,j,k)} + T_P^{(i,j-1,k)} + T_P^{(i,j+1,k)}) + \frac{\Delta z}{\Delta z} T_P^{(i,j,k-1)} + 2Biz_B T_\infty + 2 \frac{k_B}{h_r} \Delta z T_{ext} + \frac{k_B}{\Delta} (T_P^{(i,j,k+1)}) + \frac{k_B R_{i,c}}{k_B R_{i,c}} \left(\frac{\Delta}{T_P^{(i,j,k)}} \right) \right] + (1 - Fo_B) \left[\frac{k_B}{q \Delta \Delta z} + \frac{k_B}{\Delta} \left(\frac{\Delta}{\Delta z} + 4 \frac{\Delta}{\Delta z} + \frac{\Delta}{\Delta z} + \frac{\Delta}{\Delta z} \right) \right] + \frac{k_B}{h_r} \Delta z T_{ext} + \frac{k_B}{\Delta} (T_P^{(i,j,k+1)}) + \frac{k_B R_{i,c}}{k_B R_{i,c}} \left(\frac{\Delta}{T_P^{(i,j,k)}} \right)$$

(4.27)

discretizadas são dadas por:

Para as demais arestas do substrato que se encontram em contato com o composto através do modelo da resistência térmica de contato, as equações

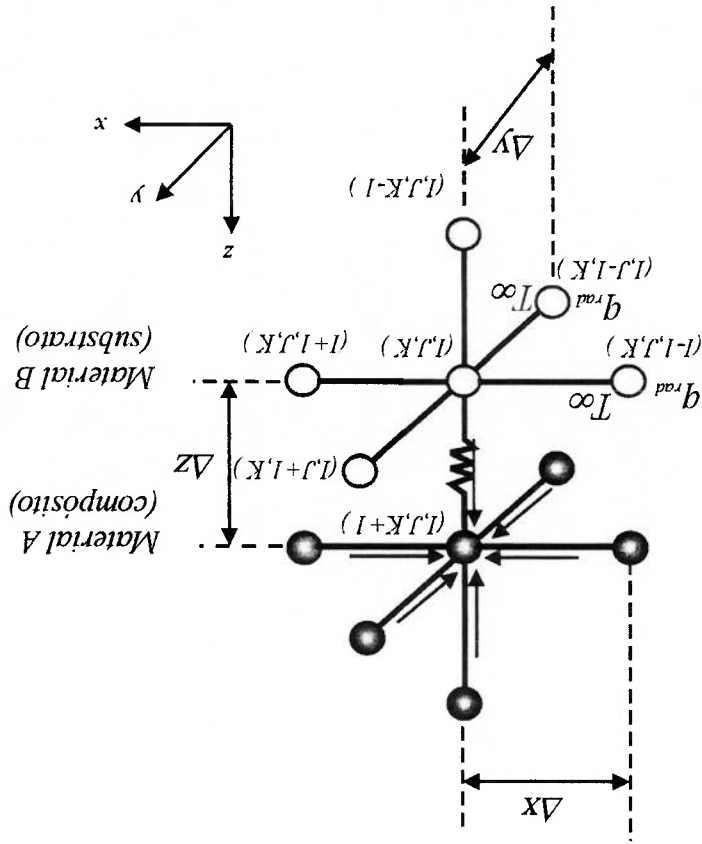


Nós da Aresta Superior Frontal

$$T_{P+1}^{(i,j,k)} = Fo_B \left[\frac{\Delta z}{\Delta z} (T_P^{(i-1,j,k)} + T_P^{(i+1,j,k)} + T_P^{(i,j-1,k)} + T_P^{(i,j+1,k)}) + \frac{\Delta z}{\Delta z} T_P^{(i,j,k-1)} + 2Biz_B T_\infty + 2 \frac{k_B}{h_r} \Delta z T_{ext} + \frac{k_B}{\Delta} (T_P^{(i,j,k+1)}) + \frac{k_B R_{i,c}}{k_B R_{i,c}} \left(\frac{\Delta}{T_P^{(i,j,k)}} \right) \right] + (1 - Fo_B) \left[\frac{k_B}{q \Delta \Delta z} + \frac{k_B}{\Delta} \left(\frac{\Delta}{\Delta z} + 4 \frac{\Delta}{\Delta z} + \frac{\Delta}{\Delta z} + \frac{\Delta}{\Delta z} \right) \right] + \frac{k_B}{h_r} \Delta z T_{ext} + \frac{k_B}{\Delta} (T_P^{(i,j,k+1)}) + \frac{k_B R_{i,c}}{k_B R_{i,c}} \left(\frac{\Delta}{T_P^{(i,j,k)}} \right)$$

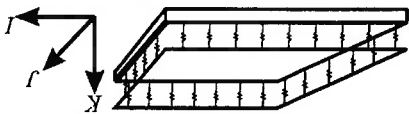
(4.26)

Figura 4.7 – Representação gráfica do balanço energético no nó situado no vértice frontal esquerdo do substrato.



representação gráfica na Fig. 4.7.

Para o nó localizado no vértice frontal esquerdo do substrato tem-se a



Nós da Aresta Superior Lateral Direita

$$T_{P+1}^{(I,J,K)} = F_{O_B} \left[\frac{\Delta z}{\Delta} (2T_P^{(I-1,J,K)} + T_P^{(I,J-1,K)} + T_P^{(I,J,K-1)}) + \frac{\Delta z}{\Delta} T_P^{(I,J,K-1)} + 2Biz_B T_\infty + \frac{\Delta}{\Delta z} \left(2h_r \Delta z T_{exi} + k_B \frac{R_{r,c}}{T_P^{(I,J,K)}} \right) + \frac{\Delta}{\Delta z} \left(T_P^{(I,J,K+1)} \right) + \frac{q \Delta z}{k_B} \right] + (1 - F_{O_B}) \left(2Biz_B + 2 \frac{k_B}{h_r} \Delta z + 4 \frac{\Delta}{\Delta z} + \frac{\Delta}{\Delta z} \right) \quad (4.29)$$

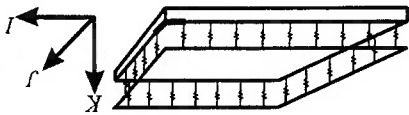
A equação para o nó do vértice frontal esquerdo do substrato é dada por:

$$(4.31) \quad \frac{k_B}{q \Delta z} \frac{\partial^2 c_{p_a}}{\partial z^2} = \frac{k_B}{\Delta t} \frac{\Delta z}{(T_p^{(l,j,k)} - T_p^{(l,j,k+1)})} + \frac{k_B}{h} \Delta z (T_p^\infty - T_p^{(l,j,k)}) + 2 \frac{k_B}{h_r} \Delta z (T_p^\infty - T_p^{(l,j,k)}) + \frac{k_B}{\Delta} \frac{\Delta z}{(T_p^{(l,j,k-1)} - T_p^{(l,j,k)})} + 2 \frac{k_B}{h} \Delta z (T_p^\infty - T_p^{(l,j,k)}) + 2 \frac{k_B}{h_r} \Delta z (T_p^\infty - T_p^{(l,j,k)}) + \frac{\Delta z}{\Delta} \frac{\Delta z}{(T_p^{(l,j,k)} - T_p^{(l,j+1,k)})} + 2 \frac{\Delta z}{\Delta} \frac{\Delta z}{(T_p^{(l,j,k)} - T_p^{(l,j,k)})} +$$

Simplificando, tem-se:

$$(4.30) \quad \left(\frac{\Delta x \Delta y}{\Delta z} \frac{\partial^2 c_{p_a}}{\partial z^2} \right) = q \left(\frac{4}{(T_p^{(l,j,k+1)} - T_p^{(l,j,k)})} + \frac{R_{i,c}}{(T_p^{(l,j,k)} - T_p^{(l,j,k+1)})} \right) + h_r \left(\frac{\Delta x}{\Delta y} \Delta z \right) (T_p^\infty - T_p^{(l,j,k)}) + h \left(\frac{\Delta y}{\Delta z} \Delta z \right) (T_p^\infty - T_p^{(l,j,k)}) + \frac{k_B}{\Delta} \left(\frac{\Delta x}{\Delta y} \frac{\Delta z}{\Delta z} \right) \frac{\Delta z}{(T_p^{(l,j,k-1)} - T_p^{(l,j,k)})} + h \left(\frac{\Delta x}{\Delta z} \Delta z \right) (T_p^\infty - T_p^{(l,j,k)}) + \frac{k_B}{\Delta y} \Delta z \left(\frac{\Delta x}{\Delta z} \Delta z \right) \frac{\Delta z}{(T_p^{(l,j,k)} - T_p^{(l,j+1,k)})} + k_B \left(\frac{\Delta x}{\Delta z} \Delta z \right) \frac{\Delta z}{(T_p^{(l,j,k)} - T_p^{(l,j,k)})} +$$

A equação discretizada explicitamente para o nó do vértice superior frontal esquerdo do substrato é dada pela Eq. 4.30:

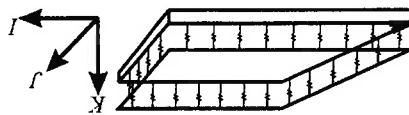


Nó do Vértice Superior Frontal Direito

$$T_{P+1}^{(i,j,k)} = Fo_B \left[2 \frac{\Delta z}{\Delta} (T_P^{(i-1,j,k)} + T_P^{(i,j+1,k)}) + T_P^{(i,j+k-1)} + \frac{\Delta z}{\Delta} T_P^{(i,j,k-1)} + 4Biz_B T_\infty + \frac{4}{h_r} k_B \Delta z T_{ex} + \frac{k_B}{\Delta} (T_P^{(i,j,k+1)}) + \frac{q \Delta z}{k_B} + (1 - Fo_B) \left(4Biz_B + 4 \frac{k_B}{h_r} \Delta z + \frac{4}{\Delta} \frac{\Delta z}{\Delta} + \frac{\Delta z}{\Delta} + \frac{k_B R_{i,c}}{\Delta} \right) \right] T_P^{(i,j,k)} \quad (4.33)$$

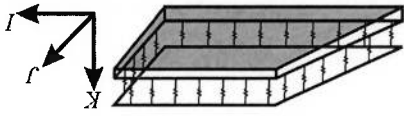
por:

Para os demais vértices da face superior do substrato, as equações sofrem apenas algumas alterações nos termos de condução de acordo com a localização e são dadas



Nó do Vértice Superior Frontal Esquerdo

$$T_{P+1}^{(i,j,k)} = Fo_B \left[2 \frac{\Delta z}{\Delta} (T_P^{(i+1,j,k)} + T_P^{(i,j+1,k)}) + T_P^{(i,j+k-1)} + \frac{\Delta z}{\Delta} T_P^{(i,j,k-1)} + 4Biz_B T_\infty + \frac{4}{h_r} k_B \Delta z T_{ex} + \frac{k_B}{\Delta} (T_P^{(i,j,k+1)}) + \frac{q \Delta z}{k_B} + (1 - Fo_B) \left(4Biz_B + 4 \frac{k_B}{h_r} \Delta z + \frac{4}{\Delta} \frac{\Delta z}{\Delta} + \frac{\Delta z}{\Delta} + \frac{k_B R_{i,c}}{\Delta} \right) \right] T_P^{(i,j,k)} \quad (4.32)$$

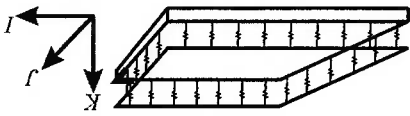


Nós da Face Inferior

$$T_{P+1}^{(i,j,k)} = Fo_B \left[\frac{\Delta}{\Delta z} \left(T_P^{(i-1,j,k)} + T_P^{(i+1,j,k)} + T_P^{(i,j-1,k)} + T_P^{(i,j+1,k)} \right) + 2 \frac{\Delta z}{\Delta} T_P^{(i,j,k+1)} + \frac{\Delta}{\Delta z} + \frac{\Delta z}{\Delta} + 2 \frac{k_B}{h_r} \Delta T^{ex} + 2 Fo_B T_\infty + 2 \frac{k_B}{h_r} \Delta T^{ex} \right] + (1 - Fo_B) \left(2 Bi + 2 \frac{k_B}{h_r} \Delta + 4 \frac{\Delta}{\Delta z} + 2 \frac{\Delta z}{\Delta} \right) T_P^{(i,j,k)} \quad (4.36)$$

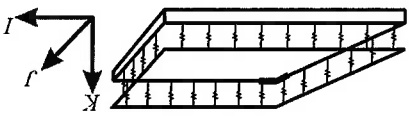
por:

Para as demais faces do substrato não se faz necessária a representação gráfica e a consequente dedução da equação discretizada, pois seguem o mesmo raciocínio dos apresentados. Portanto, para a face inferior do substrato, a equação discretizada é dada



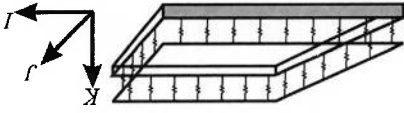
Nó do Vértice Superior Traseiro Direito

$$T_{P+1}^{(i,j,k)} = Fo_B \left[2 \frac{\Delta}{\Delta z} \left(T_P^{(i-1,j,k)} + T_P^{(i,j-1,k)} \right) + \frac{\Delta z}{\Delta} T_P^{(i,j,k-1)} + 4 Bi z_B + 4 \frac{k_B}{h_r} \Delta z + \frac{4}{h_r} \Delta z T^{ex} + \frac{k_B}{\Delta} \left(T_P^{(i,j,k+1)} \right) + \frac{k_B}{R_{i,c}} \right] + (1 - Fo_B) \left(4 Bi z_B + 4 \frac{k_B}{h_r} \Delta z + \frac{4}{\Delta z} + \frac{\Delta}{\Delta z} + \frac{\Delta z}{\Delta} + k_B R_{i,c} \right) T_P^{(i,j,k)} \quad (4.35)$$



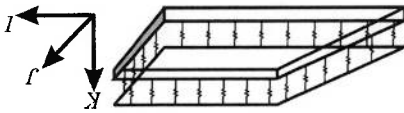
Nó do Vértice Superior Traseiro Esquerdo

$$T_{P+1}^{(i,j,k)} = Fo_B \left[2 \frac{\Delta}{\Delta z} \left(T_P^{(i+1,j,k)} + T_P^{(i,j-1,k)} \right) + \frac{\Delta z}{\Delta} T_P^{(i,j,k-1)} + 4 Bi z_B + 4 \frac{k_B}{h_r} \Delta z + \frac{4}{h_r} \Delta z T^{ex} + \frac{k_B}{\Delta} \left(T_P^{(i,j,k+1)} \right) + \frac{k_B}{R_{i,c}} \right] + (1 - Fo_B) \left(4 Bi z_B + 4 \frac{k_B}{h_r} \Delta z + \frac{4}{\Delta z} + \frac{\Delta}{\Delta z} + \frac{\Delta z}{\Delta} + k_B R_{i,c} \right) T_P^{(i,j,k)} \quad (4.34)$$



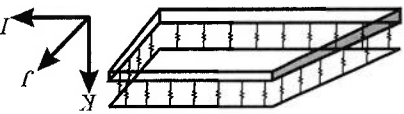
Nós da Face Frontal

$$(4.39) \quad T_{(i,j,k)}^{p+1} = F_{oB} \left[\frac{\Delta z}{\Delta} \left(T_P^{(i-1,j,k)} \right) + \left(T_P^{(i,j+1,k)} \right) + 2 \left(T_P^{(i,j,k)} \right) + \left(T_P^{(i,j,k-1)} \right) + \left(T_P^{(i,j,k+1)} \right) \right] + \frac{k}{q(\Delta \Delta z)} + 2Biz_B T_\infty + 2 \frac{k_B}{h_r} \Delta z T_{ext} \left[+ \left(1 - F_{oB} \right) \left(2Biz_B + 2 \frac{k_B}{h_r} \Delta z + 4 \frac{\Delta}{\Delta z} + 2 \frac{\Delta z}{\Delta} \right) \right] T_P^{(i,j,k)}$$



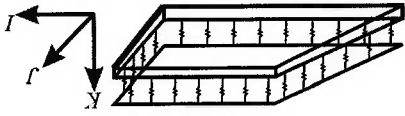
Nós da Face Lateral Direita

$$(4.38) \quad T_{(i,j,k)}^{p+1} = F_{oB} \left[\frac{\Delta z}{\Delta} \left(T_P^{(i,j-1,k)} \right) + \left(T_P^{(i,j+1,k)} \right) + 2 \left(T_P^{(i,j,k)} \right) + \left(T_P^{(i,j,k-1)} \right) + \left(T_P^{(i,j,k+1)} \right) \right] + \frac{k}{q(\Delta \Delta z)} + 2Biz_B T_\infty + 2 \frac{k_B}{h_r} \Delta z T_{ext} \left[+ \left(1 - F_{oB} \right) \left(2Biz_B + 2 \frac{k_B}{h_r} \Delta z + 4 \frac{\Delta}{\Delta z} + 2 \frac{\Delta z}{\Delta} \right) \right] T_P^{(i,j,k)}$$



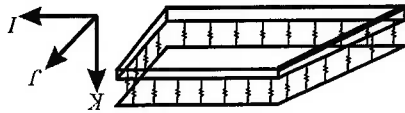
Nós da Face Lateral Esquerda

$$(4.37) \quad T_{(i,j,k)}^{p+1} = F_{oB} \left[\frac{\Delta z}{\Delta} \left(T_P^{(i,j-1,k)} \right) + \left(T_P^{(i,j+1,k)} \right) + 2 \left(T_P^{(i,j,k)} \right) + \left(T_P^{(i,j,k-1)} \right) + \left(T_P^{(i,j,k+1)} \right) \right] + \frac{k}{q(\Delta \Delta z)} + 2Biz_B T_\infty + 2 \frac{k_B}{h_r} \Delta z T_{ext} \left[+ \left(1 - F_{oB} \right) \left(2Biz_B + 2 \frac{k_B}{h_r} \Delta z + 4 \frac{\Delta}{\Delta z} + 2 \frac{\Delta z}{\Delta} \right) \right] T_P^{(i,j,k)}$$



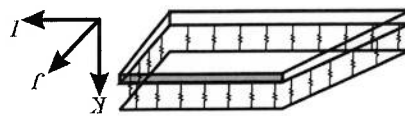
Nós da Aresta Inferior Direita

$$T_{P+1}^{(i,j,k)} = FO_B \left[\frac{\Delta z}{\Delta} (2T_P^{(i-1,j,k)}) + (T_P^{(i,j+1,k)}) + \frac{\Delta z}{\Delta} (T_P^{(i,j,k+1)}) + \frac{k}{q(\Delta z)} + \frac{\Delta z}{\Delta} + 2 \frac{\Delta z}{\Delta} T_P^{(i,j,k)} \right] + 2BI_B T_\infty + 2 \frac{k_B}{h_r} \Delta z T_{\text{ext}} + (1 - FO_B) \left[2BI_B + 2BI_B z_B + 2 \frac{k_B}{h_r} (\Delta + \Delta z) + \frac{\Delta z}{\Delta} + 2 \frac{\Delta z}{\Delta} T_P^{(i,j,k)} \right] \quad (4.42)$$



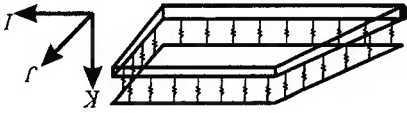
Nós da Aresta Inferior Esquerda

$$T_{P+1}^{(i,j,k)} = FO_B \left[\frac{\Delta z}{\Delta} (2T_P^{(i+1,j,k)}) + (T_P^{(i,j-1,k)}) + \frac{\Delta z}{\Delta} (T_P^{(i,j,k+1)}) + \frac{k}{q(\Delta z)} + \frac{\Delta z}{\Delta} + 2 \frac{\Delta z}{\Delta} T_P^{(i,j,k)} \right] + 2BI_B T_\infty + 2 \frac{k_B}{h_r} \Delta z T_{\text{ext}} + (1 - FO_B) \left[2BI_B + 2BI_B z_B + 2 \frac{k_B}{h_r} (\Delta + \Delta z) + \frac{\Delta z}{\Delta} + 2 \frac{\Delta z}{\Delta} T_P^{(i,j,k)} \right] \quad (4.41)$$



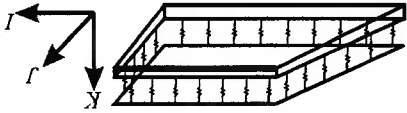
Nós da Face Traseira

$$T_{P+1}^{(i,j,k)} = FO_B \left[\frac{\Delta z}{\Delta} (T_P^{(i-1,j,k)}) + (T_P^{(i,j,k-1)}) + \frac{\Delta z}{\Delta} (T_P^{(i,j,k+1)}) + \frac{k}{q(\Delta z)} + \frac{\Delta z}{\Delta} + 2 \frac{\Delta z}{\Delta} T_P^{(i,j,k)} \right] + \left(1 - FO_B \right) \left[2BI_B z_B + 2 \frac{k_B}{h_r} \Delta z + 4 \frac{\Delta z}{\Delta} + 2 \frac{\Delta z}{\Delta} T_P^{(i,j,k)} \right] \quad (4.40)$$



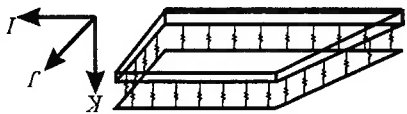
Nós da Aresta Frontal Lateral Esquerda

$$(4.45) \quad T_{P+1}^{(I,J,K)} = Fo_B \left[2 \frac{\Delta z}{\Delta} \left(T_P^{(I+1,J,K)} \right) + \left(T_P^{(I,J,K-1)} \right) + \left(T_P^{(I,J,K+1)} \right) \right] + \frac{\Delta z}{q(\Delta \Delta z)} + 4Bi_z z_B T_\infty + 4 \frac{k_B}{h_r} \Delta z T_{ex} \left[\left(1 - Fo_B \right) \left(4Bi_z z_B + 4 \frac{k_B}{h_r} \Delta z + 4 \frac{\Delta}{\Delta z} + 2 \frac{\Delta}{\Delta} \right) T_P^{(I,J,K)} \right]$$



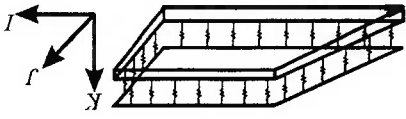
Nós da Aresta Inferior Traseira

$$(4.44) \quad T_{P+1}^{(I,J,K)} = Fo_B \left[\frac{\Delta z}{\Delta} \left(T_P^{(I-1,J,K)} \right) + 2 \left(T_P^{(I,J-1,K)} \right) + 2 \frac{\Delta z}{\Delta} \left(T_P^{(I,J,K+1)} \right) + \frac{k}{q(\Delta \Delta z)} + 2Bi_z z_B T_\infty + 2 \frac{k_B}{h_r} \Delta z T_{ex} \left[\left(1 - Fo_B \right) \left(2Bi_z z_B + 2Bi_z z_B + 2 \frac{k_B}{h_r} \Delta z T_\infty + 2Bi_z z_B T_\infty + 2 \frac{k_B}{h_r} \Delta z T_{ex} \right) \right] + \left(\Delta + \Delta z \right) \right]$$



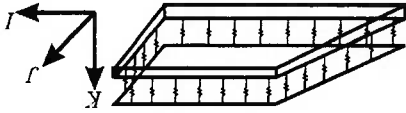
Nós da Aresta Inferior Frontal

$$(4.43) \quad T_{P+1}^{(I,J,K)} = Fo_B \left[\frac{\Delta z}{\Delta} \left(T_P^{(I-1,J,K)} \right) + \left(T_P^{(I,J-1,K)} \right) + 2 \left(T_P^{(I,J,K+1)} \right) \right] + \frac{k}{q(\Delta \Delta z)} + 2Bi_z z_B T_\infty + 2 \frac{k_B}{h_r} \Delta z T_{ex} \left[\left(1 - Fo_B \right) \left(2Bi_z z_B + 2Bi_z z_B + 2 \frac{k_B}{h_r} \Delta z T_\infty + 2 \frac{k_B}{h_r} \Delta z T_{ex} \right) \right] + \left(\Delta + \Delta z \right) + 4 \frac{\Delta}{\Delta z} + 2 \frac{\Delta}{\Delta} T_P^{(I,J,K)}$$



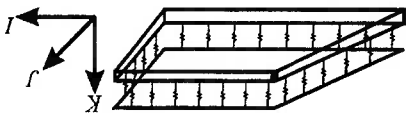
Nó do Vértice Inferior Frontal Esquerdo

$$T_{P+1}^{(IJ,K)} = Fo_B \left[2 \frac{\Delta}{\Delta z} \left(T_P^{(I+1,J,K)} \right) + \left(T_P^{(I,J,K-1)} \right) + \frac{\Delta z}{\Delta} \left(T_P^{(I,J,K+1)} \right) \right] + 4Bz_B T_\infty + \frac{4}{h_r} \Delta z T_{ex}^{k_B} + 2Bz_B T_\infty + 2 \frac{k_B}{h_r} \Delta T_{ex} + \frac{k}{q(\Delta \Delta z)} \left[(1 - Fo_B)(4Bz_B + 2Bz_B) + \left(T_P^{(IJ,K)} \right) \left(\frac{\Delta}{\Delta} + 2 \frac{\Delta}{\Delta z} + 4 \frac{\Delta}{\Delta z} + 2 \Delta \right) + \frac{k_B}{h_r} (4 \Delta z + 2 \Delta) \right] \quad (4.49)$$



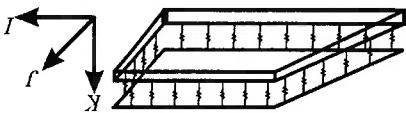
Nós da Aresta Traseira Lateral Direita

$$T_{P+1}^{(IJ,K)} = Fo_B \left[2 \frac{\Delta}{\Delta z} \left(T_P^{(I-1,J,K)} \right) + \left(T_P^{(I,J,K-1)} \right) + \frac{\Delta z}{\Delta} \left(T_P^{(I,J,K+1)} \right) \right] + \frac{4}{h_r} \Delta z T_{ex}^{k_B} + \left(1 - Fo_B \right) \left(4Bz_B + 4 \frac{k_B}{h_r} \Delta z + 4 \frac{\Delta}{\Delta z} + 2 \frac{\Delta}{\Delta} \right) \left(T_P^{(IJ,K)} \right) + \frac{k}{q(\Delta \Delta z)} + 4Bz_B T_\infty \quad (4.48)$$



Nós da Aresta Traseira Lateral Esquerda

$$T_{P+1}^{(IJ,K)} = Fo_B \left[2 \frac{\Delta}{\Delta z} \left(T_P^{(I+1,J,K)} \right) + \left(T_P^{(I,J,K-1)} \right) + \frac{\Delta z}{\Delta} \left(T_P^{(I,J,K+1)} \right) \right] + \frac{4}{h_r} \Delta z T_{ex}^{k_B} + \left(1 - Fo_B \right) \left(4Bz_B + 4 \frac{k_B}{h_r} \Delta z + 4 \frac{\Delta}{\Delta z} + 2 \frac{\Delta}{\Delta} \right) \left(T_P^{(IJ,K)} \right) + \frac{k}{q(\Delta \Delta z)} + 4Bz_B T_\infty \quad (4.47)$$

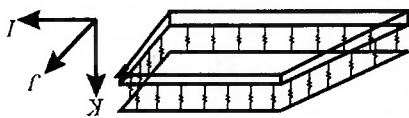


Nós da Aresta Frontal Lateral Direita

$$T_{P+1}^{(IJ,K)} = Fo_B \left[2 \frac{\Delta}{\Delta z} \left(T_P^{(I-1,J,K)} \right) + \left(T_P^{(I,J,K-1)} \right) + \frac{\Delta z}{\Delta} \left(T_P^{(I,J,K+1)} \right) \right] + \frac{4}{h_r} \Delta z T_{ex}^{k_B} + \left(1 - Fo_B \right) \left(4Bz_B + 4 \frac{k_B}{h_r} \Delta z + 4 \frac{\Delta}{\Delta z} + 2 \frac{\Delta}{\Delta} \right) \left(T_P^{(IJ,K)} \right) + \frac{k}{q(\Delta \Delta z)} + 4Bz_B T_\infty \quad (4.46)$$

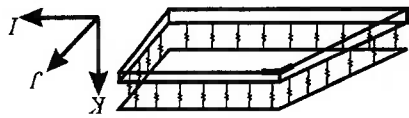
esquemático dado pela Fig. 4.8.

E por último para os nós localizados no interior do substrato, tem-se o diagrama



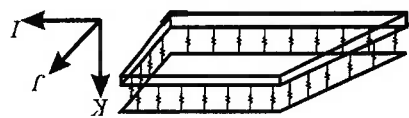
Nó do Vértice Inferior Traseiro Direito

$$T_{P+1}^{(I,J,K)} = Fo_B \left[2 \frac{\Delta z}{\Delta z} \left(T_P^{(I-1,J,K)} \right) + \left(T_P^{(I,J-1,K)} \right) + \left(T_P^{(I,J,K+1)} \right) + 4Bi_B T_\infty + \frac{4}{h_r} \Delta z T_{ex} + 2Bi_B T_\infty + 2 \frac{k_B}{h_r} \Delta T_{ex} + \frac{k}{q(\Delta \Delta z)} \right] + (1 - Fo_B) (4Bi_B + 2Bi_B + \frac{k_B}{h_r} \Delta z T_{ex} + 2Bi_B T_\infty + 2 \frac{k_B}{h_r} \Delta T_{ex} + \frac{k}{q(\Delta \Delta z)}) \left(T_P^{(I,J,K)} \right) \left(\frac{\Delta}{\Delta z} + 2 \frac{\Delta}{\Delta z} + 4 \frac{\Delta}{\Delta z} + 2 \Delta \right) + 4 \frac{\Delta}{\Delta z} + 2 \frac{\Delta}{\Delta z} \left(T_P^{(I,J,K)} \right) \quad (4.52)$$



Nó do Vértice Inferior Traseiro Esquerdo

$$T_{P+1}^{(I,J,K)} = Fo_B \left[2 \frac{\Delta z}{\Delta z} \left(T_P^{(I+1,J,K)} \right) + \left(T_P^{(I,J-1,K)} \right) + \left(T_P^{(I,J,K+1)} \right) + 4Bi_B T_\infty + \frac{4}{h_r} \Delta z T_{ex} + 2Bi_B T_\infty + 2 \frac{k_B}{h_r} \Delta T_{ex} + \frac{k}{q(\Delta \Delta z)} \right] + (1 - Fo_B) (4Bi_B + 2Bi_B + \frac{k_B}{h_r} \Delta z T_{ex} + 2Bi_B T_\infty + 2 \frac{k_B}{h_r} \Delta T_{ex} + \frac{k}{q(\Delta \Delta z)}) \left(T_P^{(I,J,K)} \right) \left(\frac{\Delta}{\Delta z} + 2 \frac{\Delta}{\Delta z} + 4 \frac{\Delta}{\Delta z} + 2 \Delta \right) + 4 \frac{\Delta}{\Delta z} + 2 \frac{\Delta}{\Delta z} \left(T_P^{(I,J,K)} \right) \quad (4.51)$$



Nó do Vértice Inferior Frontal Direito

$$T_{P+1}^{(I,J,K)} = Fo_B \left[2 \frac{\Delta z}{\Delta z} \left(T_P^{(I-1,J,K)} \right) + \left(T_P^{(I,J+1,K)} \right) + \left(T_P^{(I,J,K+1)} \right) + 4Bi_B T_\infty + \frac{4}{h_r} \Delta z T_{ex} + 2Bi_B T_\infty + 2 \frac{k_B}{h_r} \Delta T_{ex} + \frac{k}{q(\Delta \Delta z)} \right] + (1 - Fo_B) (4Bi_B + 2Bi_B + \frac{k_B}{h_r} \Delta z T_{ex} + 2Bi_B T_\infty + 2 \frac{k_B}{h_r} \Delta T_{ex} + \frac{k}{q(\Delta \Delta z)}) \left(T_P^{(I,J,K)} \right) \left(\frac{\Delta}{\Delta z} + 2 \frac{\Delta}{\Delta z} + 4 \frac{\Delta}{\Delta z} + 2 \Delta \right) + 4 \frac{\Delta}{\Delta z} + 2 \frac{\Delta}{\Delta z} \left(T_P^{(I,J,K)} \right) \quad (4.50)$$

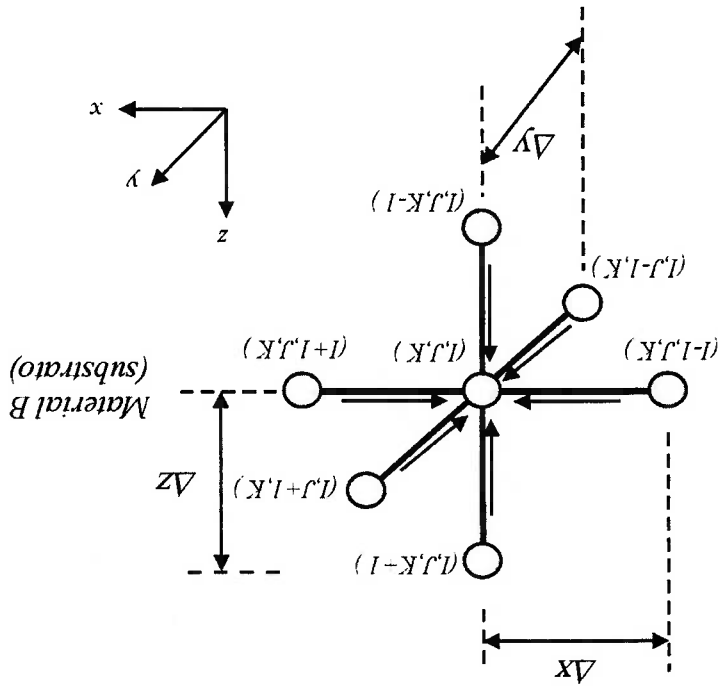
Simplificando a Eq. 4.53:

$$(4.53) \quad \rho c_p (\Delta x \Delta y \Delta z) = \frac{\Delta t}{(T_{p+1}^{(i,j,k)} - T_p^{(i,j,k)})} \left[\frac{\Delta z}{(T_p^{(i,j,k-1)} - T_p^{(i,j,k)})} k (\Delta x \Delta y) + \frac{\Delta z}{(T_p^{(i,j,k+1)} - T_p^{(i,j,k)})} k (\Delta x \Delta y) + \frac{\Delta y}{(T_p^{(i,j-1,k)} - T_p^{(i,j,k)})} k (\Delta x \Delta z) + \frac{\Delta y}{(T_p^{(i,j+1,k)} - T_p^{(i,j,k)})} k (\Delta x \Delta z) + \frac{\Delta x}{(T_p^{(i-1,j,k)} - T_p^{(i,j,k)})} k (\Delta y \Delta z) + \frac{\Delta x}{(T_p^{(i+1,j,k)} - T_p^{(i,j,k)})} k (\Delta y \Delta z) \right]$$

A equação da energia discretizada explicitamente é dada por:

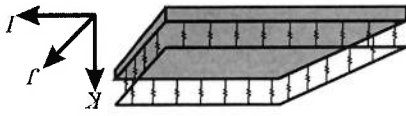
interior da placa de alumínio.

Figura 4.8 - Representação gráfica do balanço energético nos nós situados no



Com a utilização do método explícito para o caso transiente, a precisão da solução fica relacionada ao refinamento da malha e, conseqüentemente, à redução dos valores de Δx , Δy e Δz . A escolha dos valores das distâncias entre os nós apresentam o compromisso com a precisão dos resultados e com as exigências computacionais, visto que, quanto mais refinada seja a malha maior será o esforço computacional. Entretanto, o valor de Δt não pode ser escolhido aleatoriamente, pois ele é responsável pela estabilidade do método, ou seja, para problemas transientes a solução das temperaturas nodais deve se aproximar continuamente do regime permanente e uma má escolha desta variável pode fazer com que oscilações numéricas tornem-se instáveis, fazendo com que a solução diverja das condições reais. Utiliza-se, assim, um critério de estabilidade que é

4.3 Critério de Estabilidade



Nós Internos

$$(4.55) \quad T_{P+1}^{(i,j,k)} = F_{OB} \left[\frac{\Delta z}{\Delta z} \left(T_P^{(i-1,j,k)} + T_P^{(i+1,j,k)} + T_P^{(i,j-1,k)} + T_P^{(i,j+1,k)} \right) + \left(\frac{\Delta z}{\Delta z} \right)^2 \left(T_P^{(i,j,k-1)} + T_P^{(i,j,k+1)} \right) + \frac{q(\Delta \Delta z)}{k_b} \right] + \left(1 - 4 \frac{\Delta z}{\Delta z} F_{OB} - 2 \frac{\Delta z}{\Delta z} F_{OB} \right) T_P^{(i,j,k)}$$

Portanto a equação final para os nós internos do substrato é dada pela Eq. 4.53.

$$(4.54) \quad \frac{\Delta z}{\Delta z} \left(T_P^{(i-1,j,k)} - T_P^{(i,j,k)} \right) + \frac{\Delta z}{\Delta z} \left(T_P^{(i+1,j,k)} - T_P^{(i,j,k)} \right) + \frac{\Delta z}{\Delta z} \left(T_P^{(i,j-1,k)} - T_P^{(i,j,k)} \right) + \frac{\Delta z}{\Delta z} \left(T_P^{(i,j+1,k)} - T_P^{(i,j,k)} \right) = \frac{k}{\rho C_p} \frac{\Delta z}{\Delta z} \left(T_{P+1}^{(i,j,k)} - T_P^{(i,j,k)} \right)$$

O único inconveniente destes critérios está no fato que, ao calcularmos o tempo de integração Δt através do F_{0A} e F_{0B} , tem-se valores diferentes, o que é um erro pois o sistema deve estar acoplado. O acoplamento da variável tempo encontra-se na Seção 4.4.

$$F_{0B} \leq \frac{\left(4B_1z_B + 2B_1t_B + \frac{k_B}{h_r}(4\Delta z + 2\Delta) + 4\frac{\Delta}{\Delta z} + 2\frac{\Delta}{\Delta} \right)}{1} \quad (4.57)$$

Para o substrato, o critério de estabilidade é dado por:

respectivos mecanismos não estejam presentes na simulação. calor e para os casos mais simplificados, estes termos serão excluídos à medida que os descrito na Eq. 4.56 apresenta todos os termos relacionados aos mecanismos de troca de material, menor será o valor do passo no tempo. Verifica-se também que o denominador Visto que quanto menor for o F_0 para um mesmo refinamento de malha e mesmo

$$F_{0A} \leq \frac{\left(2B_1^A + 4B_1z^A + \frac{k^A}{h_r}(2\Delta + 4\Delta z) + 4\frac{\Delta}{\Delta z} + 2\frac{\Delta}{\Delta} k^A R^c \right)}{1} \quad (4.56)$$

critério de convergência para os nós da superfície do composto é dado pela Eq. 4.56: menor F_{0A} é dado pelas equações que descrevem os nós nos vértices e, portanto, o de contorno convectivas e da radiação térmica no composto, o critério que apresenta equações do calor descritas em diferenças finitas, para o caso da presença de condições instantane anterior, seja maior ou igual a zero (Incropera e Witt, 1996). Analisando as determinado pela exigência de que o coeficiente associado ao nó de interesse, no

4.4 Acoplamento do Tempo

Para este modelo numérico que descreve o mecanismo de transmissão de calor em dois corpos distintos com propriedades térmicas diferentes, temos a presença de dois Fo diferentes (Fo_A e Fo_B) que promovem tempos de integração diferentes como se pode ver nas Eqs. 4.58 e 4.59.

$$\Delta t_A = \frac{Fo_A(\Delta\Delta z)}{\lambda_A} \quad (4.58)$$

$$\Delta t_B = \frac{Fo_B(\Delta\Delta z)}{\lambda_B} \quad (4.59)$$

Os intervalos de tempo são diferentes não apenas pelo fato das difusividades serem diferentes, mas por apresentarem distintos adimensionais Fourier provenientes dos critérios descritos nas Eqs. 4.56 e 4.57. Uma representação gráfica dos diferentes intervalos de integração pode ser verificada na Fig. 4.9.

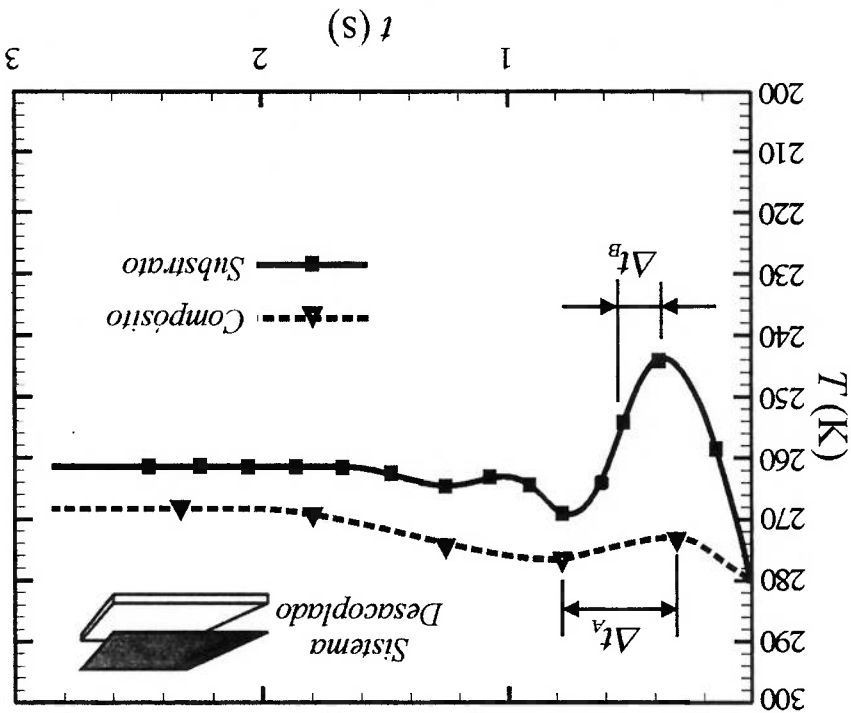


Figura 4.9 - Representação gráfica da convergência de um ponto ao centro da placa do composito e outro ao centro do substrato para o sistema desacoplado.

Mas os sistemas de equações discretizadas dos dois materiais se encontram acopladas através do modelo da resistência térmica de contato e, portanto, faz-se necessário também o acoplamento do passo de integração temporal para promover uma convergência mútua e, assim, obter um critério de convergência que satisfaça a ambos. Isto de certo modo, é simples, pois basta determinar o critério mais rígido, ou seja, o que apresente menor valor de passo Δt , e recalcular o F_0 do material que apresentar maior passo com o valor de Δt de menor passo. O resultado final pode ser verificado na representação gráfica dada pela Fig. 4.10. Para este caso, o sistema de equações apresenta uma convergência única.

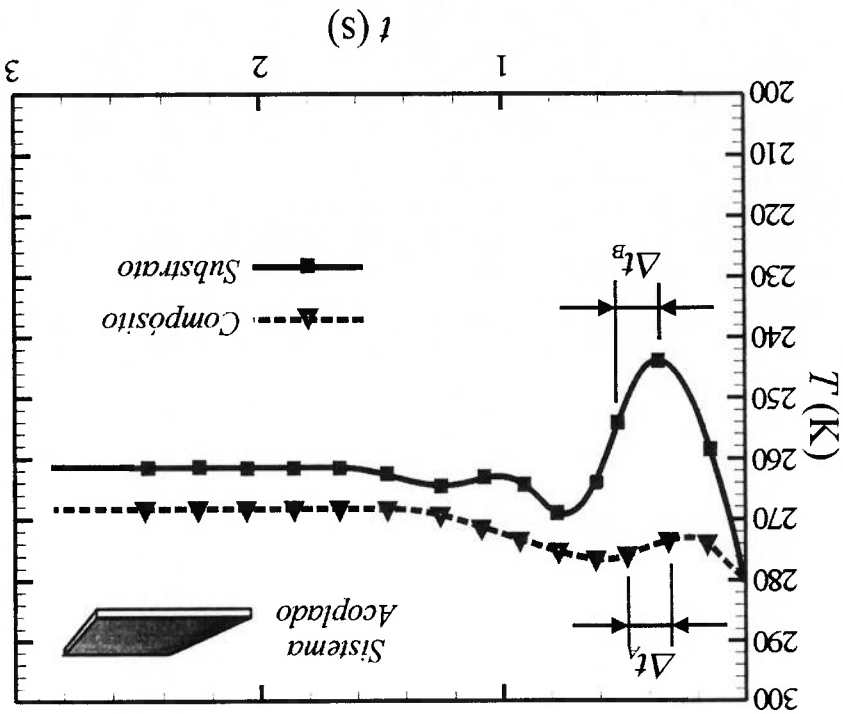


Figura 4.10 - Representação gráfica da convergência de um ponto ao centro da placa do compósito e outro ao centro do substrato para o sistema acoplado.

Para este procedimento é de interesse gerar uma relação entre os números adimensionais Fourier dos dois materiais e para isto através da Eq. 4.3, pode-se escrever:

$$Fo_A = \frac{\lambda_A \Delta t_A}{Fo_B} \cdot \frac{Fo_B}{Fo_A} \quad (4.60)$$

Substituindo-se a Eq. 4.21 na Eq. 4.60, pode-se escrever que:

$$Fo_A = \frac{\lambda_A \Delta t_A}{Fo_B} \cdot \frac{Fo_B}{Fo_A} \cdot \lambda_B \Delta t_B \quad (4.61)$$

Considerando os valores dos passos de integração iguais, ou seja, $\Delta t_A = \Delta t_B = \Delta t$ e simplificando a Eq. 4.61, obtém-se:

$$Fo_A = \lambda_A Fo_B \quad (4.62)$$

Com o recálculo do Fourier de maior passo com o Δt do de menor, tem-se mantida a condição dada pelo critério de estabilidade descrito pelas Eqs. 4.56 e 4.57.

5 ESTUDO DOS CASOS

Neste capítulo são apresentadas as simulações dos diferentes estudos de casos propostos, que são: incidência de radiação em fornos microondas (1-3,5 GHz), na faixa de aparelhos celulares (1-2,5 GHz) e na faixa radar (1-15 GHz). Além disso, é feita uma análise paramétrica da resistência térmica de contato e do material do substrato, com o intuito de analisar a influência que apresentam no mecanismo global de transferência de calor e aquecimento.

5.1 Escolha dos Parâmetros de Simulação.

Antes de se definirem os critérios de escolha dos parâmetros de simulação, é de interesse apresentar de forma esquemática todas as grandezas disponíveis no modelo proposto para a simulação. Estes podem ser verificados na Tab. 5.1.

Tabela 5.1 – Grandezas e condições de contorno empregadas nas simulações.

Camada	Grandezas	Condições de Contorno Ext.
Composito (epoxi-ferrita)	$k_A, \rho_A, C_{pA}, B_{iA}$	T_{face} (quando constante), $T_{\infty}, h, T_{exp}, q_{rad}, \alpha_A, h_r$
Resistência Térmica de Contato	R_{tc}	
Substrato de Alumínio	$k_B, \rho_B, C_{pB}, B_{iB}$	T_{face} (quando constante), $T_{\infty}, h, T_{exp}, q_{rad}, h_r$

Dentre os casos a serem estudados, a faixa das microondas se caracteriza por apresentar a maior irradiação (20000 W/m^2), valor utilizado em fornos domésticos de microondas. Devido a isto, este caso se caracteriza por ser o crítico, uma vez que o termo de absorção de radiação é bem superior aos demais e não está quantificado no critério de estabilidade dado pelas Eqs. 4.56 e Eq. 4.57. Portanto, o estudo do refinamento da malha será analisado apenas para este caso e será adotado para os demais, sem outras considerações. Este estudo está presente na Seção 5.5 deste trabalho. Os parâmetros da simulação para este caso tentam se aproximar da utilização prática do forno doméstico de microondas, objetivando a análise através da simulação do comportamento do material previamente apresentado à absorção de ondas eletromagnéticas. Para tanto, foi definida como situação padrão de simulação a que mais se aproxime da situação real de utilização desses fornos. Um esquema representativo do fenômeno para esta aplicação pode ser visto na Fig. 5.1.

5.2 Microondas

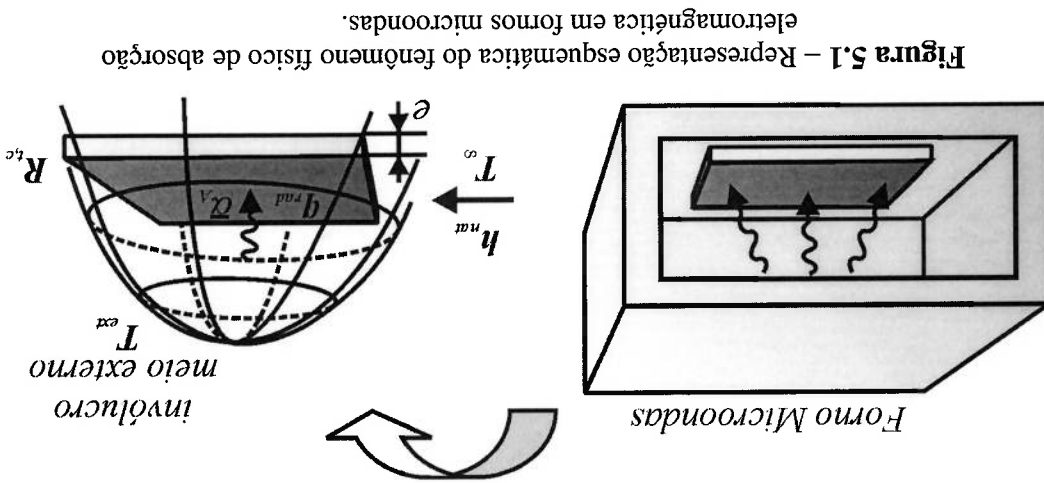
valores podem ser obtidos nas Seções 5.2, 5.3 e 5.4.

predominante no fenômeno de absorção e de transferência de calor. Detalhes desses valores das condições de contorno e de algumas grandezas procuram verificar o que é Para cada caso será definido um padrão e através deste serão modificados os área de $0,05 \text{ W/m}^2$ dentro da faixa de frequência de (1-15 GHz).

de radares (RCS "Radar Cross Section") que apresentam uma potência por unidade de é de 50 W/m^2 para a faixa de frequência de (1-2,5 GHz). E o terceiro caso é na utilização eletromagnética imposto pela ANATEL (Agência Nacional de Telecomunicações), que segundo caso é definido através do limite ocupacional de exposição à radiação 20000 W/m^2 . Este valor é usual nas aplicações de fornos domésticos de microondas. O é para a irradiação na faixa de frequência de microondas (1-3,5 GHz) que é de tipos de aplicações, as quais apresentam diferentes faixas de frequência. O primeiro caso trabalho foi a irradiação. Segundo este critério, pode-se dividir as simulações em três O critério escolhido como principal para definir as simulações pertinentes a este

O lado esquerdo da figura apresenta a situação de exposição de placa de composto dentro do forno microondas e no lado direito está a representação esquemática do fenômeno de transferência de calor aplicado à mesma. O invólucro externo representa as paredes do forno no qual o mecanismo de troca de calor por radiação térmica com a placa é atuante. Os estudos se deram para uma placa padrão revestida de composto de dimensões de 30 cm x 30 cm x 3 mm. Além disso, é admitida que todas as faces, com exceção da face inferior, estão expostas à radiação eletromagnética, enquanto que o meio externo a placa, com temperatura (T_{ext}) equivalente a 295K, representa as faces internas do forno. Apenas a superfície superior, onde se encontra o composto, apresenta a característica de absorção de radiação eletromagnética. A contabilização da absorção da radiação se dá pelo produto do coeficiente médio de absorção à radiação eletromagnética, α_A , pela parcela da irradição incidente I_0 dado pela Eq. 3.8. O gráfico do coeficiente de absorção α_A em função da frequência para a faixa de microondas (1-3,5 GHz) pode ser visto na Fig. 5.2. Os pontos deste gráfico foram obtidos através da aplicação da Eq. 3.5 em dados experimentais obtidos pelo trabalho realizado por

Migliano e Freitas (2002) descrito na Seção 3.1.



A Eq. 5.2 apresenta uma solução facilmente calculada, cujo valor médio calculado do coeficiente de absorção médio $\bar{\alpha}_v$ para a faixa das microondas é de 0,969.

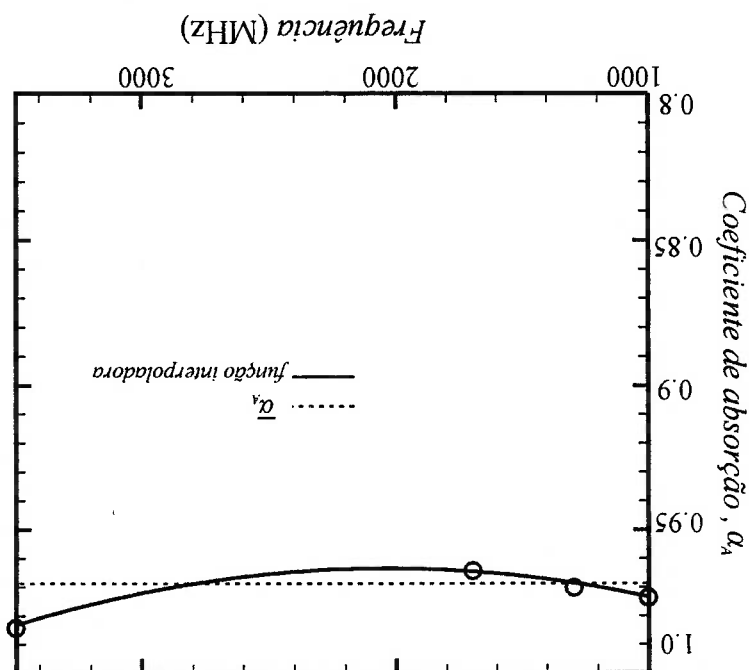
$$\bar{\alpha}_v = \frac{(3500 - 1000)}{1} \int_{3500}^{1000} \alpha(f) df. \quad (5.2)$$

Mas, para o cálculo do coeficiente médio de absorção $\bar{\alpha}_v$, deve-se aplicar a Eq. 3.6 a função interpoladora dada pela Eq. 5.1. Para os intervalos de integração definidos pela faixa de frequência de aplicação das microondas ($f_{\min} = 1000$ MHz) e ($f_{\max} = 3500$ MHz), obtêm-se a Eq. 5.2 dada por:

$$\alpha(f) = 9,32229 \times 10^{-9} f^2 - 3,797 \times 10^{-5} f + 1,002. \quad (5.1)$$

Foram simulados polinômios interpoladores de diferentes graus obtidos pelo método dos mínimos quadrados e optou-se pelo de segundo grau por melhor se adequar aos pontos. Esta função interpoladora é dada por:

Figura 5.2 – Gráfico do coeficiente de absorção em função da frequência (1-3,5 GHz).



Outra condição de contorno aplicada é a transferência de calor por convecção natural, sendo que a temperatura T_{∞} é a temperatura do meio ambiente, admitida como 295 K. A face inferior também não apresentará a condição de convecção, uma vez que está em contato com a parede do forno. O substrato adotado como padrão é o alumínio com uma espessura e de 3 mm, valor usualmente empregado na confecção das mantas absorvedoras (CTA, 1998 e CTA, 2002). O valor da resistência térmica de contato foi retirado de pesquisas experimentais para obtenção dessa resistência no contato entre resinas termoplásticas e materiais metálicos realizadas por Fletcher e outros (1997). Para o caso da interface entre epóxi e alumínio, o valor deste parâmetro é de $6,64 \times 10^{-4} \text{ m}^2\text{K/W}$. As propriedades termofísicas do composto utilizadas nesta simulação estão presentes na Tab. 2.7. Outro detalhe importante neste trabalho é que todas as simulações apresentam a condição de temperatura inicial de 295 K, em todos os pontos da malha, representando uma condição de estabilidade térmica à temperatura ambiente antes do processo de absorção de radiação eletromagnética. As propriedades e condições de contorno aplicadas na simulação padrão podem ser verificadas na Tab. 5.2.

Tabela 5.2 – Propriedades e condições de contorno para a situação padrão (microondas).

	Composto	Substrato (Alumínio)	Contorno de
Densidade ρ (kg/m ³)	1724,1	2702	-
Condutividade Térmica k (W/mK)	1,4	237	-
Calor Específico C_p (J/kgK)	388,5	903	-
Espessura e (mm)	-	3	-
Emissividade ϵ	0,9	0,04	-
α	0,969	-	-
Resistência Térmica de Contato (m ² K/W)	$6,64 \times 10^{-4}$	-	-
Temperatura do meio T_{∞} (K)	-	-	295
Temperatura Externa T_{ext} (K)	-	-	295
Potência de radiação q_{rad} (W/m ²)	-	-	20000
Coefficiente de Transferência de calor por convecção h (W/m ² K)	-	-	10

Propriedades		
Aço Carbono (Van Vlack, 1970)	7854	Densidade (kg / m ³)
ABS (Bolton,1998)	1050	Densidade (kg / m ³)
	60,5	Condutividade Térmica (W/m K)
	434	Calor Específico (J / kg K)
	0,2	Emissividade ϵ

Tabela 5.3 – Propriedades termofísicas de diferentes substratos (Van Vlack, 1970) e (Bolton, 1998).

Com a condição padrão definida, pode-se alterar alguns parâmetros e analisar o novo comportamento térmico da manta, além de estudar quais parâmetros influenciariam de forma relevante no mecanismo de transferência de calor. Para a faixa das microondas foram analisados outros dois substratos, sendo um, o aço carbono comum e o outro acrílico-butadieno-estireno (ABS). Foi escolhido ABS por ser muito utilizado na indústria de telecomunicação em revestimentos de aparelhos celulares, e também na indústria aeronáutica e na indústria eletroeletrônica. Conseqüentemente, ao se mudar o material do substrato, alteram-se as propriedades termofísicas, mas foi mantido o mesmo valor da resistência térmica de contato, pois o intuito da variação do material é apenas a análise da influência térmica que as propriedades do substrato podem apresentar. Os valores das propriedades termofísicas destes substratos podem ser vistas na Tab. 5.3. O outro parâmetro que foi modificado é a espessura do substrato, sendo que foram simulados substratos com 5 mm e 10 mm, respectivamente, para verificar se há alguma influência causada por esta dimensão. Procurando entender o grau de interferência da interface entre composto e substrato, outros dois valores de resistência térmica de contato foram empregados (5×10^{-5} e 5×10^{-3} m²K/W), valores estes que podem ser atingidos ao mudar as condições de rugosidade e pressão no contato entre substrato e composto. Também foi simulada uma outra condição de contorno convectiva, propondo uma convecção forçada com um valor de coeficiente de transferência de calor por convecção igual a 40 W/m²K. Todas simulações, partindo da condição padrão para as suas variantes podem ser vistas na Tab. 5.4.

Tabela 5.4 – Simulações Propostas para a Faixa de frequência das microondas (1-3,5 GHz).

Substrato	Espessura	Resistência de Contato (m²K/W)	Convecção	Simulação	Observação
Alumínio	3 mm	6,64 x 10 ⁻⁴	h_{nat}	01	Situação padrão de simulação
		6,64 x 10 ⁻⁴	$h_{forçada}$	02	Convecção forçada
		5 x 10 ⁻³	h_{nat}	03	Elevada resistência de contato
	5 mm	5 x 10 ⁻⁵	h_{nat}	04	Baixa resistência de contato
		6,64 x 10 ⁻⁴	h_{nat}	05	Substrato de espessura 5 mm
		6,64 x 10 ⁻⁴	h_{nat}	06	Substrato de espessura 10 mm
Aço Carbono	3 mm	6,64 x 10 ⁻⁴	h_{nat}	07	Substrato de aço carbono
ABS	3 mm	6,64 x 10 ⁻⁴	h_{nat}	08	Substrato de ABS

Nota:
Todas as simulações incluem radiação térmica.

5.3 Limite Ocupacional ANATEL

Para este caso, a irradiação e, consequentemente, a respectiva absorção para aplicações em celulares estão num patamar bem inferior, se comparada à faixa de microondas da Seção 5.2. Isto é evidente, pois não se pode admitir potências de emissão em níveis compatíveis com as do forno microondas doméstico para eventuais exposições ao ser humano, sem algum tipo de proteção eletromagnética. Para este estudo de caso a situação padrão de simulação também foi dada por uma placa com dimensões de 30 cm x 30 cm x 3 mm. Mas, diferentemente do forno microondas, todas as faces estão expostas à radiação térmica contida por invólucro externo que apresenta uma temperatura externa (T_{ext}) de 295 K. Esta temperatura é admitida como constante visando modelar uma situação de uso do aparelho celular em um ambiente fechado. Em um ambiente exposto à atmosfera, a temperatura externa teria um valor bem inferior, promovendo uma maior troca de calor por radiação térmica da mania absorvedora com o meio envolvente, mas isso não representaria a situação mais crítica, pois o aquecimento devido à absorção eletromagnética seria menos suscetível. A situação padrão pode ser visualizada no esquema representativo dado pela Fig.5.3. A parte esquerda da figura apresenta a aplicação em telefonia celular com a recepção de sinais de antenas emissoras por parte de aparelhos celulares e o lado direito representa esquematicamente o fenômeno de troca de calor sobre a placa. Nela pode-se observar que o invólucro representa a exposição de todas as faces da placa à radiação térmica devido à diferença de temperatura das faces com a temperatura do meio externo, que é admitida como constante. Pode-se também verificar que todas as faces têm a condição de troca de calor por convecção natural, sendo que o coeficiente de transferência de calor por convecção h para esta situação é dado por $10 \text{ W/m}^2\text{K}$. A temperatura do meio ambiente T_{∞} também é considerada como constante e apresenta o valor de 295 K, como no caso anterior.

Resolvendo a Eq. 5.3 obtêm-se que o valor do coeficiente é 0,966. O valor da resistência térmica de contato definido para a situação padrão foi o mesmo empregado na simulação anterior ($6,64 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{K/W}$), já que é mantido o alumínio como substrato padrão. O resumo destas propriedades pode ser visto na

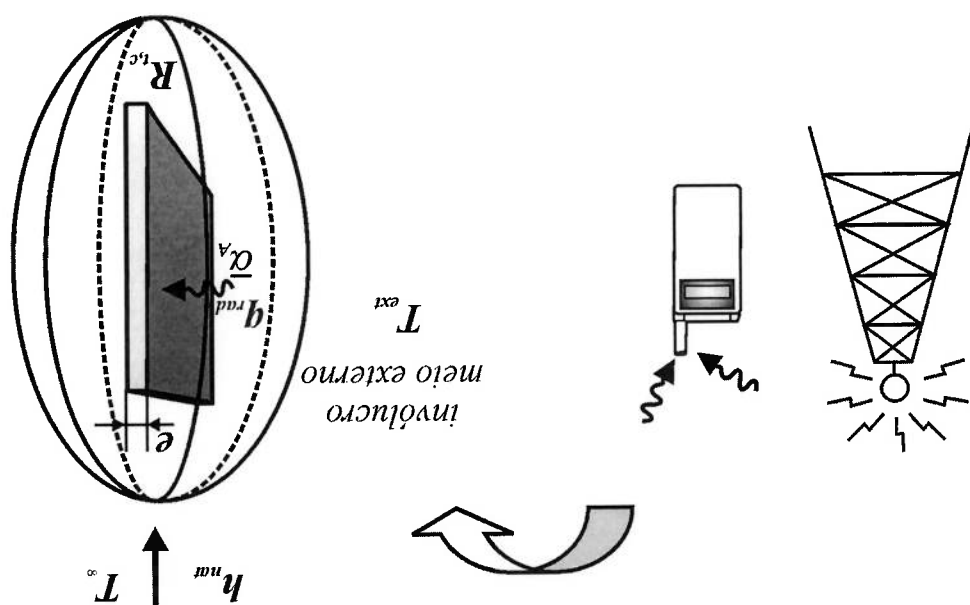
Tab. 5.5.

$$\bar{\alpha}_A = \frac{1}{\int_{2500}^{1000} \alpha(f) df} \quad (5.3)$$

dados pela Eq. 5.3.

Devido à utilização do método da capacitância global, apenas a superfície do composto é caracterizada pela absorção eletromagnética, sendo dada pela radiação incidente que é absorvida multiplicada pelo novo coeficiente de absorção $\bar{\alpha}_A$ para a faixa de frequência de 1 a 2,5 GHz. A função interpoladora para este caso foi a mesma empregada para a faixa das microondas dada pela Eq. 5.1. A diferença está no limite superior de integração ($f_{\max} = 2500 \text{ MHz}$) fornecendo, assim, um novo valor de $\bar{\alpha}_A$.

Figura 5.3 – Representação esquemática do fenômeno físico de absorção eletromagnética em aparelhos de telefonia celular.



Como análise complementar deste caso, alguns parâmetros também foram modificados com o intuito de verificar a influência que eles promovem. Foram simulados, como no caso anterior, um substrato de aço carbono e outro de ABS sendo suas propriedades apresentadas já na Tab. 5.3. Já para a espessura, foi simulado apenas o valor padrão de 3 mm, uma vez, que para uma aplicação em equipamentos de telefonia celular, qualquer valor superior poderia representar um empecilho para seu emprego devido ao espaço físico ser restrito. Foram simulados também outros valores de resistência térmica de contato (5×10^{-5} e $5 \times 10^{-3} \text{ m}^2\text{K/W}$). Para a condição de contorno convectiva, foi empregada apenas a situação de convecção natural mantendo-se o mesmo valor do padrão para esta faixa de frequência. Isto por serem desconhecidas das situações práticas do emprego de convecção forçada, neste tipo de aplicação. A simulação padrão e suas variantes para o limite de exposição previsto pela ANATEL pode ser visto na Tab. 5.6.

	Composito	Substrato (Alumínio)	Condição de Contorno
Densidade ρ (kg/m^3)	1724,1	2702	-
Condutividade Térmica k (W/mK)	1,4	237	-
Calor Específico C_p (J/kgK)	388,5	903	-
Espessura e (mm)	-	3	-
Emissividade ϵ	0,9	0,04	-
α_a	0,966	-	-
Resistência Térmica de Contato ($\text{m}^2\text{K/W}$)	$6,64 \times 10^{-4}$	-	-
Temperatura do meio T_∞ (K)	-	-	295
Temperatura Externa T_{ex} (K)	-	-	295
Potência de radiação q_{rad} (W/m^2)	-	-	50
Coefficiente de Transferência de calor por convecção h ($\text{W/m}^2\text{K}$)	-	-	10

Tabela 5.5 – Propriedades e condições de contorno para a condição padrão (limite Anatel).

Tabela 5.6 – Simulações Propostas para o limite ocupacional proposto pela ANATEL (1-2,5 GHz).

Substrato	Espessura	Resistência de Contato (m²K/W)	Convecção	Simulação	Observações
		6,64 x 10 ⁻⁴	<i>h_{nat}</i>	09	Situação padrão de simulação
Alumínio	3 mm	5 x 10 ⁻³	<i>h_{nat}</i>	10	Elevada resistência de contato
		5 x 10 ⁻⁵	<i>h_{nat}</i>	11	Baixa resistência de contato
Aço Carbono	3 mm	6,64 x 10 ⁻⁴	<i>h_{nat}</i>	12	Substrato de aço carbono
ABS	3 mm	6,64 x 10 ⁻⁴	<i>h_{nat}</i>	13	Substrato de ABS

Nota:

Todas as simulações incluem radiação térmica.

5.4 Radares (RCS)

O valor da irradiação para a aplicação em seção reta de radar ou, em inglês,

“Radar Cross Section” (RCS), é muito baixa, se comparada com os outros dois casos. A função do radar é quantificar a energia eletromagnética que é refletida pelo alvo de interesse. Sendo assim, a situação padrão proposta por este estudo foi dada por uma placa com dimensões de 30 cm x 30 cm x 3 mm em que todas as faces estão expostas à radiação térmica, contida por invólucro externo, que simula o ambiente atmosférico coberto por nuvens a uma temperatura externa (T_{ext}) de 273 K. Um esquema representativo da situação padrão pode ser verificado na Fig. 5.4. Apenas a superfície superior apresenta a característica de absorção, como nos demais casos, sendo assim, há a necessidade de obtenção de um novo valor do coeficiente de absorção α_A . A função interpoladora deve ser obtida através do método dos mínimos quadrados aplicado aos pontos do gráfico de absorção em função da frequência Fig. 3.5. Para a faixa de 1 a 15 GHz, o gráfico pode ser visto na Fig. 5.5.

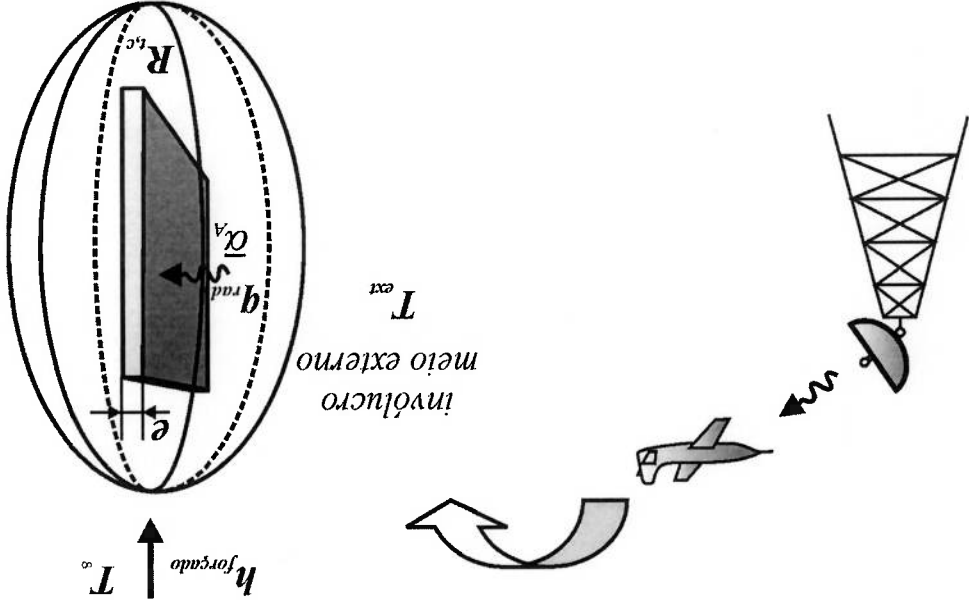


Figura 5.4 – Representação esquemática do fenômeno físico de absorção eletromagnética em radares.

Para a situação padrão deste caso a condição de convecção foi a forçada, sendo que o coeficiente de transferência de calor por convecção h é dado por $40 \text{ W/m}^2\text{K}$. A temperatura ambiente escolhida como padrão foi de 273 K , simulando a temperatura do ar a uma dada altitude.

Resolvendo a Eq. 5.5 obtêm-se o valor de $0,962$.

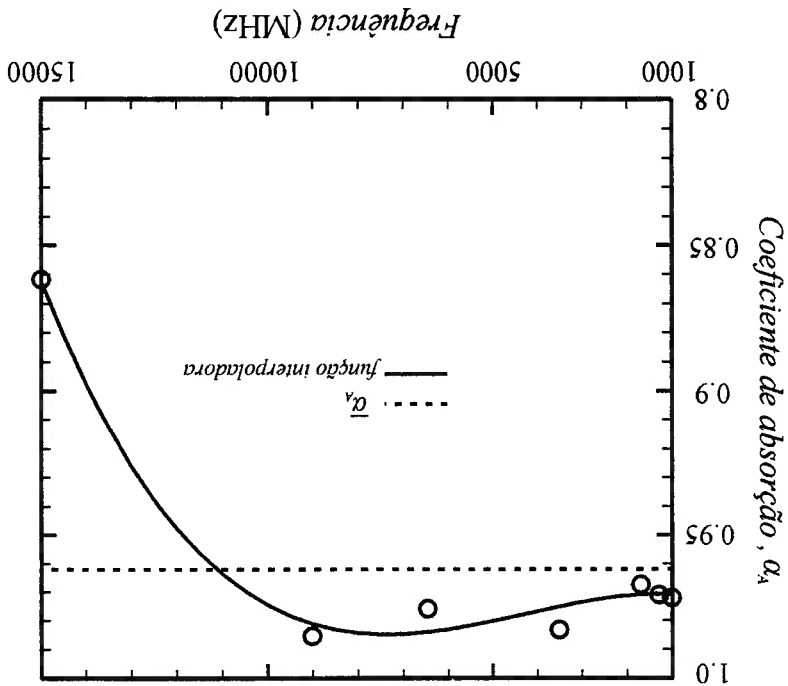
$$\bar{\alpha}_A = \frac{(15000 - 1000)}{1} \int_{1000}^{15000} \alpha(f) df \quad (5.5)$$

e o cálculo do coeficiente médio de absorção térmico $\bar{\alpha}_A$ para este caso é dado por:

$$\alpha(f) = -1,242 \times 10^{-13} f^3 + 1,597 \times 10^{-9} f^2 - 3,375 \times 10^{-6} f + 9,726 \times 10^{-1} \quad (5.4)$$

A função interpoladora, na forma polinomial, que melhor se adaptou ao fenômeno, para esta faixa de frequência, foi a do terceiro grau dada por:

Figura 5.5 - Gráfico do coeficiente de absorção em função da frequência (1-15 GHz).



Para as demais variantes de simulação foi utilizado outro valor de resistência térmica de contato ($5 \times 10^{-3} \text{ m}^2\text{K/W}$), além de outro material para o substrato que é o aço carbono. Procurou-se verificar, assim, que tipo de influência estes parâmetros podem proporcionar ao resultado térmico final do conjunto. A simulação padrão e suas variantes para a faixa de aplicação em radares podem ser vistas na Tab. 5.8.

Condição de Contorno	Substrato (Alumínio)	Composito	Densidade ρ (kg/m ³)	Conduktividade Térmica k (W/mK)	Calor Específico C_p (J/kgK)	Espessura e (mm)	Emissividade ϵ	α_a	Resistência Térmica de Contato (m ² K/W)	Temperatura do meio T_∞ (K)	Temperatura Externa T_{ex} (K)	Potência de radiação q_{rad} (W/m ²)	Coefficiente de Transferência de calor por convecção h (W/m ² K)
-	2702	1724,1											
-	237	1,4											
-	903	388,5											
-	3	-											
-	0,04	0,9											
-	-	0,962											
-	-	6,64x10 ⁻⁴											
273	-	-											
273	-	-											
0,05	-	-											
40	-	-											

Tabela 5.7 – Propriedades e condições de contorno para a condição padrão (radar).

O valor da resistência térmica de contato empregado no caso padrão foi $6,64 \times 10^{-4} \text{ m}^2\text{K/W}$, já que foi mantido substrato de alumínio. O resumo destas propriedades para a condição padrão pode ser visto na Tab. 5.7.

Tabela 5.8 – Simulações Propostas para a faixa de frequência de radares (1-15 GHz).

Substrato	Espessura	Resistência de Contato (m²K/W)	Convecção	Simulação	Obs.
Alumínio	3 mm	$6,64 \times 10^{-4}$	<i>h_{forçado}</i>	14	Situação padrão de simulação
		5×10^{-3}	<i>h_{nat}</i>	15	Elevada resistência de contato
Aço Carbono	3 mm	$6,64 \times 10^{-4}$	<i>h_{nat}</i>	16	Substrato de aço carbono

Nota:

Todas as simulações incluem radiação térmica.

5.5 Estudo da Malha.

Para o estudo do grau de refinamento da malha, nas simulações propostas, foi escolhida a frequência das microondas por apresentar a maior irradiação dentre os casos simulados e, conseqüentemente, ser a situação crítica, já que o termo fonte não é quantificado no critério de estabilidade. Para este estudo foi analisada a temperatura em dois pontos, sendo um deles no centro do composto e o outro, no centro da placa de alumínio. A malha foi refinada mantendo-se todos os outros parâmetros constantes e analisando o resultado de regime permanente destes pontos. Posteriormente, foi feito o gráfico do valor da diferença percentual da temperatura de dois pontos, em função do refinamento da malha. O gráfico pode ser visto na Fig. 5.6, cujo eixo das abscissas é o grau de refinamento da malha, no plano composto pela largura e pelo comprimento. Para a espessura ficou fixo o valor de 10 pontos, uma vez que um refinamento muito elevado nesta cota demonstraria apenas o detalhamento do substrato, já que as propriedades de absorção eletromagnética estão presentes apenas na camada superior de nós. O padrão para a porcentagem de diferença é o valor da temperatura nos pontos centrais de ambos os materiais para a malha de 20 pontos no comprimento, 20 pontos na largura e 10 na espessura, totalizando uma malha de 4000 nós. A porcentagem de diferença é dada por:

$$(5.6) \quad dif(\%) = \frac{T_{mr} - T_{20 \times 20}}{T_{20 \times 20}} \times 100,$$

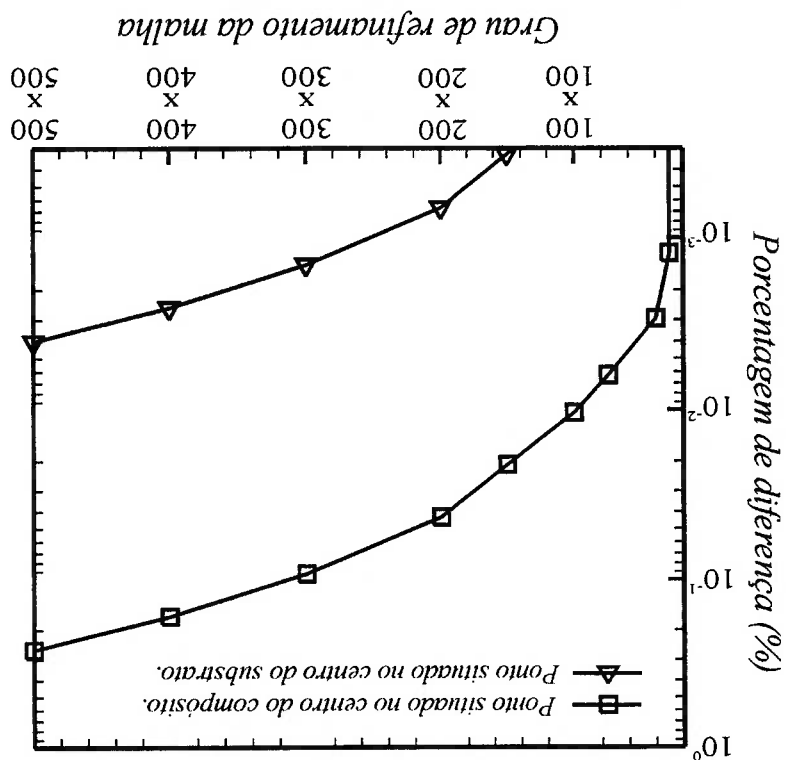
onde:

T_{mr} é a temperatura do ponto central em outro grau de refinamento,
 $T_{20 \times 20}$ é a temperatura do ponto central para a malha de 20x20x10.

O gráfico para os pontos centrais da diferença percentual da temperatura em função do refinamento da malha como pode ser visto na Fig. 5.6.

Através deste gráfico pode-se observar que as diferenças percentuais dos valores de temperatura para um mesmo dado ponto em função do refinamento da malha não se apresentaram de forma muito relevante. Para o ponto, no centro do composto, houve um valor máximo de diferença percentual de 0,26% ao comparar-se a temperatura do ponto da malha 500x500x10 com a malha 20x20x10. Este valor não é muito elevado, se for considerado que esta malha tem 2500000 nós. Pode-se concluir que não existem modificações muito significativas nos valores das temperaturas devido ao refinamento da malha e um valor de refinamento intermediário, dentre os apresentados, pode satisfazer tanto a condição de baixa diferença percentual como ter dados suficientes para construir adequadamente o campo térmico, sem a necessidade de grande alocação de memória. Para as simulações propostas neste capítulo será escolhida a malha de 100x100x10.

Figura 5.6 – Gráfico da Diferença percentual da temperatura de dois pontos em função do refinamento da malha. O primeiro ponto se localiza no centro do composto e o segundo, no centro do substrato.



Esta situação, como descrita no capítulo anterior, é caracterizada por um substrato de alumínio com espessura de 3 mm, por uma resistência térmica de contato de valor $6,64 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{K/W}$, por uma condigão de troca de calor convectiva com um h de $10 \text{ W/m}^2 \text{K}$ a uma temperatura ambiente T_∞ de 295 K e, por uma troca de calor por radiação térmica com o meio externo à temperatura constante de 295 K. A visualização global da distribuição de temperatura do substrato de alumínio, revestido pelo composto na solução de regime permanente pode ser verificado na Fig. 6.1. Ao analisar esta figura verifica-se que o aquecimento devido à absorção das ondas eletromagnéticas concentrou-se basicamente na camada do composto, na qual encontra-se a ferrita.

6.1.1.1 Situação padrão de simulação

A sequência de apresentação dos resultados segue o número da simulação definido na Secção 5.2, de acordo com o mapa esquemático da Tab. 5.4, de maneira que as secções subsequentes seguem a mesma numeração proposta.

6.1.1 Resultados

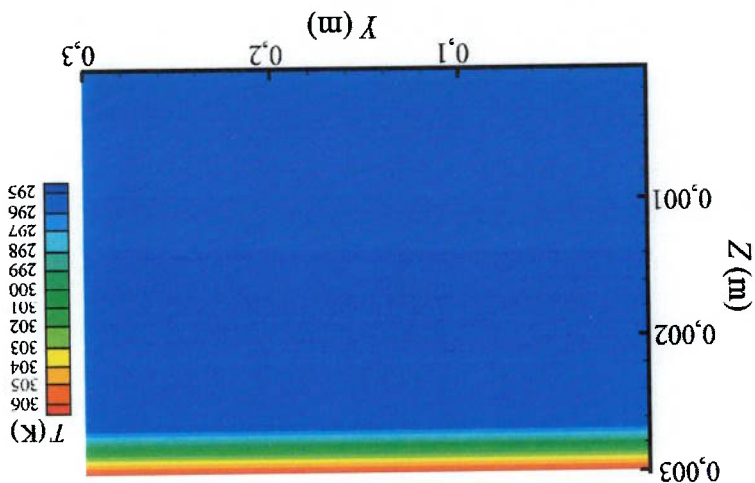
Nesta secção estão os resultados das simulações para a irradiação de 20000 W/m^2 , a maior dentre os casos em estudo. Os resultados da situação padrão de simulação e de suas variantes estão apresentados na Secção 6.1.1. Na Secção 6.1.2 estes resultados são analisados e discutidos, propondo-se um arranjo que melhor se adapte a uma situação de emprego desses materiais.

6.1 Resultados e Sugestões para Aplicações em Microondas

Neste capítulo são apresentados os resultados dos estudos de casos propostos no Capítulo 5. São também analisados os comportamentos térmicos resultantes da variação de parâmetros físicos do problema como: material, espessura do substrato e a resistência térmica de contato. Sugestões são dadas para cada estudo de caso, em particular, objetivando potenciais aplicações.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Figura 6.2 – Vista em corte vertical da camada central do arranjo da Fig. 6.1, para a cota X constante e equivalente a 0,15 m (substrato de alumínio, $e = 3$ mm, $q_{rad} = 2$ W/cm², $h = 10$ W/m²K, $R_{tc} = 6,64 \times 10^{-4}$ m²K/W).



Já o substrato de alumínio apresentou um perfil de temperatura uniforme com gradiente de temperatura desprezível em relação à sua espessura. Isto se deve ao fato do alumínio possuir uma elevada difusividade térmica, que faz com que propague rapidamente qualquer variação de temperatura. Uma visualização mais detalhada do perfil de temperatura pode ser verificada na vista em corte vertical para o plano central do substrato, como indicado na Fig. 6.2.

Figura 6.1 - Campo de temperaturas do substrato coberto pelo composto (substrato de alumínio, $e = 3$ mm, $q_{rad} = 2$ W/cm², $h = 10$ W/m²K, $R_{tc} = 6,64 \times 10^{-4}$ m²K/W).

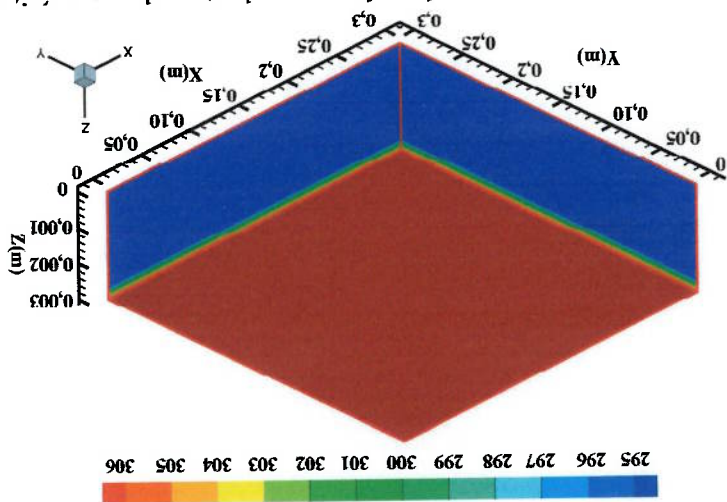
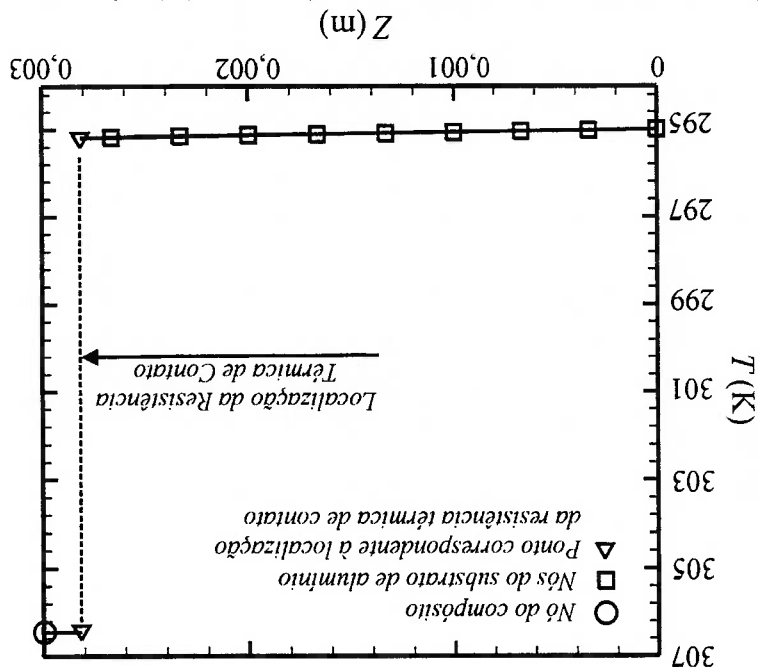


Figura 6.3 – Distribuição de temperatura no eixo central da placa para a situação padrão de simulação ($X=Y=0,15$ m) (substrato de alumínio, $e = 3$ mm, $q_{rad} = 2$ W/cm², $h = 10$ W/m²K, $R_{tc} = 6,64 \times 10^{-4}$ m²K/W).



Pode-se verificar que o maior gradiente de temperaturas está na região da resistência térmica de contato da interface entre o composto aquecido e o alumínio. A base do substrato encontra-se praticamente à temperatura ambiente, em toda a sua extensão, devido à imposição das condições de contorno de temperatura constante de 295 K na face inferior e à de troca de calor por convecção natural nas paredes laterais. Detalhes de valores de temperatura podem ser obtidos na Fig. 6.3 que apresenta o gráfico da variação de temperatura em função da espessura para o eixo central da placa, ou seja, para X e Y constantes e iguais a 0,15 m. Verifica-se que o nó localizado no composto encontra-se na temperatura de 306,6 K (33,5 °C), valor bem abaixo do limite imposto pela restrição de 110 °C, dada pela Temperatura de Curie. O salto de temperatura na região na interface de materiais ΔT_c é de 11,4 °C e a variação de temperatura no substrato de alumínio vai de 295 K (face inferior) a 295,2 K. Este salto representado pela descontinuidade da distribuição de temperaturas é devido à resistência térmica de contato.

6.1.1.2 Convecção forçada

Neste segundo estudo, o caso padrão foi modificado substituindo a condição de contorno de convecção natural para convecção forçada. O valor de h usado foi de $40 \text{ W/m}^2\text{K}$, que é típico de convecção de ar em altas velocidades sobre uma placa plana. O gráfico da variação da temperatura em função da espessura para o eixo central da placa no caso de convecção forçada é dado pela Fig. 6.4. Pode-se observar que a temperatura no nó central do compósito apresenta o valor de $305,7 \text{ K}$ ($32,6^\circ\text{C}$), ou seja, aproximadamente 1°C menor que o valor para a situação de convecção natural. Isto é facilmente explicável já que, ao diminuir a resistência a troca de calor da placa com o meio externo para uma mesma temperatura ambiente T_∞ (295 K), mantido os demais parâmetros, maior será a troca de calor das superfícies da placa com o meio externo. O salto de temperatura na interface ΔT_c baixou de $11,4^\circ\text{C}$ no caso de convecção natural para o patamar de $10,5^\circ\text{C}$, pois o perfil dentro do alumínio não sofreu nenhuma alteração significativa.

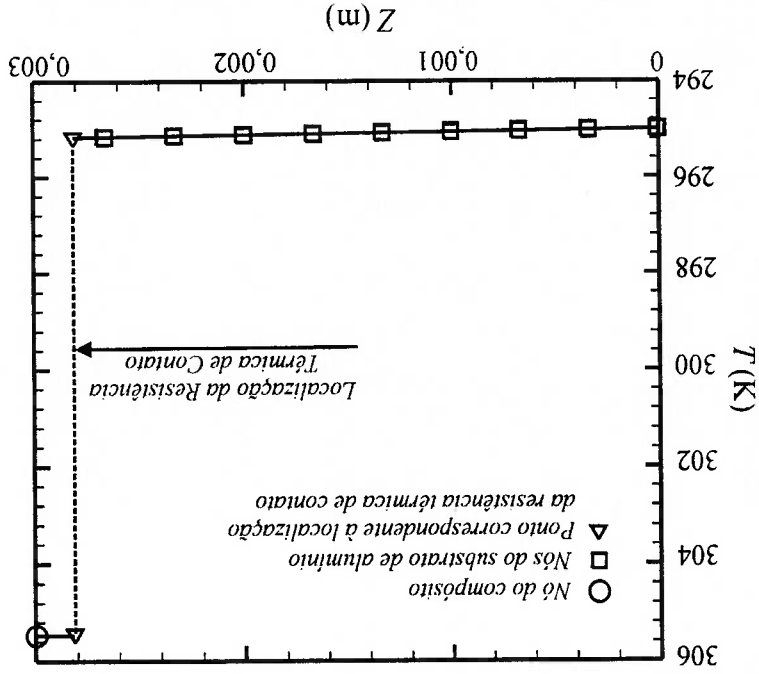


Figura 6.4 – Distribuição de temperatura no eixo central da placa para a situação

de convecção forçada ($X=Y=0,15 \text{ m}$) (substrato de alumínio, $e = 3 \text{ mm}$, $q_{rad} = 2 \text{ W/cm}^2$, $h = 40 \text{ W/m}^2\text{K}$, $R_{tc} = 6,64 \times 10^{-4} \text{ m}^2\text{K/W}$).

6.1.1.3 Elevada resistência de contato

No terceiro estudo, houve o aumento da resistência térmica de contato para uma ordem de grandeza superior à situação padrão. O novo valor usado para R_{tc} foi de $5 \times 10^{-3} \text{ m}^2\text{K/W}$, o que representa o caso em que há maior rugosidade e, conseqüentemente, menor aderência no contato entre substrato e compósito. Para a situação de elevada resistência de contato houve um aumento considerável na temperatura do compósito como se pode verificar na Fig. 6.5. O valor da temperatura na superfície do compósito para este caso é de $373,9 \text{ K}$ ($100,8 \text{ }^\circ\text{C}$), valor este muito próximo da Temperatura de Curie, mas dentro do intervalo considerado como aceitável. A distribuição de temperatura no alumínio se manteve a mesma dos casos anteriores proporcionando, assim, um ΔT_c de $78,7 \text{ }^\circ\text{C}$, valor bem superior ao encontrado na situação padrão.

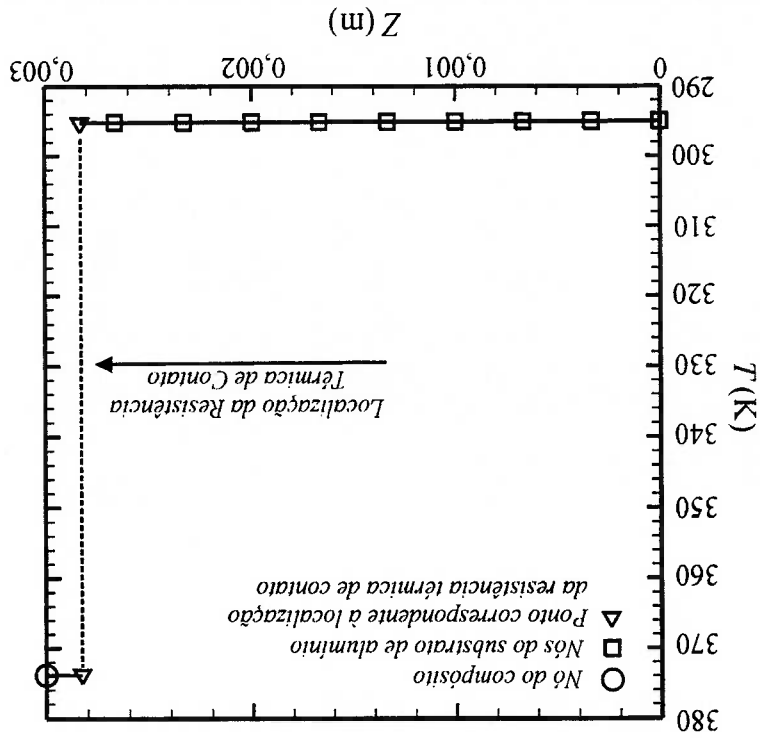


Figura 6.5 – Distribuição de temperatura no eixo central da placa para a situação de elevada resistência de contato ($X=Y=0,15 \text{ m}$) (substrato de alumínio, $e = 3 \text{ mm}$, $q_{rad} = 2 \text{ W/cm}^2$, $h = 10 \text{ W/m}^2\text{K}$, $R_{tc} = 5 \times 10^{-3} \text{ m}^2\text{K/W}$).

6.1.1.4 Baixa resistência de contato

Contrário ao caso anterior, a resistência térmica de contato agora foi reduzida a um décimo da situação padrão. O valor usado de R_{tc} para este estudo foi de $5 \times 10^{-5} \text{ m}^2\text{K/W}$, o que é conseguido com uma baixa rugosidade no contato e elevada aderência. Nesta situação houve a redução da temperatura na superfície do composto para aproximadamente 296 K, como se pode verificar na Fig. 6.6. Isto se deve à redução da resistência ao fluxo de calor na interface do composto com o substrato de alumínio, possibilitando uma maior influência da condição de contorno de temperatura constante de 295 K imposta pela face inferior do substrato. Mesmo com a redução da resistência de contato, este parâmetro ainda se mostrou predominante à resistência a condução de calor promovido pelo alumínio, e o aquecimento de 1°C verificado na superfície do composto, deve-se basicamente a sua influência.

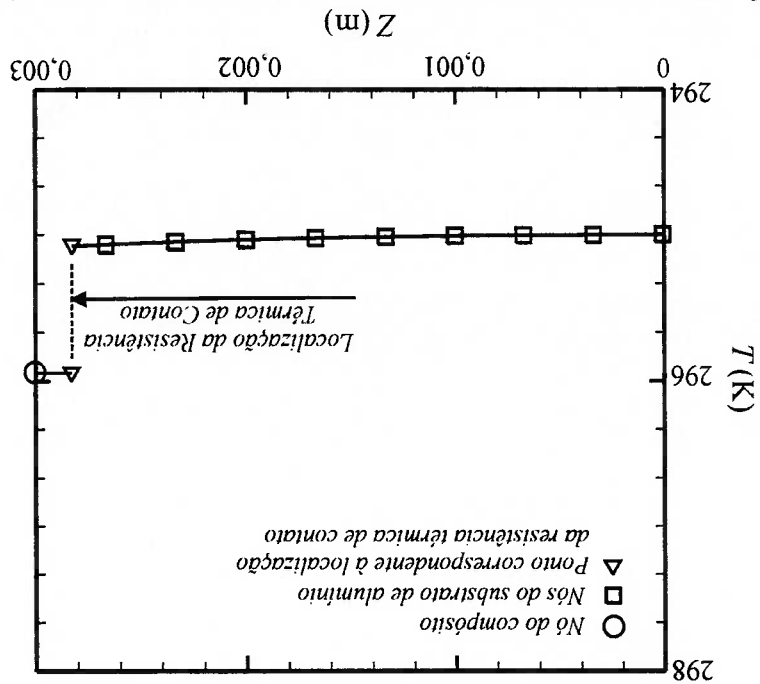


Figura 6.6 – Distribuição de temperatura no eixo central da placa para a situação de baixa resistência de contato ($X=Y=0,15 \text{ m}$) (substrato de alumínio, $e = 3 \text{ mm}$, $q_{ind} = 2 \text{ W/cm}^2$, $h = 10 \text{ W/m}^2\text{K}$, $R_{tc} = 5 \times 10^{-5} \text{ m}^2\text{K/W}$).

6.1.1.5 Substrato com espessura de 5 mm

Neste estudo, a espessura do substrato que na situação padrão é de 3 mm foi alterada para o valor de 5 mm. Esta modificação na espessura do substrato promoveu um leve acréscimo de temperatura no composto para o valor de 307,2 K (34,1°C) como pode ser verificado na Fig. 6.7. O perfil de temperaturas no substrato sofreu uma leve modificação, de modo que o nó localizado na face superior do alumínio, ou seja, na interface com o composto apresentou o valor de 295,3 K e, consequentemente, o valor ΔT_c ficou em 11,9°C. Com o aumento da espessura, a influência da condição de contorno de temperatura constante na face inferior da placa de alumínio apresentou uma redução, se comparada com a condição padrão. Mas esta condição de aumento de espessura não se apresentou de forma relevante, pois o acréscimo de temperatura na camada do composto, devido ao seu emprego, foi de apenas 0,6°C se comparada com a situação padrão.

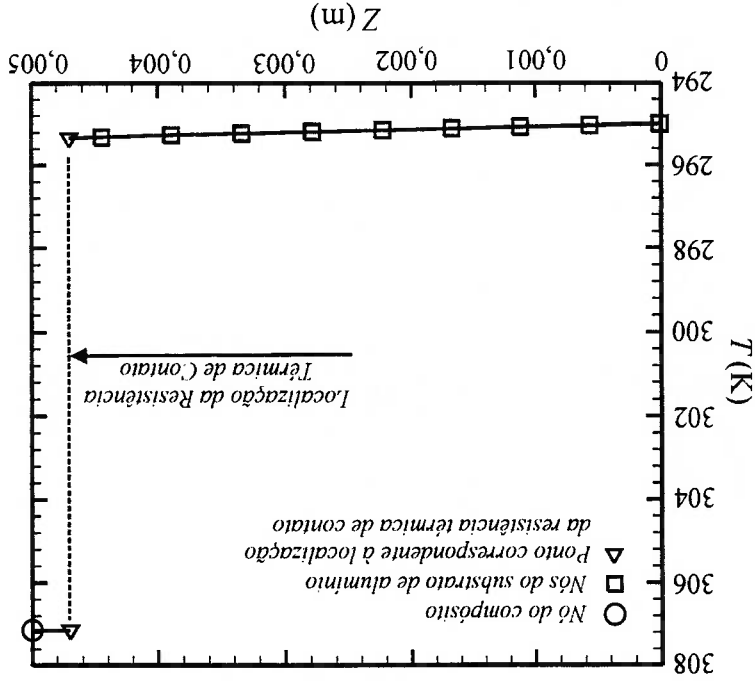


Figura 6.7 – Distribuição de temperatura no eixo central da placa para a situação de substrato com espessura de 5 mm ($X=Y=0,15$ m) (substrato de alumínio, $e = 5$ mm, $q_{rad} = 2$ W/cm², $h = 10$ W/m²K, $R_{tc} = 6,64 \times 10^{-4}$ m²K/W).

6.1.1.6 Substrato com espessura de 10 mm

Para este caso, a espessura do substrato foi aumentada para o valor de 10 mm. Seguindo o mesmo comportamento do caso anterior, houve um leve aquecimento na camada de composto, um pouco acima da situação de 5 mm. O valor da temperatura na superfície do composto chegou ao valor de 307,8 K (34,7 °C), como pode ser visto na Fig. 6.8. Já o valor de ΔT_c ficou em 12,2 °C, de maneira que a distribuição térmica no interior do alumínio, praticamente não sofreu grande alteração. A influência da condição de contorno de temperatura constante na face inferior da placa ficou ainda menor com o aumento da espessura, fazendo com que a temperatura na camada do composto se apresente com um aumento de 1,2 °C, se comparado com a condição padrão e de 0,6 °C, se comparado com a situação de espessura de 5 mm.

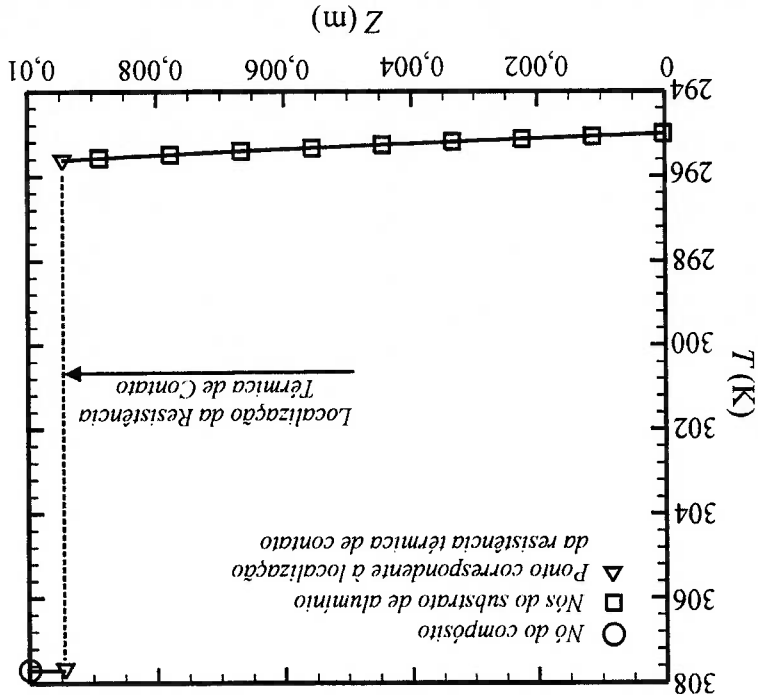


Figura 6.8 – Distribuição de temperatura no eixo central da placa para a situação de substrato com espessura de 10 mm ($X=Y=0,15$ m) (substrato de alumínio, $e = 10$ mm, $q_{rad} = 2$ W/cm², $h = 10$ W/m²K, $R_{t,c} = 6,64 \times 10^{-4}$ m²K/W).

6.1.1.7 Substrato de aço carbono

A alteração do material do substrato de alumínio para o de aço carbono promoveu o aumento de temperatura no composto além de modificar o perfil de temperatura no interior do substrato. A temperatura na superfície do composto subiu para o valor de 308,1 K (35 °C), como se pode verificar na Fig. 6.9. Este acréscimo de temperatura de 13,1 °C é devido à absorção de energia eletromagnética, uma vez que o aço, com menor condutividade térmica que o alumínio, conduz menos calor da superfície absorvedora para o substrato, dado a condição de temperatura constante de 295 K na face inferior. O aumento na inclinação do perfil de temperatura, se comparado com o de alumínio se deve, justamente, ao valor da condutividade térmica do aço ser inferior a do alumínio e, portanto, possuir uma maior resistência térmica. O salto de temperatura na região do contato ΔT_c ficou no valor de 12,4 °C, ou seja, 1 °C maior que a condição padrão.

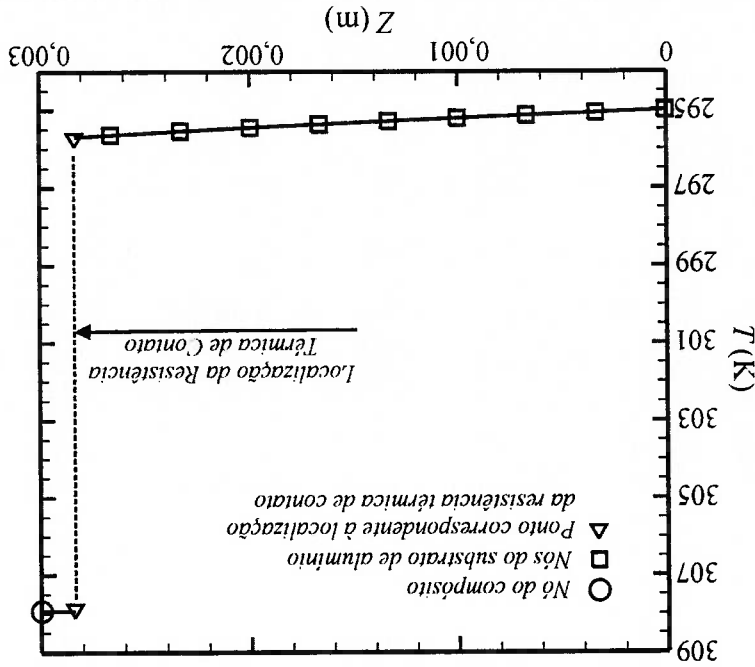


Figura 6.9 – Distribuição de temperatura no eixo central da placa para a situação de substrato de aço carbono ($X=Y=0,15$ m) (substrato de aço, $e = 3$ mm, $q_{rad} = 2$ W/cm², $h = 10$ W/m²K, $R_{tc} = 6,64 \times 10^{-4}$ m²K/W).

6.1.1.8 Substrato de acrílonitrila-butadieno-estireno (ABS)

Com a utilização de um substrato que apresenta a característica de baixíssima condutividade térmica, como é o caso do ABS, houve uma grande mudança tanto no perfil de temperatura no interior no substrato, como, também, na absorção da energia eletromagnética por parte do composto. A temperatura na superfície do composto chegou ao valor teórico de $504,4 \text{ K}$ ($231,3 \text{ }^\circ\text{C}$), como se pode ver na Fig. 6.10. Este valor tem um significado apenas teórico, já que a condição da Temperatura de Curie ($110 \text{ }^\circ\text{C}$) teria sido alcançada e o material teria perdido suas propriedades de absorção eletromagnética. O valor de ΔT_c ficou em $7 \text{ }^\circ\text{C}$, demonstrando, assim, que o material do substrato pode ser mais relevante que a resistência térmica de contato para o mecanismo de troca de calor. O aumento significativo da inclinação no perfil de temperatura do substrato se deve, justamente, à condutividade do substrato de ABS ser muito baixa, em outras palavras, por este material possuir elevada resistência térmica.

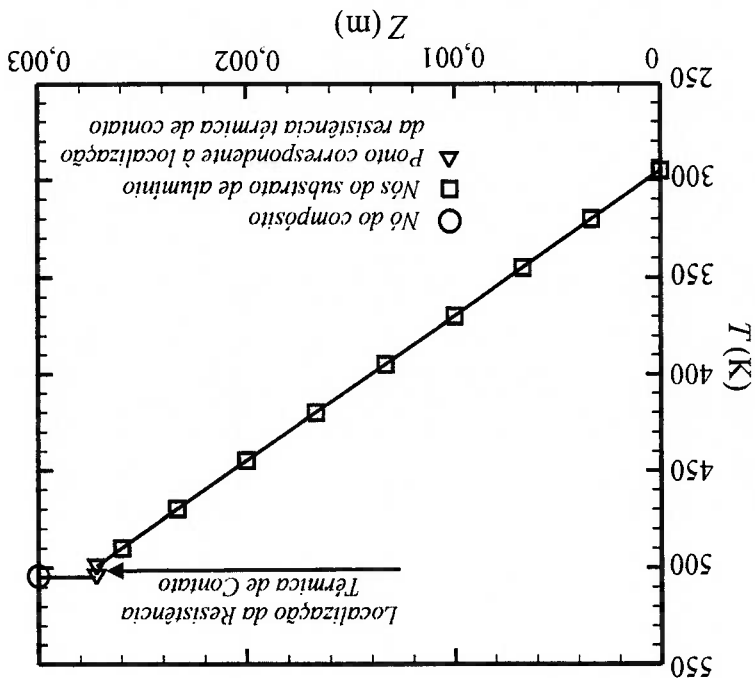


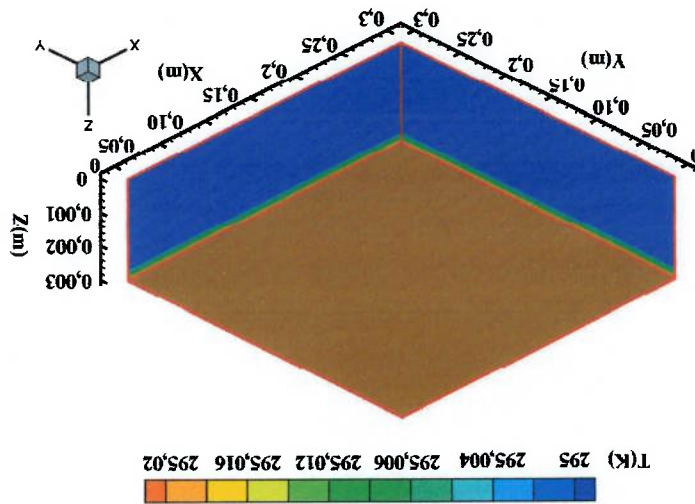
Figura 6.10 – Distribuição de temperatura no eixo central da placa para a situação de substrato de ABS ($X=Y=0,15 \text{ m}$) (substrato de ABS, $e = 3 \text{ mm}$, $q_{rad} = 2 \text{ W/cm}^2$, $h = 10 \text{ W/m}^2\text{K}$, $R_{tc} = 6,64 \times 10^{-4} \text{ m}^2\text{K/W}$).

6.1.2 Análise dos resultados para aplicação em Microondas

De acordo com os resultados obtidos pelas simulações realizadas, pode-se observar que os parâmetros de maior influência sobre o aquecimento de superfícies expostas à radiação de microondas foram: a resistência térmica de contato e o tipo de material do substrato. A variação na espessura do substrato também proporcionou uma variação no aquecimento da camada de compósito, mas este valor foi significativamente menor que o proporcionado pelos dois parâmetros mencionados acima. Sendo assim, pode-se sugerir um arranjo que possa promover o maior aquecimento da camada de compósito, que é o emprego de uma elevada resistência térmica de contato com um substrato de maior espessura possível e que seja composto por um material que apresente baixa condutividade térmica. Mas deve-se verificar se este arranjo não ultrapassa a restrição dada pela temperatura de Curie, pois, como dito anteriormente, este é o limite de absorção do material magnético. Portanto, uma análise das propriedades térmicas do material escolhido como substrato é de fundamental importância para se definir o limite de aquecimento do compósito. Contudo, deve-se verificar se existe alguma outra restrição que possa ser predominante ao fenômeno de aquecimento, como pode ser o caso do emprego de alguns materiais poliméricos como substratos. Estes materiais podem possuir temperaturas de transição vítrea, temperatura em que a mobilidade das cadeias moleculares se torna restrita pela coesão intermolecular, inferiores ao limite imposto pela Temperatura da Curie (110 °C). As temperaturas de transição vítrea, tanto do epóxi (130 °C) como do ABS (120 °C), são superiores a 110 °C, portanto, é mantida a restrição dada pela temperatura de Curie para o problema em estudo neste trabalho.

Para o caso em que se deseje reduzir a temperatura na superfície do compósito, um arranjo adequado é o emprego de uma baixa resistência de contato com um substrato de elevada condutividade térmica. Isto permite que o calor gerado pela absorção de eletromagnética consiga facilmente difundir-se pelo substrato e este, a uma condigão de contorno de temperatura inferior ao compósito, possa reduzir, significativamente, o aquecimento.

Figura 6.11 - Campo de temperaturas do substrato e composto (substrato de alumínio, $e = 3 \text{ mm}$, $q_{rad} = 50 \text{ W/m}^2$, $h = 10 \text{ W/m}^2\text{K}$, $R_{i,c} = 6,64 \times 10^{-4} \text{ m}^2\text{K/W}$).



Esta situação, como descrita na Seção 5.3 do capítulo anterior, é similar ao padrão proposto para aplicação em microondas, com a diferença no valor da potência de radiação que é de 50 W/m^2 e no coeficiente de absorção médio α_v dado por 0,966.

A distribuição de temperatura do substrato de alumínio revestido pelo composto na solução de regime permanente pode ser verificada na Fig. 6.11.

6.2.1.1 Situação padrão de simulação

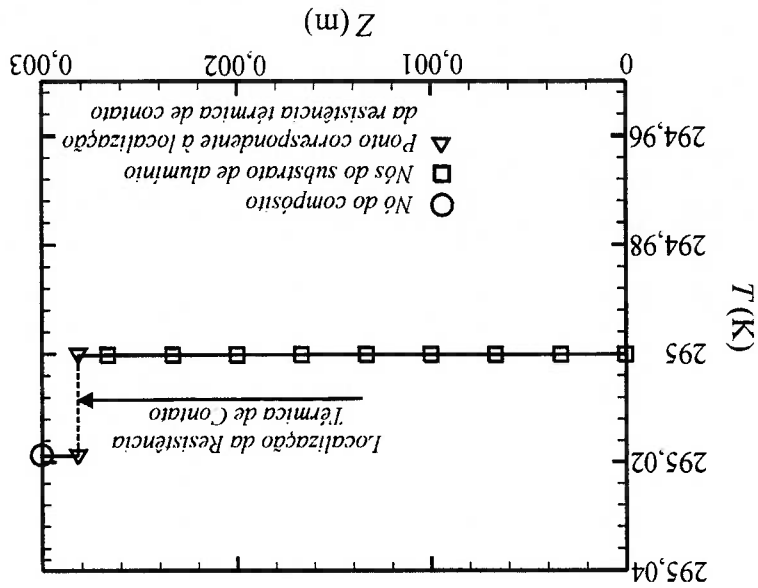
esquemático da Tab. 5.6 da Seção 5.3. A apresentação dos resultados segue a mesma sequência definida no mapa

6.2.1 Resultados

Nesta seção estão os resultados das simulações para o limite ocupacional à exposição de irradiação proposto pela Anatel que é de 50 W/m^2 . Os resultados da situação padrão e das variantes propostas para a simulação estão apresentados na Seção 6.2.1. Na Seção 6.2.2 discute-se estes resultados e propõe-se um arranjo que melhor se adapte a uma situação de emprego.

6.2 Resultados e Sugestões para Limite ANATEL

Figura 6.12 – Vista em corte vertical da camada central, para a cota X constante e equivalente a 0,15 m (substrato de alumínio, $e = 3$ mm, $q_{rad} = 50$ W/m², $h = 10$ W/m²K, $R_{tc} = 6,64 \times 10^{-4}$ m²K/W).

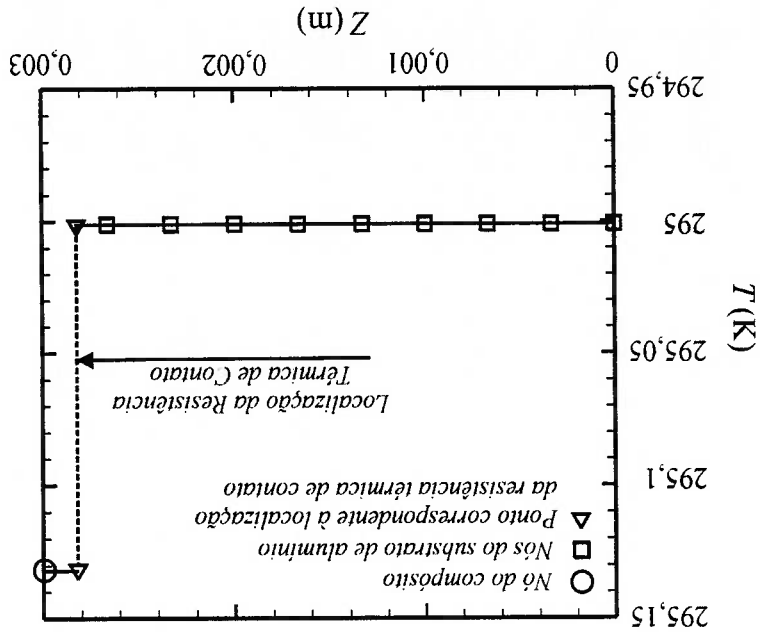


Ao analisar esta figura, verifica-se que o aquecimento devido à absorção das ondas eletromagnéticas continuou concentrando-se na camada do composto, mas este valor foi muito inferior ao da aplicação nas microondas, devido a esta potência de radiação ser 400 vezes menor. O detalhe da distribuição de temperatura pode ser verificado na Fig. 6.12, dado pelo gráfico da variação da temperatura em função da espessura, para X e Y constantes e iguais a 0,15m. Verifica-se que o nó localizado no composto apresentou a temperatura de 295,02 K, ou seja, praticamente não houve aquecimento na superfície do composto e este ligeiro aquecimento deve-se, exclusivamente, à resistência térmica de contato que apresentou um salto de temperatura ΔT_c de 0,19 °C. A resistência à condução de calor no alumínio para a espessura de 3 mm praticamente não promoveu alteração no perfil de temperaturas, sendo a temperatura de 295 K constante em toda a extensão.

Contrário ao comportamento do caso anterior, com a redução da resistência térmica de contato R_{tc} para $5 \times 10^{-5} \text{ m}^2\text{K/W}$, não houve alteração significativa na distribuição de temperaturas, tanto no substrato como no composto, ficando ambos no patamar de 295 K, como se verifica na Fig. 6.14.

6.2.1.3 Baixa resistência de contato

Figura 6.13 – Distribuição de temperatura no eixo central da placa para a situação de elevada resistência de contato ($X=Y=0,15 \text{ m}$) (substrato de alumínio, $e = 3 \text{ mm}$, $q_{rad} = 50 \text{ W/m}^2$, $h = 10 \text{ W/m}^2\text{K}$, $R_{tc} = 5 \times 10^{-3} \text{ m}^2\text{K/W}$).



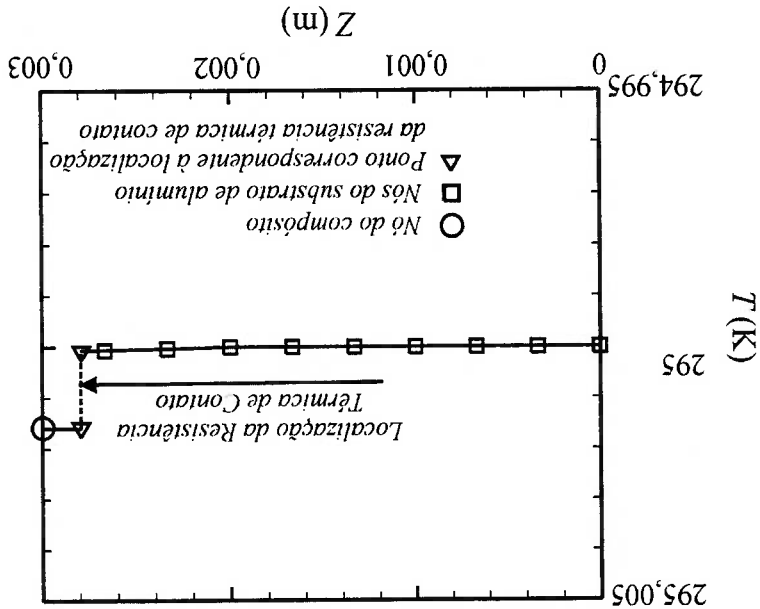
Neste segundo caso, houve a modificação da resistência térmica de contato para R_{tc} de $5 \times 10^{-3} \text{ m}^2\text{K/W}$, o que é conseguido quando se altera a rugosidade superficial ou a pressão no contato entre materiais. Para a situação de elevada resistência de contato houve um aumento na temperatura do composto chegando ao valor de 295,13 K, como se pode verificar na Fig. 6.13. Este valor é superior ao da situação padrão devido ao aumento da resistência no contato que fez com que o aquecimento se concentre apenas na camada do composto, deixando o substrato com a temperatura constante de 295 K.

6.2.1.2 Elevada resistência de contato

Com a alteração do material do substrato de alumínio para o de aço carbono verificou-se um pequeno aumento de temperatura na camada do composto, se comparado com a situação padrão, chegando ao valor de 295,03 K, como se pode verificar na Fig. 6.15. Neste caso, manteve-se o predomínio do efeito da resistência térmica de contato sobre o aumento da resistência à condução de calor devido a mudança do substrato, sendo que a região da interface demonstrou um salto de temperatura ΔT_c dado por 0,029 °C. Estes valores são bem abaixo dos encontrados para as microondas justamente pela queda dada à potência de radiação na superfície do composto.

6.2.1.4 Substrato de aço carbono

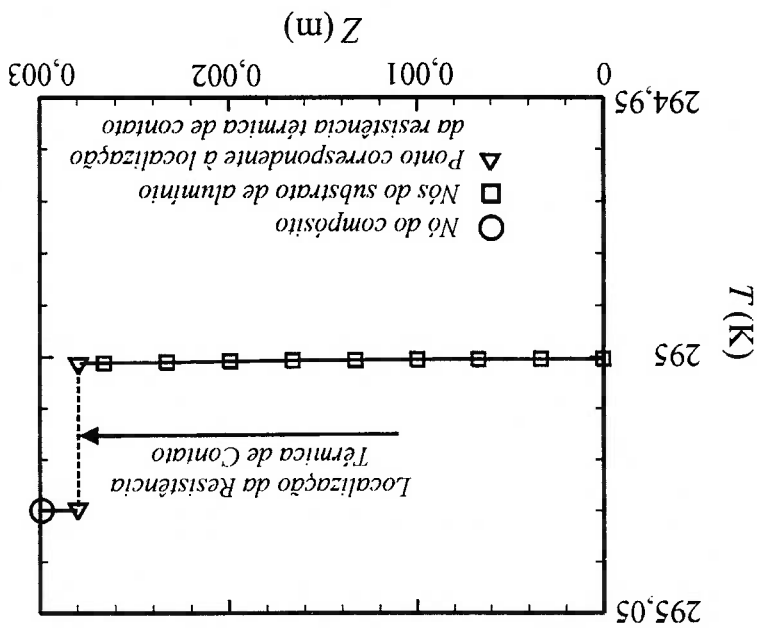
Figura 6.14 – Distribuição de temperatura no eixo central da placa para a situação de baixa resistência de contato ($X=Y=0,15$ m) (substrato de alumínio, $e = 3$ mm, $q_{rad} = 50$ W/m², $h = 10$ W/m²K, $R_{tc} = 5 \times 10^{-5}$ m²K/W).



Dentre as situações analisadas para a potência de radiação definida como limite pela ANATEL, o único que apresentou variação significativa na distribuição de temperatura foi a situação em que o substrato é de ABS. Para este caso, a baixa condutividade térmica do ABS proporcionou uma elevada resistência à condução de calor, sendo este mais influente no mecanismo de aquecimento da superfície do composto do que a resistência térmica de contato. A temperatura na superfície do composto chegou ao valor de 296,87 K, como pode ser visto na Fig. 6.16. O aumento significativo da inclinação no perfil de temperatura do substrato deve-se justamente à condutividade térmica do substrato de ABS ser baixa.

6.2.1.5 Substrato de acrílico-butadieno-estireno (ABS)

Figura 6.15 – Distribuição de temperatura no eixo central da placa para a situação de substrato de aço carbono ($X=Y=0,15$ m) (substrato de aço, $e = 3$ mm, $q_{rad} = 50$ W/m², $h = 10$ W/m²K, $R_{tc} = 6,64 \times 10^{-4}$ m²K/W).

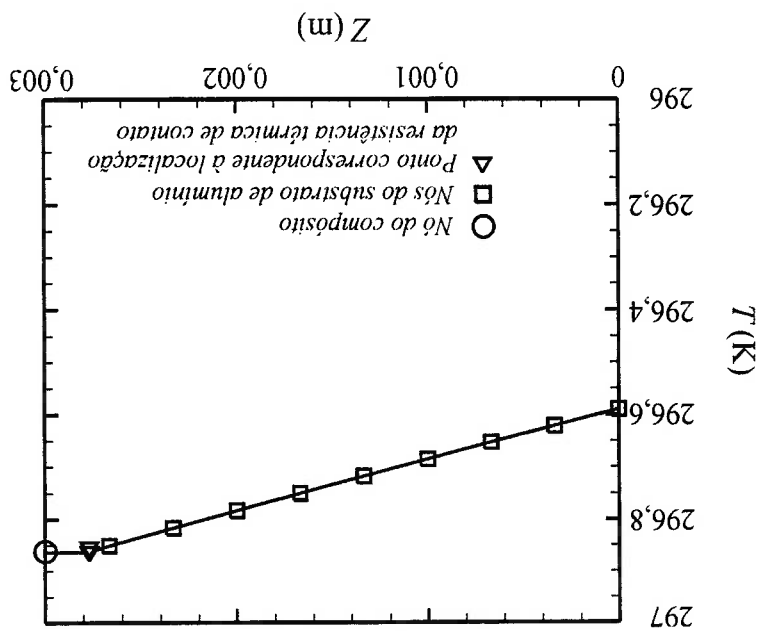


Para este estudo de caso a única aplicação que apresentou influência significativa no aquecimento da superfície do compósito foi o emprego de um material que possui uma baixa condutividade térmica, como é o caso do ABS, que é muito empregado em aparelhos celulares. Este tipo de substrato aliado a um aumento da resistência térmica de contato devido a irregularidades superficiais, pode proporcionar aquecimentos perceptíveis na superfície do compósito.

Para este caso, como a potência de radiação é bem inferior ao caso da aplicação em microondas, qualquer redução da resistência térmica de contato pode promover uma uniformização da distribuição de temperatura no arranjo compósito e substrato.

6.2.2 Análise dos resultados para o limite ocupacional ANATEL

Figura 6.16 – Distribuição de temperatura no eixo central da placa para a situação de substrato de ABS ($X=Y=0,15$ m) (substrato de ABS, $e = 3$ mm, $q_{rad} = 50$ W/m², $h = 10$ W/m²K, $R_{tc} = 6,64 \times 10^{-4}$ m²K/W).



6.3 Resultados e Sugestões para Radares (RCS)

Nesta seção estão os resultados das simulações para a aplicação em seção reta de radar (RCS) dada pela potência de radiação de $0,05 \text{ W/m}^2$. Os resultados da simulação padrão e das variantes propostas para a simulação estão presentes na Seção 6.3.1. Na Seção 6.3.2 são discutidos estes resultados.

6.3.1 Resultados

Devido ao valor baixo de irradiação, neste caso de aplicação, os resultados de todas as simulações propostas pela Seção 5.4 estão reunidos nesta seção, pois não apresentam variações relevantes, devido ao baixo aquecimento superficial promovido pelo baixo valor de irradiação.

O detalhe da distribuição de temperatura para a situação padrão de simulação dado pelo gráfico da variação da temperatura em função da espessura, para X e Y constantes e iguais a 0,15m, pode ser verificado na Fig. 6.17.

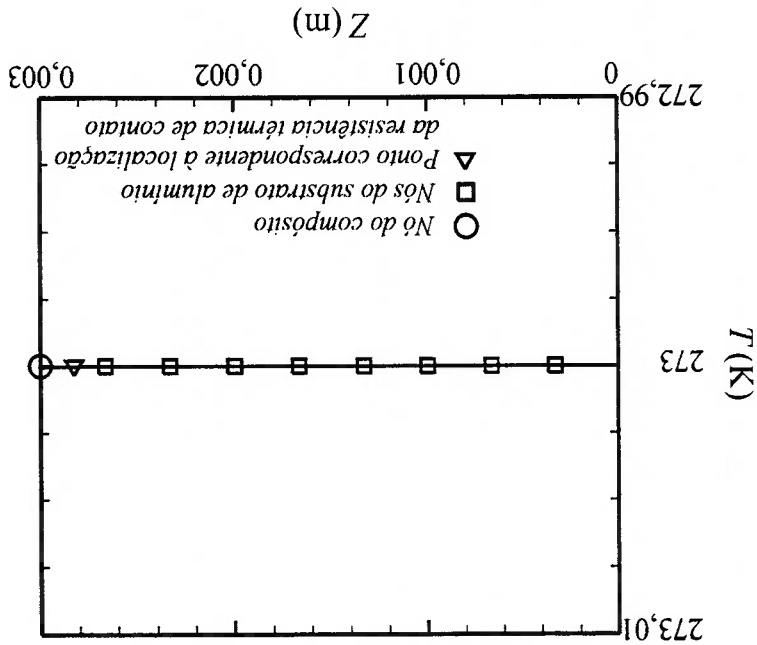
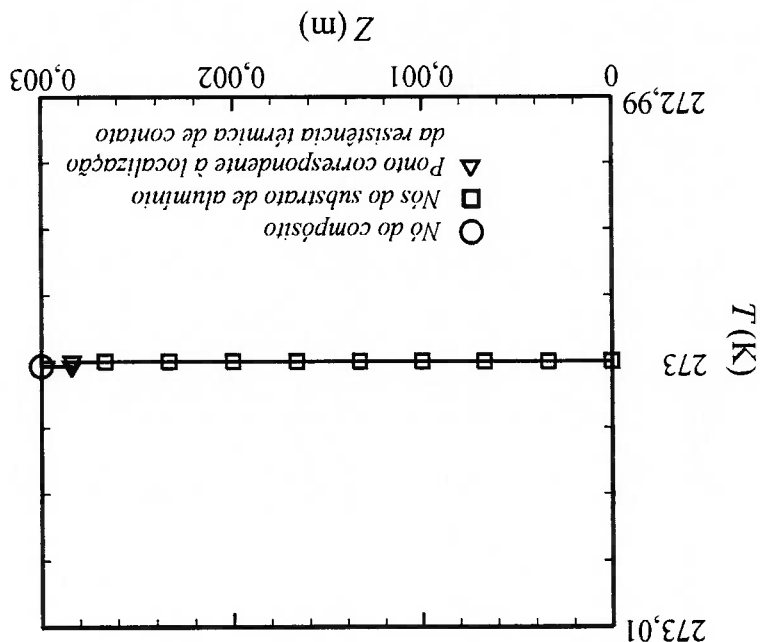


Figura 6.17 – Distribuição de temperatura no eixo central da placa para a situação padrão de simulação ($X=Y=0,15 \text{ m}$) (substrato de alumínio, $e = 3 \text{ mm}$, $q_{rad} = 0,05 \text{ W/m}^2$, $h = 40 \text{ W/m}^2\text{K}$, $R_{tc} = 6,64 \times 10^{-4} \text{ m}^2\text{K/W}$).

Figura 6.18 – Distribuição de temperatura no eixo central da placa para a situação de elevada resistência de contato ($X=Y=0,15$ m) (substrato de alumínio, $e = 3$ mm, $q_{rad} = 0,05$ W/m², $h = 40$ W/m²K, $R_{tc} = 5 \times 10^{-3}$ m²K/W).



Para a situação de elevada resistência de contato o perfil de temperaturas também não sofreu alteração significativa como, se verifica na Fig. 6.18.

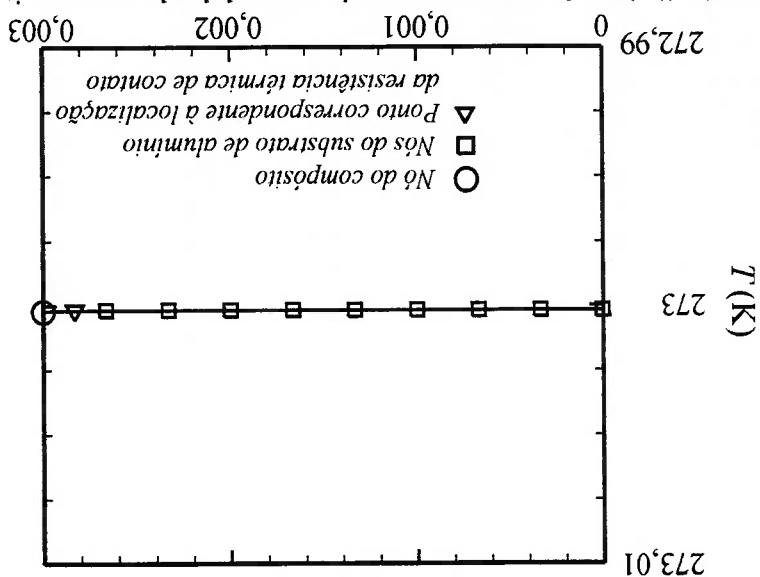
Para a situação de elevada resistência de contato o perfil de temperaturas também não sofreu alteração significativa como, se verifica na Fig. 6.18. Verifica-se na Fig. 6.17 que para esta potência de radiação, não houve aquecimento significativo na superfície do compósito. Tanto a resistência térmica de contato como a condutividade térmica do alumínio, não promoveram alterações no campo de temperaturas. Os mecanismos de troca de calor por convecção e de radiação para o meio externo predominaram sobre o de absorção eletromagnética. Isto se reflete no perfil de temperatura mantido constante no patamar de 273 K, em toda a extensão do substrato e na superfície do compósito.

A situação padrão de simulação para este caso é caracterizada por um substrato de alumínio com espessura de 3 mm, por uma resistência térmica de contato de valor $6,64 \times 10^{-4}$ m²K/W, por uma condição de troca de calor convectiva forçada com um h de 40 W/m²K a uma temperatura ambiente T_{∞} de 273 K e por troca de calor por radiação térmica com o meio externo à temperatura constante de 273 K.

Para aplicações em radares verificou-se que independente da variação dos parâmetros de resistência térmica de contato e do material do substrato, não houve alteração no perfil de temperaturas, já que o mecanismo de troca de calor convectiva e de radiação térmica se sobrepuseram ao aquecimento dado pela absorção, devido à baixa potência de irradiação da aplicação em radares.

6.3.2 Análise dos resultados para aplicação em radares (RCS)

Figura 6.19 – Distribuição de temperatura no eixo central da placa para a situação de substrato de aço carbono ($X=Y=0,15$ m) (substrato de aço, $e = 3$ mm, $q_{rad} = 0,05$ W/m², $h = 40$ W/m²K, $R_{i,c} = 6,64 \times 10^{-4}$ m²K/W).



Para esta situação houve apenas um pequeno acréscimo de temperatura na região da interface, mas a ordem de grandeza é muito baixa. No caso da utilização do substrato de aço carbono, assim como nos casos anteriores para aplicação em radares, o perfil de temperatura não apresentou modificações expressivas e a temperatura no substrato de aço e na superfície do composto mantiveram o valor de 273 K, como se verifica na Fig. 6.19.

7 CONCLUSÕES E TRABALHO DO CONTINUIDADE

Este capítulo apresenta as conclusões do presente trabalho e propõe a continuidade que se pode dar para uma análise mais detalhada do problema, uma vez que simplificações foram utilizadas ao modelo proposto.

7.1 Conclusões

Diferentemente de uma conclusão prévia de que a potência de radiação é o único parâmetro de importância no mecanismo de aquecimento do composto, este trabalho demonstrou que o tipo de material empregado no substrato e o acabamento superficial da interface entre substrato e composto são fatores que influenciam na distribuição de temperatura, tanto quanto a potência de irradiação eletromagnética incidente. A importância destes fatores se deve ao fato de quantificar a resistência térmica ao fluxo de calor no arranjo total, proveniente da diferença de temperatura entre substrato e composto devido à absorção da radiação eletromagnética na frequência não-ionizante.

Na aplicação em microondas, o caso padrão foi caracterizado por um substrato de alumínio com espessura de 3 mm, por uma resistência térmica de contato de valor $6,64 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \text{K/W}$, por uma condição de troca de calor convectiva com um h de $10 \text{ W/m}^2 \text{K}$ a uma temperatura ambiente T_{∞} de 295 K e, por uma troca de calor por radiação térmica com o meio externo à temperatura de 295 K. Esta situação padrão apresentou um aquecimento na superfície do composto registrando a temperatura de 306,6 K (33,5 °C), sendo a resistência térmica de contato o fator predominante, proporcionando um salto de ΔT_c de 11,4 °C. Variando-se a condição de contorno de convecção forçada, a temperatura no composto caiu para o valor ligeiramente menor de 305,7 K (32,6 °C), devido justamente à redução na resistência ao fluxo de calor da superfície do composto com o meio externo. Nesta situação a resistência de contato continuou mantendo-se como parâmetro de maior influência no aquecimento

apresentando um ΔT_c de 10,5 °C. Com o aumento da resistência térmica de contato ($5 \times 10^3 \text{ m}^2 \text{K/W}$), houve um aumento considerável na temperatura da camada de composto atingindo o valor de 373,9 K (100,8 °C) e proporcionando um ΔT_c de 78,7 °C. Em contrapartida, com a redução da resistência térmica de contato ($5 \times 10^5 \text{ m}^2 \text{K/W}$) o aquecimento caiu para 296 K, sendo que este 1 °C de aquecimento se deve ainda à resistência térmica de contato. Modificações na espessura do substrato de 3 mm para 5 mm e 10 mm, incorreram em aumentos de temperaturas superficiais no composto para 307,2 K (34,1 °C) e 307,8 K (34,7 °C), respectivamente, devido ao aumento na resistência à condução proporcionado pela variação desta grandeza. No caso do substrato de aço carbono, a temperatura do composto atingiu 308,1 K (35 °C), valor este ligeiramente superior ao caso padrão devido à condutividade do aço ser inferior a do alumínio e, consequentemente, ao aumento da resistência à condução de calor no substrato. Neste caso, a resistência térmica de contato continuou sendo o fator preponderante no fenômeno de aquecimento. Para a utilização do ABS como substrato nesta potência de irradiação (20000 W/m²), a temperatura na superfície do composto chegou ao valor teórico de 504,4 K (231,3 °C). Este valor é teórico, já que a condução da temperatura de Curie (110 °C) teria sido alcançada e o material já teria perdido suas propriedades de absorção eletromagnética. Neste caso a resistência à condução de calor foi predominante sobre a resistência térmica de contato que proporcionou um salto de temperatura de apenas 7 °C.

Nas situações analisadas para a potência de irradiação, definida como limite pela ANATEL, a única que apresentou variação significativa na distribuição de temperatura foi a do substrato de ABS. A temperatura na superfície do composto chegou ao valor de 296,87 K, ou seja, mesmo com a potência de 50 W/m², valor bem inferior ao caso da aplicação em microondas, foi promovido um aquecimento de aproximadamente 1,9 °C no composto. Para a situação padrão, e demais casos, não ocorreram alterações significativas no perfil de temperaturas da placa.

Como continuidade deste trabalho, é sugerido um detalhamento experimental do mecanismo de absorção eletromagnético da ferrita em função da espessura do composto e em função da frequência de utilização. Assim poderia ser aplicada uma lei de decaimento da absorção em função da espessura do composto para todas as frequências e, consequentemente, poderia ser discretizada, na direção da espessura, a camada absorvedora de epóxi-ferrita. Com isto, haveria um maior detalhamento do mecanismo de absorção eletromagnético, deixando-se de lado a simplificação imposta pelo método da capacitância global.

7.2 Continuidade do Trabalho

Na simulação para a irradiação de radares, nenhum caso simulado promoveu alterações no campo de temperaturas e foi mantido o patamar de 273 K em toda a extensão do substrato e superfície do composto.

Pode-se concluir que, mesmo não sendo o único parâmetro de importância, a potência de radiação é o fator predominante neste fenômeno, pois define a possibilidade ou não do aquecimento da camada de composto. Valores baixos de irradiação não promovem variação na distribuição térmica do conjunto, independente do material do substrato e da resistência térmica de contato imposta ao problema. Para valores de irradiações que possibilitem aumentos consideráveis de temperatura devido à absorção, o resultado do aquecimento do composto para o regime permanente fica diretamente relacionado à variação da resistência térmica de contato e ao tipo de substrato utilizado.

Portanto, quando se deseja o aquecimento da superfície do composto, o arranjo com uma elevada resistência de contato e com um substrato de baixa condutividade térmica aliada a maior espessura possível se caracteriza como o mais eficiente, mas deve ser respeitada a restrição imposta pela temperatura de Curie. Quando se deseja “camuflar” termicamente a superfície do composto, uma baixa resistência térmica de contato aliada a um substrato composto por um material com elevada condutividade térmica se apresenta como um arranjo ideal por reduzir a resistência ao fluxo de calor do composto para o substrato.

Pode-se, também, levantar dados experimentais sobre a resistência térmica de contato entre substratos de diferentes tipos de acabamentos e compósito, para ter valores mais próximos da situação real de emprego e avaliar qual é a variação desse parâmetro. Assim, poderia ser analisado o efeito que do acabamento superficial no aquecimento da camada de compósito devido à variação da resistência térmica de contato.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAIR, E.R. Thermophysiological effects of electromagnetic radiation. *IEEE. Eng. Med. Biology*, v. 6, p.37-41, 1987.
- BOLTON, W. *Engineering Materials Technology*. 3ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1998.
- BUCHANAN, R.C.; REYNOLDS, G.T. *Ceramic Materials for Electronics - Processing, properties and applications*. 2ed. New York: Marcel Dekker Inc, 1991.
- CABRERA, J.M.; MORCILLO, A.D.; CIVERA, J.C.; REYES, E. Heat flux generation characterization in a wet-laminar body in microwave-assisted drying: an application to microwave drying leather. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, v.27, n°8, p.1101-1110, 2000.
- CARRINGTON, A.; MCLACHLAN, A.D. *Introduction to Magnetic Resonance with Applications to Chemistry and Chemical Physics*. Harper International Ed. New York: John Weatherhill Inc, 1967. 266p.
- CENTRO TÉCNICO AEROSPACIAL (CTA), 1998, MIGLIANO, A.C.C.; MARTIN, I.M.; SILVA, F.S.; Dias, J.C.; Resende, M.C. *Processo para obtenção de manta flexível para a absorção de radiação eletromagnética na faixa de 2-20 GHz à base de poliuretanos aditados com ferrita, fibras e/ou partículas de carbono*, Código do Registro: P19806680, DEZ/1998.

CENTRO TÉCNICO AEROSPACIAL (CTA), 2002, MIGLIANO, A.C.C.; FREITAS, C.A.; MELO, F.L.C.; ORLANDO, A.J.F. Processo de fabricação de manta absorvedora de microondas com resina epóxi usando o aditivo MnO-MgO-Fe₂O₃, Código do Registro: n.002069, Maio/2002.

CHEN, W.C. *Magnetism and Metallurgy of Soft Magnetic Materials*. New York: Dover Publications, 1986. 571p.

CHEN, Y.F.; YEH, C.T.; WEN, C.Y.; WU, C.H.; YEH, S.H. Na experimental investigation of thermal contact conductance across bolted joints, *Experimental Thermal and Fluid Science*, 25, 349-357, 2001.

CLEARY, S.F. Cellular effects of electromagnetic radiation. *IEEE. Eng. Med. Biology*, v.6, p.26-30, 1987.

D'ANDREA, J.A. Microwave radiation absorption: behavioral effects. *Health Physics*, v.61, n°1, p.29-40, 1991.

DURNEX, C.H.; MASSOUDI, H.; ISKANDER, M.F. *Radiofrequency radiation dosimetry handbook*, Brooks Air Force Base, 1985.

DURNEX, C.H.; MASSOUDI, H.; ISKANDER, M.F. Long wavelength analysis of plane-wave irradiation of a prolate spheroid model of man. *IEEE Trans. Microwave Theory*, v.23, p.46-253, 1975.

FLETCHER, L.S.; MAROTTA, E.E.; MIRMIRA, S.R. Thermal Contact Conductance of Adhesives for Microelectronic Systems, *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, AIAA, v.11, p.141-145, 1997.

- FREITAS, A.C. Efeitos dos aditivos a base de MnO-Mg-Fe₂O₃ em mantas absorvedoras para aplicação aeroespacial. 2001. p.92. Tese – UNESP-FEG. Guaratingueta Maio de 2001.
- GANDHI, O.P. Biological Effects and Medical Applications of Electromagnetic Energy. Prentice Hall biophysics and bioengineering series, 1990.
- GANDHI, O.P. Polarization and frequency effects on whole-animal absorption of RF energy. *Proceedings. IEEE*, v.62, p.1166-1168, 1974.
- GEBHART, B. Heat Conduction and Mass Diffusion, McGraw-Hill, Inc; 1993, 634p.
- HECK, C. *Magnetic Materials and their applications*. London: Butterworths, 1974.
- INCROPERA, F. P., DEWITT D. P. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, John Wiley & Sons, Inc, 1996, 494p.
- KREITH, F. *Principles of Heat Transfer*. New York: Intext Educational Publishers, 1973, 550p.
- LARAQI, N.; BAIRI, A. Theory of thermal resistance between solids with randomly sized and located contacts. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v.45, p.4175-4180, 2002.
- LIU, J.C. The microwave auditory phenomenon. *Proceedings. IEEE*, v.68, p.67-73, 1980.
- LOVEL, M.C.; AVERY, A.J.; VERSON, M.W. *Physical Properties of Materials*. New York: Van Nostrand Reinhold Company Ltd, 1976, 304p.

- MIGLIANO, A. C. C.; FREITAS, C.ª "Blindagens Eletromagnéticas em Circuitos Eletrônicos a base de ferritas de Mg-Mn" Periódico: **Telecomunicações**, Revista da Sociedade Brasileira de Telecomunicações, v.05, nº2, p33-36, 2002.
- MIGLIANO, A.C.C.; MARTINI, I.M.; SILVA, F.S.; DIAS, J.C.; REZENDE, M.C.; 1999, Caracterização Experimental de Tintas Absorvedoras de Radiação Eletromagnética, **Anais do 6º Congresso Internacional de Tintas**, v.2, p.453-460.
- PERKIN, R.M. The heat and mass transfer characteristics of boiling point drying using radio frequency and microwave electromagnetic fields. **International journal of Heat and Mass Transfer**, v. 23, p.687-695, 1980.
- PINGKUAN, D.; GHANG, P.Y.; DWYER, H.A. Heat and mass transfer during microwave steam treatment of contaminated soils. **Journal of Environmental Engineering**, v.126, p.1108-1115, 2000.
- SMIT, J.; WIJN, H.P.J. **Ferrites** physical properties of ferrimagnetic oxides in relation to their technical applications, Philips Technical Library, 1959. 369p.
- TEBBLE, R. S.; CRAIK, D.J. **Magnetic Materials**. London and New York: John Wiley & Sons Ltd, 1969. 726p.
- TURTELLI, R. S.; DUONG, V. H.; GROSSINGER, R.; SCHWITZ, M.; FERRARA, E. Contribution of the Crystalline Phase $Fe_{100-x}Si_x$ to the Temperature Dependence of Magnet Properties of FINEMET – Type Alloys, **IEEE Transactions on Magnetics**, v.36, p.508-512, 2000.

VAN VLACK, L.H. *Princípios de Ciência dos Materiais*. Ed. Edgard Blucher Ltda,

1988, 427p.

VOGLER, G. Curie Point Shift in Mn-Zn-Fe Ferrites, *Physics Status Solidi B*, v.43,

1971.

VON AULOCK, W. H. *Handbook of microwave ferrite materials*. New York:

Academic Press, 1965. 518p.

WEINDENFELLER, B.; HOFER, M.; SCHILLING F. Thermal and electrical

properties of magnetic filled polymers. *Composites Part A*, v.33, p.1041-1053,

2002.

ZHANG, H.; DATTA, A.K. Coupled electromagnetic and thermal modeling of
microwave oven heating of foods. *Journal of Microwave Power and*

Electromagnetic Energy, v. 35, n°2, p.71-85, 2000.