

N. 29 / 93

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA  
CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

TÍTULO : CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DE MATERIAIS  
DE MUDANÇA DE FASE EM SISTEMAS DE ARREFECIMENTO DE  
COMPONENTES ELETRÔNICOS.

DISSERTAÇÃO APRESENTADA A UNIVERSIDADE FEDERAL DE  
UBERLÂNDIA POR :

ANTONIO CARLOS FERREIRA

PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA.  
APROVADA EM 12 / 02 / 93.

BANCA EXAMINADORA:

Prof.Dr. Orosimbo A.A. Rego (orientador) - UFU  
Prof.Dr. Lutero Carmo de Lima - UFU  
Prof.Dr. Edson Luis Zapparoli - ITA-CTA

DIRBI/UFU

620.181 F383c /TES/FU  
01762/93



1000015250

UBERLÂNDIA, 12 DE FEVEREIRO DE 1993.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA

CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DE MATERIAIS DE MUDANÇA  
DE FASE EM SISTEMAS DE ARREFECIMENTO DE COMPONENTES ELETRÔNICOS

Dissertação apresentada a Universidade Federal de  
Uberlândia, por ANTONIO CARLOS FERREIRA, para obtenção do  
título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Aprovada em     /     /     , com conceito "     ", pela Banca  
Examinadora :

Prof.Dr. Orosimbo A.A. Rego (orientador) - UFU

Prof.Dr. Lutero Carmo de Lima - UFU

Prof.Dr. Edson Luis Zapparoli - ITA-CTA

UBERLÂNDIA, 12 DE FEVEREIRO DE 1993.

Dedico este trabalho a meus  
pais, Antonio Manuel Ferreira  
e Nair Nardi Ferreira.

## Meus Sinceros Agradecimentos

Ao professor Dr. Orosimbo Andrade de Almeida Rego, orientador desta dissertação, por seus ensinamentos, incentivo, e confiança depositada.

Aos professores Ricardo Fortes de Miranda , Carlos Alberto de Melo e Lutero Carmo de Lima pela colaboração didática.

A todos meus parentes, em especial a minha tia Lu, pela ajuda nos momentos mais difíceis.

Aos meus amigos que de uma forma ou de outra colaboraram com a execução deste trabalho.

A minha esposa Lúcia Helena e ao Dudu por sua paciência, apoio e compreensão.

Ao CNPq, pela ajuda financeira recebida.

## SUMÁRIO

I	- <u>INTRODUÇÃO</u>	1
I.1	- CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
I.1.1	- Definição	1
I.1.2	- Aplicações	2
I.1.3	- Materiais de Mudança de Fase	3
I.2	- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
I.3	- OBJETIVOS	8
II	- <u>FORMULAÇÃO DO PROBLEMA</u>	10
II.1	- EQUAÇÕES NAS COORDENADAS FUNDAMENTAIS	10
II.2	- CONDIÇÕES DE CONTORNO	17
II.3	- CALOR FORNECIDO, CALOR PERDIDO E CALOR ARMAZENADO	18
II.4	- PROPRIEDADES DO MATERIAL DE MUDANÇA DE FASE	19
II.5	- ADIMENSIONALIZAÇÃO DAS EQUAÇÕES	21
III	- <u>DISCRETIZAÇÃO DAS EQUAÇÕES</u>	27
IV	- <u>SOLUÇÃO NUMÉRICA</u>	42
V	- <u>RESULTADOS E ANÁLISES</u>	48
V.1	- INTRODUÇÃO	48
V.2	- VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS	52
V.3	- RESULTADOS DOS ENSAIOS	55
V.3.1	- Ensaio.1	55
V.3.2	- Ensaio.2	61

V.3.3 - Ensaio.3	67
V.3.4 - Ensaio.4	73
V.3.5 - Ensaio.5	79
V.3.6 - Ensaio.6	82
VI - <u>CONCLUSÕES</u>	88
VI - <u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	90

V.3.3 - Ensaio.3	67
V.3.4 - Ensaio.4	73
V.3.5 - Ensaio.5	79
V.3.6 - Ensaio.6	82
VI - <u>CONCLUSÕES</u>	88
VI - <u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	90

## LISTA DE FIGURAS

Fig.	Descrição	Pag.
1	- Modelo do dispositivo estudado	10
2	- Fluxo de calor fornecido	11
3	- Comportamento das propriedades do material de mudança de fase com a temperatura	20
4	- Nomenclatura para a solução numérica	27
5	- Volumes de controle para a componente de velocidade U	28
6	- Volumes de controle para a componente de velocidade V	29
7	- Volumes de controle para os campos de temperatura e pressão	30
8	- Fluxograma do programa computacional	44
9	- Comportamento das curvas de calor fornecido, calor armazenado e perdido com o tempo, para diferentes graus de resfriamento	53
10	- Frente de fusão x Fourier - ENSAIO.1	55
11	- Fração de massa fundida x Fourier - ENSAIO.1	56
12	- Calor armazenado adimensional x Fourier - ENSAIO.1	56
13	- Temperatura na parede x Tempo	57
14	- Fração de massa fundida x Fourier - ENSAIO.2	61
15	- Frentes de fusão x Fourier - ENSAIO.2	62
16	- Temperatura na parede x Tempo - ENSAIO.2	63
17	- Calor armazenado adimensional x Fourier - ENSAIO.2	64
18	- Fração de massa fundida x Fourier - ENSAIO.3	67



Fig.	Descrição	Pag.
19	- Frentes de fusão x Fourier - ENSAIO.3	68
20	- Temperatura na parede x Tempo - ENSAIO.3	69
21	- Calor armazenado adimensional x Fourier - ENSAIO.3	70
22	- Fração de massa fundida x Fourier - ENSAIO.4	73
23	- Frentes de fusão x Fourier - ENSAIO.4	74
24	- Temperatura na parede x Tempo - ENSAIO.4	75
25	- Calor armazenado adimensional x Fourier - ENSAIO.4	76
26	- Massa fundida x Tempo - ENSAIO.5	79
27	- Temperatura na parede x Tempo - ENSAIO.5	80
28	- Fração de massa fundida x Fourier - ENSAIO.6	83
29	- Calor armazenado adimensional x Fourier - ENSAIO.6	84
30	- Temperatura dos pontos escolhidos x Tempo - ENSAIO.6	85

## L I S T A   D E   T A B E L A S

Tabela	Descrição	Pag.
1	- Propriedades do M.M.F. usadas nos cálculos computacionais	50
2	- Valores das variáveis geométricas e parâmetros de transferência de calor adimensionais escolhidos para o estudo numérico, para $H = 0.1$ m	50
3	- Ensaio realizados	51

## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

### Letras Latinas :

$A, \bar{A}$	: Coeficientes definidos em (65)	
$B, \bar{B}$	: Coeficientes definidos em (99)	
$Bi$	: Número de Biot definido em (44)	
$C_1, C_2$	: Coeficientes definidos em (53)	
$CLF$	: Calor latente de fusão	[ J/Kg ]
$C_p$	: Calor específico	[J/kg. °C]
$C_{p_l}$	: Calor específico da fase líquida	[J/kg. °C]
$C_{p_s}$	: Calor específico da fase sólida	[J/kg. °C]
$\hat{C}_p$	: Calor específico adimensional definido em (59)	
$\hat{C}_{p_{s1}}$	: Calor específico adimensional definido em (58)	
$D, \bar{D}$	: Coeficientes definidos em (68)	
$F$	: Coeficientes definidos em (67)	
$Fo$	: Número de Fourier definido em (39)	
$g$	: Aceleração da gravidade	[ m/s <sup>2</sup> ]
$h$	: Coeficiente de convecção	[W/m <sup>2</sup> . °C]
$H$	: Altura do armazenador	[ m ]
$K$	: Condutividade térmica	[ W/m. °C]
$K_l$	: Condutividade térmica da fase líquida	[ W/m. °C]
$K_s$	: Condutividade térmica da fase sólida	[ W/m. °C]
$\hat{K}$	: Condutividade térmica adimensional em (43)	
$\hat{K}_{s1}$	: Condutividade térmica adimensional em (58)	
$L$	: Espessura do M.M.F.	[ m ]
$L^*$	: Espessura adimensional definida em (53)	

$p$	: Pressão dinâmica	[ Pa ]
$p^*$	: Pressão definida em (6)	[ Pa ]
$p_o$	: Pressão definida em (38)	[ Pa ]
$P$	: Pressão adimensional definida em (37)	
$Pe, \bar{Pe}$	: Números de Peclet definidos em (69)	
$Pr$	: Número de Prandtl	
$\dot{q}$	: Fluxo de calor fornecido ao M.M.F.	[ W/m <sup>2</sup> ]
$\dot{q}_o$	: Fluxo de calor definido em (41)	[ W/m <sup>2</sup> ]
$q$	: Fluxo de calor adimensional definido em (41)	
$Q_a^*$	: Calor armazenado pelo M.M.F.	[ J ]
$Q_f^*$	: Calor fornecido ao M.M.F.	[ J ]
$Q_p^*$	: Calor perdido pelas fronteiras do M.M.F.	[ J ]
$Q_a$	: Calor armazenado adimensional definido em (57)	
$Q_f$	: Calor fornecido adimensional definido em (54)	
$Q_p$	: Calor perdido adimensional definido em (56)	
$Ra$	: Número de Rayleigh definido em (46)	
$t$	: Tempo	[ s ]
$t_o$	: Tempo definido em (40)	[ s ]
$T$	: Temperatura	[ °C ]
$T_b$	: Temperatura do fluido de resfriamento	[ °C ]
$T_i$	: Temperatura inicial	[ °C ]
$T_{mf}$	: Temperatura de mudança de fase	[ °C ]
$T_{tr}$	: Temperatura de transição	[ °C ]
$u$	: Componente de velocidade na direção x	[ m/s ]
$u_i$	: Velocidade inicial na direção x	[ m/s ]
$u_o$	: Velocidade definida em (35)	[ m/s ]
$U$	: Componente de velocidade em X adimensional	
$U_i$	: Velocidade inicial na direção X adimensional	

$v$  : Componente de velocidade na direção  $y$  [ m/s ]  
 $v_i$  : Velocidade inicial na direção  $y$  [ m/s ]  
 $V$  : Componente de velocidade em  $Y$  adimensional  
 $V_i$  : Velocidade inicial na direção  $Y$  adimensional  
 $V_{mmf}$  : Volume do material de mudança de fase [ m<sup>3</sup> ]  
 $x,y$  : Coordenadas cartesianas  
 $X,Y$  : Coordenadas cartesianas adimensionais definidas em (33)

## Letras Gregas

$\Delta, \delta$	: Variação	
$\alpha_1$	: Coeficiente de difusão térmica	[ m <sup>2</sup> /s ]
$\beta$	: Coeficiente de expansão volumétrica	[ 1/°C ]
$\phi$	: Definido em (93)	
$\mu$	: Viscosidade dinâmica absoluta	[ Kg/m.s ]
$\nu$	: Viscosidade cinemática	[ m <sup>2</sup> /s ]
$\rho$	: Densidade	[ Kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_1$	: Densidade do líquido na temperatura de mudança de fase	[ Kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_s$	: Densidade da fase sólida	[ Kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho$	: Densidade adimensional definida em (43)	
$\theta$	: Temperatura adimensional definida em (36)	
$\varphi$	: Definido em (92)	
$\zeta$	: Definido em (72)	
$\zeta_1$	: Definido em (100)	
$\zeta_2$	: Definido em (101)	

## ÍNDICES

- P : Referente ao volume de controle central
- E : Referente ao volume de controle a leste
- W : Referente ao volume de controle a oeste
- N : Referente ao volume de controle ao norte
- S : Referente ao volume de controle ao sul
- e : Referente a face leste do volume de controle
- w : Referente a face oeste do volume de controle
- n : Referente a face norte do volume de controle
- s : Referente a face sul do volume de controle
- I,J : Referente ao volume de controle com centro em I,J
- i,j : Referente ao volume de controle com centro em i,j
- on : Referente ao componente ligado
- off : Referente ao componente desligado
- c : Referente ao ciclo completo de operação do componente

FERREIRA, A. C.; " Contribuição ao estudo da utilização de materiais de mudança de fase em sistemas de arrefecimento de componentes eletrônicos ", Uberlândia, 1993, 94 p.

### RESUMO

Recentemente tem sido desenvolvidos códigos computacionais que permitem modelar o comportamento dos materiais de mudança de fase, submetidos a diferentes configurações e parâmetros de transferência de calor, em processos de fusão e solidificação dos mesmos. O presente trabalho é uma contribuição ao desenvolvimento desses códigos preenchendo lacunas dessas configurações. Resolve-se numericamente, utilizando-se a técnica dos volumes de controle finitos desenvolvida por Patankar, as equações da energia e da quantidade de movimento bidimensionais acopladas através da hipótese de Boussinesq para incluir o efeito de convecção natural na fase fundida. O efeito de calor latente é simulado pelo modelo proposto por Bonacina já bem testado na literatura. A geometria estudada é plana, infinita e submetida em uma face a um fluxo de calor, no caso liberado por um componente eletrônico, e nas outras a perdas por convecção. São apresentados resultados para diferentes regimes de fluxo de calor e para diferentes parâmetros geométricos e de transferência de calor, através das frentes de fusão, da fração de massa fundida, do calor armazenado e do campo de temperaturas da superfície do material de mudança de fase, em contato com o componente eletrônico.



FERREIRA, A. C.;" Contribution to the study of utilization of phase change materials in refrigeration systems of electronics components ", Uberlândia, 1993, 94 p.

#### ABSTRACT

Recently the literature has been showing computational codes that are able to model the behaviour of phase change materials when submitted to various configurations and processes of heat transfer, mainly in processes of its melting and freezing. The present work is a contribution to the development of such codes particularly filling some gaps of those configurations. Using the technique of finite control volume, of Patankar, the equations of energy and of momentum, in the bidimensional form coupled through the hypothesis of Boussinesq for the inclusion of the effect of natural convection under melted phase, were numerically solved.

O effect of latent heat was simulated through well tested model of Bonacina. The studied geometry was flat, infinite and submitted in a face to a heat flux dissipated by an electronic component, and in a others faces the heat losses were by convection. Results are presented for various geometrical parameters and heat transfer, through the fusion fronts, the fraction of melted mass, the stored heat and the field of temperatures on the surface of the phase change material, in contact with the eletronic component.

## I - INTRODUÇÃO

### I.1 - Considerações iniciais

#### I.1.1 - Definição

Os dispositivos de controle térmico por mudança de fase tem sido objeto de estudo de diversos pesquisadores e, por consequência, amplamente discutidos na literatura especializada. Os artigos referem-se a estes tipos de dispositivos por diferentes nomes tais como capacitor térmico, volante térmico, dispositivo de calor latente, dispositivo de calor de fusão e dispositivo de massa fundível. De qualquer modo, todos esses termos referem-se a um componente que é usado ou para controlar termicamente um meio ou para armazenar energia utilizando um material que sofre uma mudança de fase.

Existem diferentes processos de transformações com mudança de fase a saber,

- Transformação sólido-líquido-sólido (fusão/solidificação)
- Transformação líquido-gas (vaporização)
- Transformação sólido-gas (sublimação)
- Transformação sólido-sólido
- Transformação líquido-líquido

Muito pouca energia é liberada ou absorvida numa transformação líquido-líquido e é questionável se este é realmente um processo de mudança de fase. As transformações líquido-gas e sólido-gas têm grandes variações de volume associadas a elas, uma característica que requer pesados e complicados vasos de pressão. As transformações sólido-líquido

são de grande importância porque a maioria das classes de materiais sofrem este tipo de transformação, sem exibir grandes variações de volume enquanto absorvem ou liberam, relativamente, grandes quantidades de energia. As transformações sólido-sólido são também interessantes porque a troca de energia pode ser significativa e um número de materiais manifestam esse fenômeno em uma faixa de temperaturas perto de seu ponto de fusão. Entretanto, pela proposta deste trabalho, o processo de mudança de fase em estudo é limitado às transformações sólido-líquido.

### I.1.2 - Aplicações

Além da utilização em armazenadores térmicos, aplicados em sistemas especiais de refrigeração de veículos espaciais e em plantas térmicas com aproveitamento de energia solar, uma outra importante possibilidade de aproveitamento do calor latente dos materiais que sofrem uma mudança de fase é a utilização deste efeito com a finalidade de refrigeração de componentes eletrônicos. Com o crescente desenvolvimento destes componentes no sentido de diminuição de suas dimensões, tem crescido grandemente a taxa de geração de calor por unidade de área [1]. Com isso passa ser imperativo a eficiência de refrigeração, evitando, dessa maneira, alterações dimensionais causadas por temperaturas excessivas e ainda possibilitando que os componentes funcionem adequadamente dentro de uma faixa ótima de operação. Utilizando-se o efeito de calor latente dos materiais de mudança de fase, associados aos processos convencionais de refrigeração por convecção, absorve-se os picos de energia liberados pelos componentes eletrônicos, reduzindo com isso a

temperatura destes dispositivos.

Tipicamente, um dispositivo de mudança de fase é passivo com nenhuma peça móvel, consistindo de um alojamento externo e o material de mudança de fase (M.M.F.) que pode ou não estar intercalado com material de enchimento, ou aletas. Geralmente este dispositivo está em contato térmico com o meio que está sendo controlado termicamente. Embora mostrado numa forma simplificada, como na Figura 1, estes dispositivos podem assumir as mais diversas configurações. Neste trabalho utiliza-se uma geometria de placa plana por ser uma disposição frequente em componentes eletrônicos.

#### I.1.3 - Materiais de mudança de fase

Estudos têm mostrado que para se qualificar como um bom M.M.F., o material deve possuir as seguintes características :

- Alto calor latente de fusão
- Ponto de fusão definido (ou faixa definida)

Outras propriedades interessantes são :

- Alta difusividade térmica
- Alta condutividade térmica
- Não corrosivo e não tóxico
- Baixo coeficiente de expansão
- Relativamente puro

Alguns fatores econômicos de importância são :

- Baixo custo
- Disponibilidade presente e futura

Há um grande número de classes de materiais que têm sido investigados para uso nos dispositivos de mudança de fase [19].

Entre eles destaca-se:

- Sais inorgânicos hidratados ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ )
- Compostos orgânicos (Parafinas  $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$ )
- Eutéticos (88% moles de ácido acético + 12% moles de ácido benzóico)
- Elementos naturais (enxofre , S)
- Água

No presente trabalho utiliza-se como material de mudança de fase uma parafina da classe  $\text{C}_{20}\text{H}_{42}$ , cujas propriedades são resumidas na Tabela 1.

## I.2 - Revisão Bibliográfica

Nos processos com mudança de fase, o calor latente do material é absorvido ou liberado para mudar o estado do material de líquido para sólido ou vice versa.

A importância do processo de mudança de fase é relatada em numerosas aplicações no campo da engenharia tais como fundição, soldagem, armazenamento de energia térmica, controle de temperatura e mais recentemente na refrigeração de componentes eletrônicos. Existem também muitos fenômenos naturais que podem ser analisados com a ajuda dos processos de mudança de fase.

Portanto, muitos problemas que lidam com a solidificação ou a fusão para várias geometrias e condições térmicas, tem sido objeto de estudo de diferentes autores, embora suposições simplificadas sejam empregadas na análise.

Para geometrias cilíndricas de eixo vertical, muitas soluções teóricas e experimentais foram obtidas tanto para a fusão como para a solidificação.

Assim, uma solução gráfica desenvolvida por Longwell em [27], é aplicada a esta geometria no processo de solidificação.

Um estudo experimental de Sparrow em [36] trata da transição da solidificação controlada por condução para a solidificação controlada por convecção constatando um menor tempo de descarga dos armazenadores neste segundo regime. Também em [34] e [35], Sparrow estuda numericamente o processo de fusão para esta configuração onde é analisado a influência da convecção natural e do subresfriamento do material de mudança de fase.

O desempenho de armazenadores cilíndricos verticais é analisado por Rego em [31], para processos de carga e descarga, levando em

consideração os efeitos de convecção natural.

Resultados experimentais para a fusão para esta geometria são obtidos por Brasil em [11] e Kalhori em [22], sendo que, neste último, a utilização de aletas é analisada.

Soluções numéricas únicas, válidas para a fusão e para a solidificação, são desenvolvidas por Chuang em [16] e Ismail e Alves em [20] e [21] estudando também a aplicação de aletas.

Para geometrias cilíndricas horizontais, o problema de fusão é estudado numericamente por Rieger em [32] e resultados experimentais são obtidos por Bathelt em [4] e [5], onde é estudado um arranjo triangular desses cilindros, e por Lederman em [26] que obtêm resultados para este problema aplicado à ablação.

Alguns resultados experimentais em tubos cilíndricos horizontais são obtidos por Bathelt em [3] tanto para a fusão como para a solidificação.

Com relação à cavidades, um estudo da solidificação é realizado teoricamente por Saitoh em [33], enquanto Chellaiah em [14] o faz experimentalmente, levando em consideração os efeitos de convecção natural na fase líquida de um material de mudança de fase imerso num meio poroso.

Já a fusão, é estudada teoricamente por Benard em [9], por Bejan em [7] num meio poroso, e por Beckerman em [6] que estuda também a influência do subresfriamento do material de mudança de fase.

Estudos experimentais dos efeitos do subresfriamento e do superaquecimento do material de mudança de fase, respectivamente, abaixo e acima da temperatura de fusão, durante os processos de carga e descarga numa cavidade, são

feitos por Hale em [17].

Análises experimentais do comportamento de diferentes materiais de mudança de fase, aplicados no armazenamento térmico, são realizadas por Carlson em [12], Hijikata em [18], Kamimoto em [23], [24] e [25], e por Muehlbauer em [28].

Para geometrias planas, uma solução gráfica para o problema de solidificação unidimensional sobre placa plana, é desenvolvida por Longwell em [27]. Este mesmo problema é analisado por Bart em [2], que utiliza como material de mudança de fase um sistema binário eutético.

O problema de fusão para a mesma geometria é estudado numericamente por Bell em [8].

Ainda para esta mesma geometria, Cho em [15] e Murray em [29], obtém soluções numéricas diferentes aplicadas aos processos de fusão e solidificação, sendo que Chan em [13] leva em consideração a possibilidade de geração interna de calor.

Um estudo numérico do problema de estabilização da temperatura de componentes eletrônicos, que geram energia ciclicamente no tempo, é realizado por Alves em [1].

Ao analisar-se a bibliografia sobre o tema, verifica-se que as soluções numéricas desenvolvidas não consideram a situação em que um dispositivo de mudança de fase é sujeito a uma intensidade de fluxo de calor e às condições de contorno convectivas. O fluxo de calor é gerado por um componente eletrônico que está em contato térmico com o dispositivo.

Também não é feito um estudo do campo de temperaturas ao longo da parede do armazenador em contato com o componente eletrônico.

Diante disso, desenvolve-se neste trabalho, um modelo



que permite o estudo do comportamento dos armazenadores nestas condições, para diferentes parâmetros geométricos e de transferência de calor, para uma geometria de placa plana.

### I.3 - Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um código computacional que permita simular o comportamento de um material de mudança de fase quando sujeito a condições de contorno do tipo fluxo de calor especificado, no caso liberado por um componente eletrônico, e a perdas de calor por convecção para um fluido de resfriamento. É levado ainda em consideração os efeitos de convecção natural na fase líquida do material.

Uma vez obtido o código, o mesmo é testado para fornecer soluções conhecidas na literatura. Após isso, são realizados uma série de ensaios onde é analisado o comportamento do material de mudança de fase, utilizando-se diferentes parâmetros geométricos e de transferência de calor. Um fluxo de calor pode ser aplicado de uma forma contínua ou através de pulsos de energia, utilizando-se uma excitação do tipo tudo ou nada para caracterizar isso.

Outra finalidade deste trabalho é a obtenção do campo de temperaturas na superfície do componente a ser controlado termicamente. Este campo é comparado com aquela distribuição de temperatura que seria obtida na superfície do componente, com os mesmos parâmetros de convecção, se não se utilizasse o material de mudança de fase.

Adicionalmente, este trabalho vem complementar o estudo feito por Rego [31] com armazenadores térmicos cilíndricos por

mudança de fase, onde um fluido de aquecimento ou de resfriamento é colocado em contato térmico com um M.M.F. que é isolado nas outras extremidades. Nesse trabalho, a temperatura limitante do M.M.F. é igual à temperatura do fluido de aquecimento ou de resfriamento.

No presente trabalho, não existe essa limitação para o campo de temperaturas, devido à condição de fluxo de calor especificado.

## II - FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

### II.1 - EQUAÇÕES NAS COORDENADAS FUNDAMENTAIS

A Figura 1 ilustra o modelo do dispositivo empregado na formulação do problema.

Considera-se que o dispositivo têm paredes com espessura e resistência térmica desprezíveis.

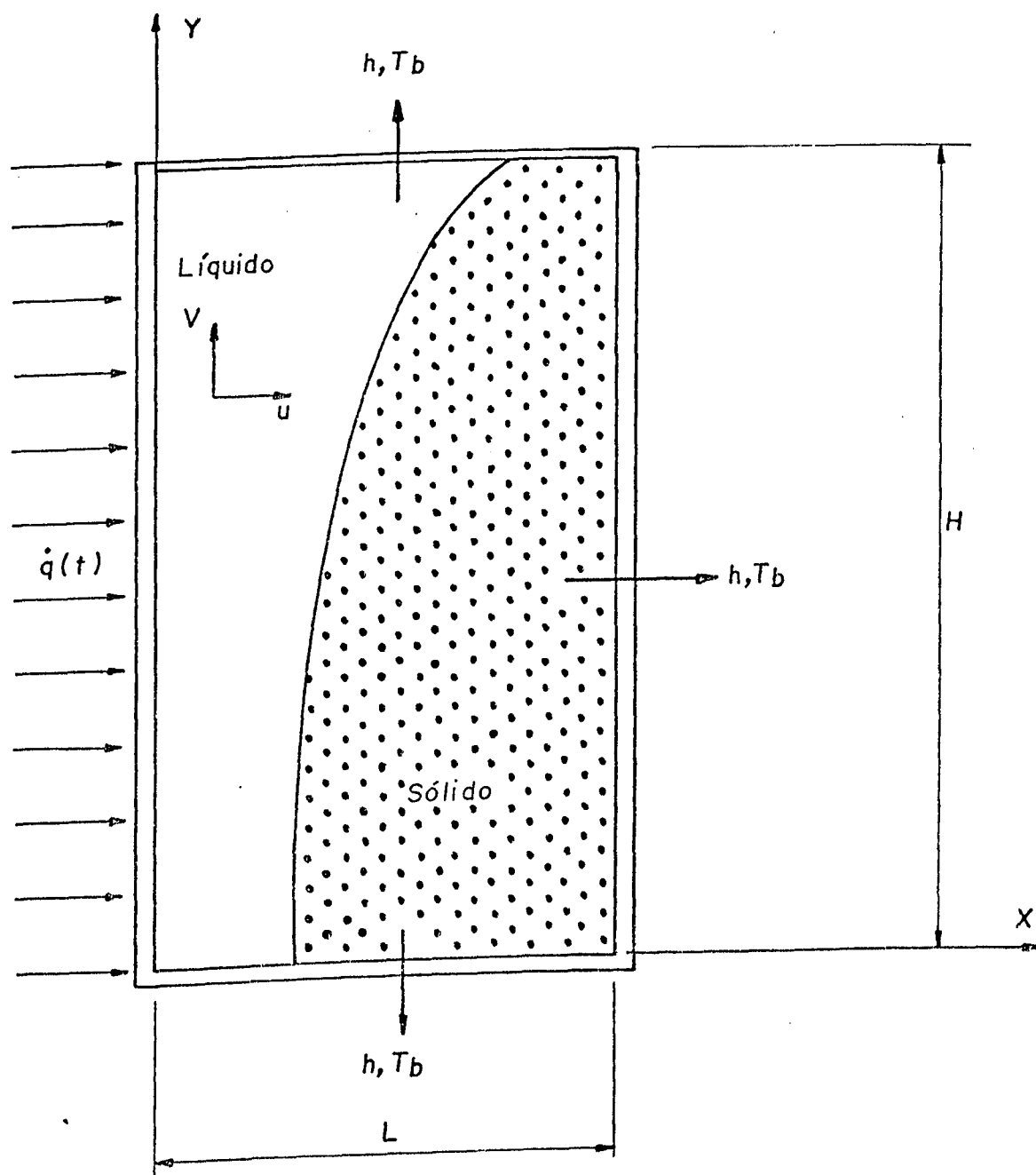


Figura 1 - Modelo do dispositivo estudado

A Figura 2, a seguir, mostra como o fluxo de calor pode ser fornecido ao M.M.F., através de diferentes excitações.

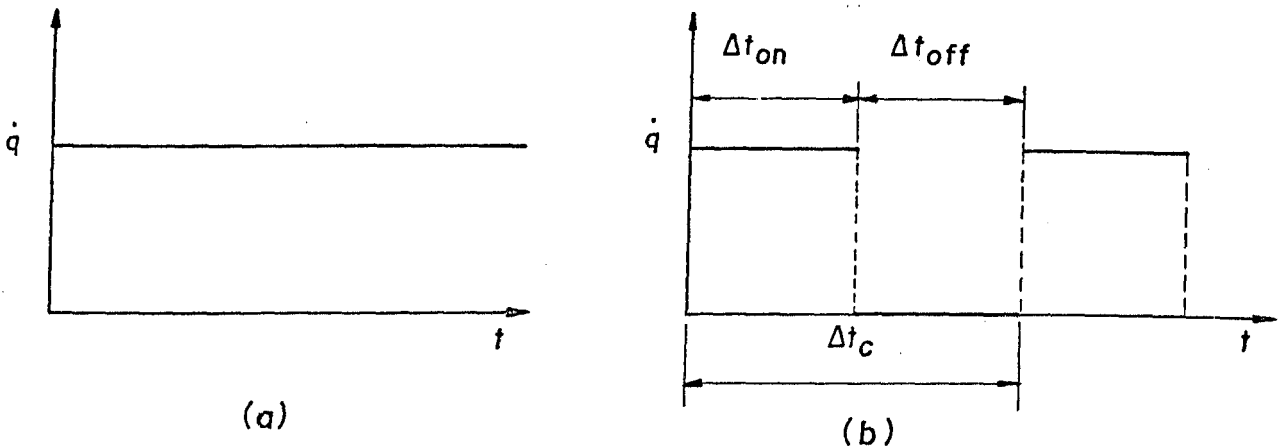


Figura 2. Fluxo de calor fornecido: a) excitação contínua  
b) excitação tudo ou nada

As equações fundamentais, em coordenadas cartesianas, para fluido incompressível, são descritas a seguir. Devido às baixas velocidades decorrentes do processo de convecção natural, são desprezados os termos de dissipação viscosa na equação da energia.

Tem-se então :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

como a equação da conservação da massa,

$$\rho \left[ \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u \partial u}{\partial x} + \frac{v \partial u}{\partial y} \right] = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left[ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right] \quad (2)$$

como a equação de conservação da quantidade de movimento na direção  $x$ ,

$$\rho \left[ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u \partial v}{\partial x} + \frac{v \partial v}{\partial y} \right] = - \frac{\partial p}{\partial y} - \rho g + \mu \left[ \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right] \quad (3)$$

como a equação de conservação da quantidade de movimento na direção  $y$ ,

$$\rho C_p \left[ \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{u \partial T}{\partial x} + \frac{v \partial T}{\partial y} \right] = k \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right] \quad (4)$$

como a equação de conservação da energia.

Utilizando a aproximação de Boussinesq e sendo

$\rho_1$  a densidade do líquido na temperatura de mudança de fase  $T_{mf}$

tem-se que :

$$\rho = \rho_1 - \beta \cdot \rho_1 \left[ T - T_{mf} \right] \quad (5)$$

Definindo-se uma pressão  $p^*$  tal que :

$$p^* = p + \rho_1 \cdot g \cdot y \quad (6)$$

tem-se :

$$-\frac{\partial p}{\partial y} = -\frac{\partial p^*}{\partial y} + \rho_1 \cdot g \quad (7)$$

Levando (5) e (7) em (2) e (3) e reescrevendo obtêm-se :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (8)$$

$$\rho \left[ \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{u \partial u}{\partial x} + \frac{v \partial u}{\partial y} \right] = -\frac{\partial p^*}{\partial x} + \mu \left[ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right] \quad (9)$$

$$\rho \left[ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{u \partial v}{\partial x} + \frac{v \partial v}{\partial y} \right] = -\frac{\partial p^*}{\partial y} + g \cdot \beta \cdot \rho_1 (T - T_{mf}) + \mu \left[ \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right] \quad (10)$$

$$\rho \cdot C_p \left[ \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{u \partial T}{\partial x} + \frac{v \partial T}{\partial y} \right] = k \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right] \quad (11)$$

Com a finalidade de se escrever as equações acima na forma conservativa, o seguinte procedimento algébrico é desenvolvido. Escrevendo-se :

$$\frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial (uv)}{\partial x} = 2v \frac{\partial v}{\partial y} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial x}$$

ou ainda,

$$\frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial(uv)}{\partial x} = v \frac{\partial v}{\partial y} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \left[ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right] \quad (12)$$

Levando (8) em (12) resulta :

$$\frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial(uv)}{\partial x} = v \frac{\partial v}{\partial y} + u \frac{\partial v}{\partial x} \quad (13)$$

Analogamente,

$$\frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial(uv)}{\partial y} = u \frac{\partial v}{\partial y} + v \frac{\partial u}{\partial y} + 2u \frac{\partial u}{\partial x}$$

ou,

$$\frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial(uv)}{\partial y} = v \frac{\partial u}{\partial y} + u \frac{\partial u}{\partial x} \quad (14)$$

Da mesma maneira obtêm-se :

$$\frac{\partial(vT)}{\partial y} + \frac{\partial(uT)}{\partial x} = v \frac{\partial T}{\partial y} + u \frac{\partial T}{\partial x} \quad (15)$$

Considerando os sistema de equações (9), (10), (11) e (13), (14), (15) pode-se escrever :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (16)$$

$$\rho \left[ \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial (uv)}{\partial y} \right] = - \frac{\partial p^*}{\partial x} + \mu \left[ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right] \quad (17)$$

$$\rho \left[ \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial (uv)}{\partial x} + \frac{\partial v^2}{\partial y} \right] = - \frac{\partial p^*}{\partial y} + g \cdot \beta \cdot \rho_l (T - T_{mf}) + \mu \left[ \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right] \quad (18)$$

$$\rho \cdot C_p \left[ \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial (uT)}{\partial x} + \frac{\partial (vT)}{\partial y} \right] = k \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right] \quad (19)$$

Considerando a equação diferencial geral na forma

$$\underbrace{\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t}}_{\text{termo de não permanência}} + \underbrace{\text{div}(\rho V\phi)}_{\text{termo convectivo}} = \underbrace{\text{div}(\Gamma \text{grad}\phi)}_{\text{termo de difusão}} + \underbrace{S}_{\text{termo fonte}} \quad (20)$$

que permite um tratamento numérico diferenciado para cada termo, pode-se identificar as equações (16), (17), (18) e (19) para um valor particular de  $\phi$  e  $\Gamma$ . Assim,



Para  $\phi = 1$  e  $S = 0$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (21)$$

┌──────────────────┐

termo  
convectivo

Para  $\phi = u$  e  $\Gamma = \mu$

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho \left[ \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial (uv)}{\partial y} \right] = \mu \left[ \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right] - \frac{\partial p^*}{\partial x} \quad (22)$$

┌──┐    ┌──────────────────┐    ┌──────────────────┐    ┌──┐  
termo       termo               termo de       termo  
de não       convectivo               difusão       fonte  
permanência

Para  $\phi = v$  e  $\Gamma = \mu$

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho \left[ \frac{\partial (uv)}{\partial x} + \frac{\partial v^2}{\partial y} \right] = \mu \left[ \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right] - \frac{\partial p^*}{\partial y} + g \cdot \beta \cdot \rho_l (T - T_{mf}) \quad (23)$$

┌──┐    ┌──────────────────┐    ┌──────────────────┐    ┌──────────────────┐  
termo       termo               termo de       termo fonte  
de não       convectivo               difusão

permanência

Para  $\phi = T$  e  $\Gamma = k/(\rho \cdot Cp)$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial (uT)}{\partial x} + \frac{\partial (vT)}{\partial y} = \frac{k}{\rho \cdot Cp} \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right] \quad (24)$$

┌──┐    ┌──────────────────┐    ┌──────────────────┐  
termo       termo               termo de  
de não       convectivo               difusão  
permanência

## II.2 - CONDIÇÕES INICIAIS E DE CONTORNO

De acordo com as Figuras 1 e 2 e considerando uma superfície livre na parte superior do armazenador para prever variações no volume do material de mudança de fase, pode-se escrever as seguintes condições de contorno :

$$\begin{aligned}
 & u=0 ; v=0 ; \left[ \begin{array}{l} -k \frac{\partial T}{\partial x} = q \quad \text{para } 0 < t < \Delta t_{on} \\ -k \frac{\partial T}{\partial x} = 0 \quad \text{para } \Delta t_{on} < t < \Delta t_c \end{array} \right. \quad \text{em } x=0 \\
 & u=0 ; v=0 ; -k \frac{\partial T}{\partial x} = h(T - T_b) \quad \text{em } x=L \\
 & u=0 ; v=0 ; k \frac{\partial T}{\partial y} = h(T - T_b) \quad \text{em } y=0 \quad (25) \\
 & \frac{\partial u}{\partial y} = 0 ; v=0 ; -k \frac{\partial T}{\partial y} = h(T - T_b) \quad \text{em } y=H \\
 & \frac{\partial p^*}{\partial x} = 0 \quad \text{em } x=0 \text{ e em } x=L \\
 & \frac{\partial p^*}{\partial y} = 0 \quad \text{em } y=0 \text{ e em } y=H
 \end{aligned}$$

para qualquer tempo.

Como condições iniciais tem-se :

$$u=u_i ; v=v_i ; T=T_i \quad \text{para } t=0 \quad (26)$$

### II.3- CALOR FORNECIDO, CALOR PERDIDO E CALOR ARMAZENADO

Para o calor fornecido escreve-se :

$$Q_f^* = H \int_0^t \dot{q} \cdot dt \quad (27)$$

O calor perdido pelas fronteiras é dado por :

$$Q_p^* = h \left[ \int_0^t \int_0^H \left( T - T_b \right)_{x=L} dy \cdot dt + \int_0^t \int_0^L \left( T - T_b \right)_{y=0} dx \cdot dt + \int_0^t \int_0^L \left( T - T_b \right)_{y=H} dx \cdot dt \right] \quad (28)$$

E o calor armazenado pelo material de mudança de fase,

$$Q_a^* = \int_0^L \int_0^H \rho \cdot C_p \cdot (T - T_i) \cdot dx \cdot dy \quad (29)$$

Onde  $C_p = C_p(T)$

#### II.4 - PROPRIEDADES DO MATERIAL DE MUDANÇA DE FASE ( M.M.F. )

O modelo desenvolvido considera as propriedades do material de mudança de fase (M.M.F) em tres faixas distintas de temperaturas correspondentes as fases :sólida, líquida e a faixa de transição de mudança de fase.

A saber :

$$\begin{array}{l}
 \text{Fase sólida} \\
 \hline
 \rho = \rho_s \qquad \qquad \qquad Cp = Cp_s \qquad \qquad \qquad k = k_s \qquad \qquad \qquad (30) \\
 \end{array}
 \quad T < T_{tr}$$

$$\begin{array}{l}
 \text{Fase líquida} \\
 \hline
 \rho = \rho_l \qquad \qquad \qquad Cp = Cp_l \qquad \qquad \qquad k = k_l \qquad \qquad \qquad (31) \\
 \end{array}
 \quad T > T_{mf}$$

$$\begin{array}{l}
 \text{Faixa de transição} \\
 \hline
 \rho = \frac{\rho_s + \rho_l}{2} \qquad \qquad \qquad k = \frac{k_s + k_l}{2} \\
 \\
 Cp = \frac{Cp_s + Cp_l}{2} + \frac{CLF}{(T_{mf} - T_{tr})} \\
 \end{array}
 \quad T_{tr} \leq T \leq T_{mf}$$

(32)

Definindo-se o calor específico na faixa de transição como feito na expressão (32), simula-se o efeito de calor latente de fusão através dessa propriedade. Isto pode ser melhor entendido observando-se a Figura 3, que mostra o comportamento das variações das propriedades do material de mudança de fase com a temperatura. Este procedimento é estabelecido por Bonacina em [10].

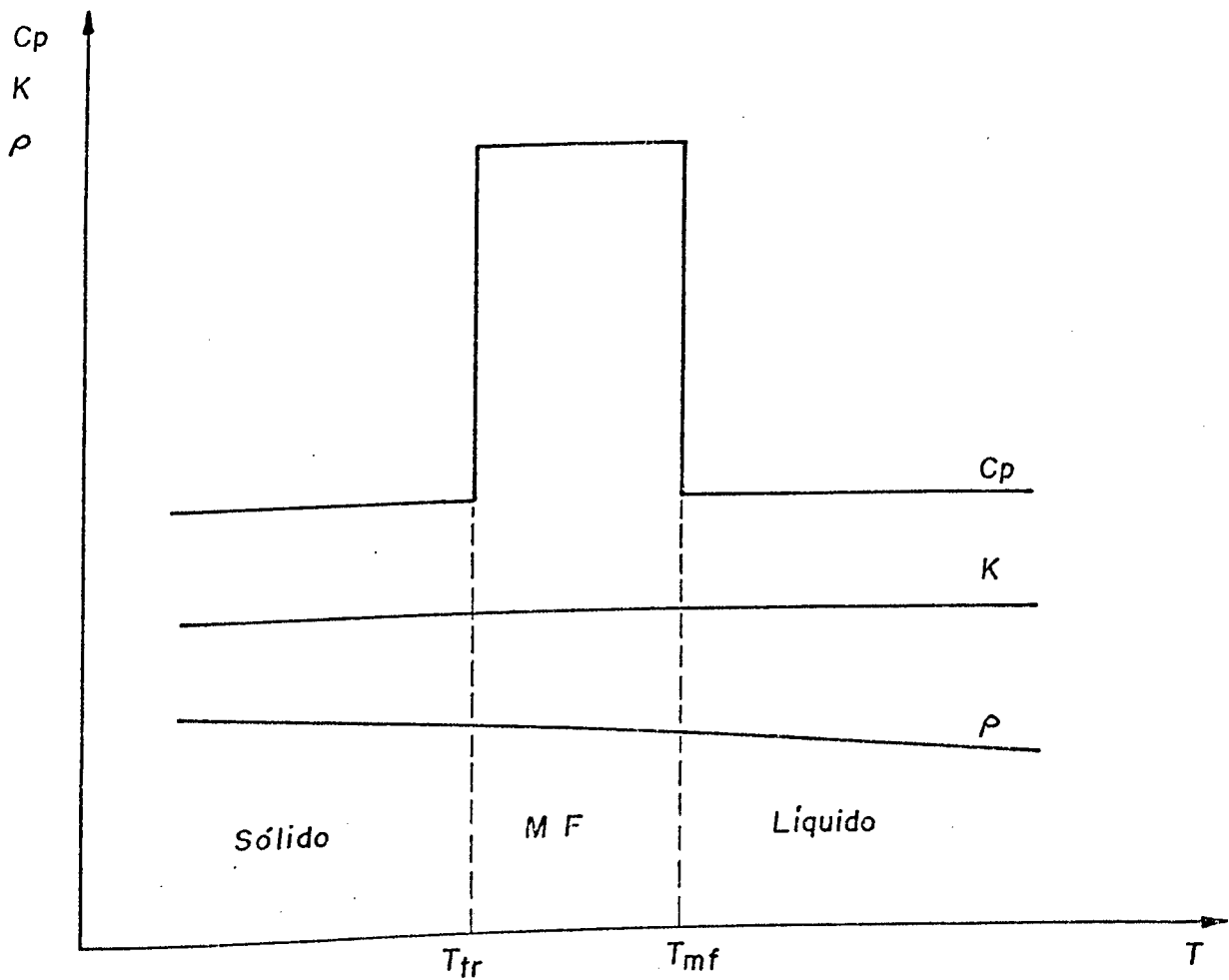


Figura 3 - Comportamento das propriedades do material de mudança de fase com a temperatura

## II.5 - ADIMENSIONALIZAÇÃO DAS EQUAÇÕES

Admite-se :

$$X = \frac{x}{H} \quad e \quad Y = \frac{y}{H} \quad (33)$$

como as coordenadas adimensionais,

$$U = \frac{u}{u_0} \quad e \quad V = \frac{v}{u_0} \quad (34)$$

como as velocidades adimensionais,

$$\text{onde :} \quad u_0 = \frac{\alpha_1}{H} \quad (35)$$

$$\theta = \frac{T - T_{mf}}{T_{mf} - T_{tr}} \quad (36)$$

como a temperatura adimensional,

$$P = \frac{p^*}{p_0} \quad (37)$$

como a pressão adimensional,

$$\text{onde :} \quad p_0 = \rho_1 \cdot u_0^2 \quad (38)$$

$$Fo = \frac{t}{t_0} \quad (39)$$

o número de Fourier como tempo adimensional,

$$\text{onde :} \quad t_0 = \frac{H^2}{\alpha_1} \quad (40)$$

$$q = \frac{\dot{q}}{\dot{q}_0} \quad (41)$$

como o fluxo de calor adimensional,

$$\text{onde :} \quad \dot{q}_0 = k_1 \cdot T_{mf} \quad (42)$$

Para as propriedades do M.M.F. considera-se,

$$\hat{k} = \frac{k}{k_1} \quad \hat{\rho} = \frac{\rho}{\rho_1} \quad \hat{Cp} = \frac{Cp}{Cp_1} \quad (43)$$

Define-se ainda :

$$Bi = \frac{h \cdot H}{k_1} \quad (44)$$

como o número de Biot,

$$Pr = \frac{\nu_1}{\alpha_1} \quad (45)$$

como o número de Prandtl,

$$Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot H^3 (T_{mf} - T_{tr})}{\nu_1 \cdot \alpha_1} \quad (46)$$

como o número de Rayleigh,

$$\text{onde :} \quad \nu_1 = \frac{\mu_1}{\rho_1} \quad e \quad \alpha_1 = \frac{k_1}{\rho_1 \cdot Cp_1} \quad (47)$$

As equações (16), (17), (18) e (19) tornam-se então :

Equação adimensional da conservação da massa

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad (48)$$

Equação adimensional da conservação da quantidade de movimento na direção X

$$\rho \left[ \frac{\partial U}{\partial Fo} + \frac{\partial U^2}{\partial X} + \frac{\partial (UV)}{\partial Y} \right] = Pr \left[ \frac{\partial^2 U}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial Y^2} \right] - \frac{\partial P}{\partial X} \quad (49)$$

Equação adimensional da conservação da quantidade de movimento na direção Y

$$\rho \left[ \frac{\partial V}{\partial Fo} + \frac{\partial (UV)}{\partial X} + \frac{\partial V^2}{\partial Y} \right] = Pr \left[ \frac{\partial^2 V}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial Y^2} \right] - \frac{\partial P}{\partial Y} + Pr.Ra.\theta \quad (50)$$

Equação adimensional da conservação da energia

$$\left[ \frac{\partial \theta}{\partial Fo} + \frac{\partial (U\theta)}{\partial X} + \frac{\partial (V\theta)}{\partial Y} \right] = \frac{\hat{k}}{\hat{\rho} \cdot \hat{C}_p} \left[ \frac{\partial^2 \theta}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial Y^2} \right] \quad (51)$$



Para as condições de contorno e condições iniciais dadas pelas equações (25) e (26) obtém-se :

$$\begin{aligned}
 & U=0 ; V=0 ; \left[ \begin{array}{l} \frac{\partial \theta}{\partial X} = c1.q \quad \text{para } 0 < Fo \leq Fo_{on} \\ \frac{\partial \theta}{\partial X} = 0 \quad \text{para } Fo_{on} < Fo \leq Fo_c \end{array} \right. \quad \text{em } X=0 \\
 & U=0 ; V=0 ; \frac{\partial \theta}{\partial X} = -Bi(\theta + C2) \quad \text{em } X=L^* \\
 & U=0 ; V=0 ; \frac{\partial \theta}{\partial Y} = Bi(\theta + C2) \quad \text{em } Y=0 \\
 & U=0 ; V=0 ; \frac{\partial \theta}{\partial Y} = -Bi(\theta + C2) \quad \text{em } Y=1
 \end{aligned} \tag{52}$$

$$\frac{\partial U}{\partial Y} = 0 ; V=0 ; \frac{\partial \theta}{\partial Y} = -Bi(\theta + C2) \quad \text{em } Y=1$$

$$\frac{\partial P}{\partial X} = 0 \quad \text{em } X=0 \quad \text{e} \quad \text{em } X=L^*$$

$$\frac{\partial P}{\partial Y} = 0 \quad \text{em } Y=0 \quad \text{e} \quad \text{em } Y=1$$

$$U=U_i ; V=V_i ; \theta=\theta_i \quad \text{para } Fo=0$$

Onde:

$$c1 = - \frac{H \cdot T_{mf}}{T_{mf} - T_{tr}} ; \quad c2 = \frac{T_{mf} - T_b}{T_{mf} - T_{tr}} ; \quad L^* = \frac{L}{H} \tag{53}$$

$$Fo_{on} = \frac{\Delta t_{on}}{t_o} ; \quad Fo_c = \frac{\Delta t_c}{t_o}$$

Define-se o calor fornecido adimensional por :

$$Q_f = \frac{Q_f^*}{\rho_1 \cdot V_{\text{mmf}} \cdot \text{CLF}} \quad (54)$$

onde  $Q_f^*$  é dado pela equação (27) e  $V_{\text{mmf}}$  é o volume do material de mudança de fase para uma profundidade unitária, definido por :

$$V_{\text{mmf}} = L \cdot H \quad (55)$$

O calor adimensional perdido pelas fronteiras do armazenador fica :

$$Q_p = \frac{Q_p^*}{\rho_1 \cdot V_{\text{mmf}} \cdot \text{CLF}} \quad (56)$$

onde  $Q_p^*$  é dado pela equação (28)

E o calor armazenado adimensional :

$$Q_a = \frac{Q_a^*}{\rho_1 \cdot V_{\text{mmf}} \cdot \text{CLF}} \quad (57)$$

onde  $Q_a^*$  é dado pela equação (29)

E finalmente para as propriedades do material de mudança de fase, sendo :

$$\hat{Cp}_{sl} = \frac{Cp_s}{Cp_1} \quad \hat{k}_{sl} = \frac{k_s}{k_1} \quad \hat{\rho}_{sl} = \frac{\rho_s}{\rho_1} \quad (58)$$

vem :

Para  $\theta < -1$

$$\hat{Cp} = \hat{Cp}_{sl} \quad \hat{k} = \hat{k}_{sl} \quad \hat{\rho} = \hat{\rho}_{sl} \quad (59)$$

Para  $\theta < 0$

$$\hat{Cp} = 1 \quad \hat{k} = 1 \quad \hat{\rho} = 1 \quad (60)$$

Para  $-1 \leq \theta \leq 0$

$$\hat{Cp} = \frac{1 + \hat{Cp}_{sl}}{2} + \frac{CLF}{(T_{mf} - T_{tr})Cp_1} \quad (61)$$

$$\hat{k} = \frac{\hat{k}_{sl} + 1}{2} \quad \hat{\rho} = \frac{\hat{\rho}_{sl} + 1}{2}$$

No restante deste trabalho,  $\rho_s$  será considerada igual a  $\rho_1$  e, portanto,  $\hat{\rho} = 1$ .

### III - DISCRETIZAÇÃO DAS EQUAÇÕES

Para se resolver numericamente as equações (48), (49), (50) e (51), acopladas às condições iniciais e de contorno (52), foi utilizada a técnica dos volumes de controle finitos desenvolvida por Patankar [30] para discretizá-las.

A Figura 4 determina a nomenclatura empregada.

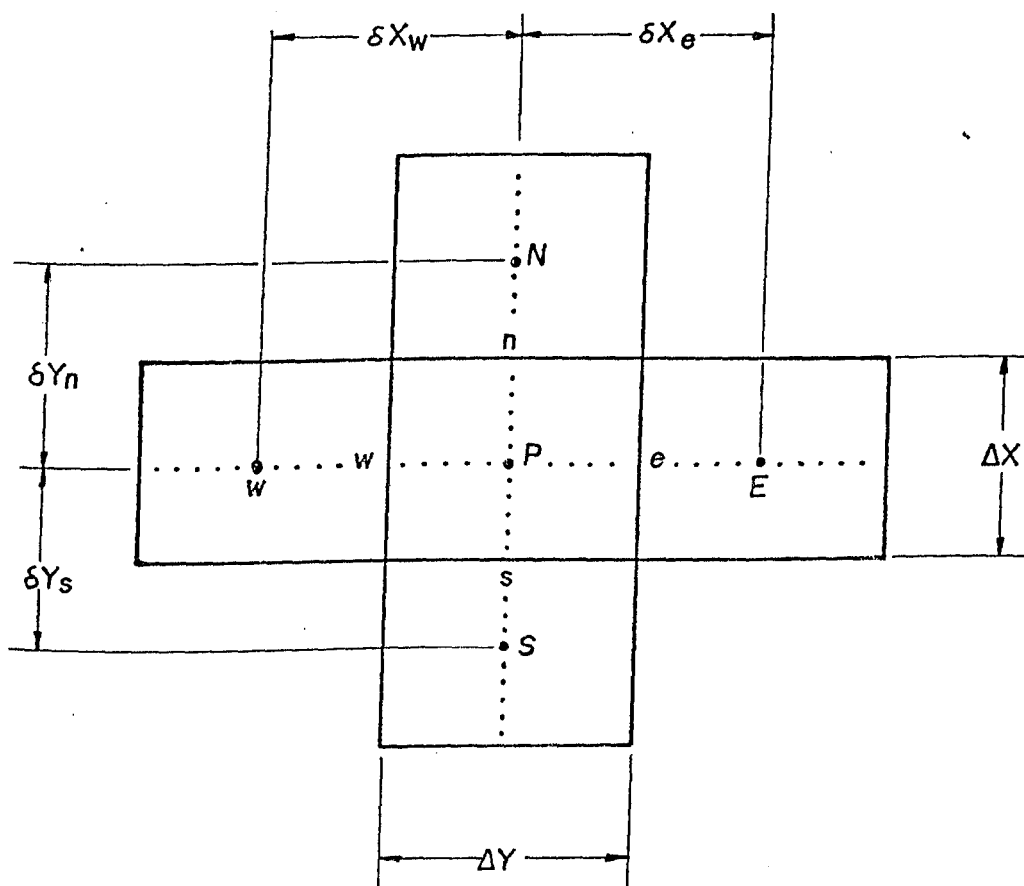


Figura 4 - Nomenclatura para a solução numérica

Já as Figuras (5), (6) e (7) ilustram os arranjos dos volumes de controle, dentro do domínio de estudo, empregados respectivamente para os campos de velocidades e para os campos de temperaturas e pressões.

	3	.	.	.	.	.	.	.	6
	.	.	.	.	.	.	.	.	.
	.	.	.	.	.	.	.	.	.
	.	.	.	.	.	.	.	.	.
	.	.	.	.	.	.	.	.	.
	.	.	.	.	.	.	.	.	.
	.	.	.	.	.	.	.	.	.
	.	.	.	.	.	.	.	.	.
	.	.	.	1		.	.	.	5
	.	.	.	.	.	.	.	.	.
	.	.	.	.	.	.	.	.	.
	.	.	.	.	.	.	.	.	.
	.	.	.	.	.	.	.	.	.
	.	.	.	.	.	.	.	.	.
	.	.	.	.	.	.	.	.	.
	.	.	.	.	.	.	.	.	.
	.	.	.	.	.	.	.	.	.
	.	.	.	.	.	.	.	.	.
	2	.	.	.	.	.	.	.	4

Figura 5 - Volumes de controle para a componente de velocidade U

.	.	.	.	.	.	.	.	.	
.	.	.	.	.	.	.	.	.	
.	.	.	.	.	.	.	.	.	
.	.	.	.	.	.	.	.	.	
.	.	.	.	.	.	.	.	.	
.	.	.	.	.	.	.	.	.	
.	.	.	.	.	.	.	.	.	
7	.	.	.	.	1	.	.	.	
.	.	.	.	.	.	.	.	.	
.	.	.	.	.	.	.	.	.	
.	.	.	.	.	.	.	.	.	
.	.	.	.	.	.	.	.	.	
.	.	.	.	.	.	.	.	.	
.	.	.	.	.	.	.	.	.	
.	.	.	.	.	.	.	.	.	
.	.	.	.	.	.	.	.	.	

Figura 6 - Volumes de controle para a componente de velocidade V

10	.	.	.	12	.	.	.	.	15
.	.	.	.	.	.	.	.	.	
.	.	.	.	.	.	.	.	.	
.	.	.	.	.	.	.	.	.	
.	.	.	.	.	.	.	.	.	
.	.	.	.	.	.	.	.	.	
.	.	.	.	.	.	.	.	.	
.	.	.	.	.	.	.	.	.	
9	.	.	.	1	.	.	.	.	14
.	.	.	.	.	.	.	.	.	
.	.	.	.	.	.	.	.	.	
.	.	.	.	.	.	.	.	.	
.	.	.	.	.	.	.	.	.	
.	.	.	.	.	.	.	.	.	
.	.	.	.	.	.	.	.	.	
.	.	.	.	.	.	.	.	.	
8	.	.	.	11	.	.	.	.	13

Figura 7 - Volumes de controle para os campos de temperatura e pressão

Utiliza-se uma configuração de malhas deslocadas para os campos de velocidades em relação ao campo de pressões para se garantir a consistência física dos resultados como proposto por Patankar [30].

Para os volumes de controle tipo 1, existentes nos tres arranjos utilizados e situados fora das fronteiras em estudo, pode-se escrever de acordo com o esquema " POWER LAW ", como em [30] :

Equação da conservação do momento em X

$$A_P U_P = A_P^0 U_P^0 + A_E U_E + A_W U_W + A_N U_N + A_S U_S + (P_W - P_e) \Delta Y \quad (62)$$

Equação da conservação do momento em Y

$$A_P V_P = A_P^0 V_P^0 + A_E V_E + A_W V_W + A_N V_N + A_S V_S + (P_s - P_n) \Delta X + \\ + Ra \cdot \theta_P \cdot Pr \cdot \Delta X \cdot \Delta Y \quad (63)$$

Equação da conservação da energia

$$\bar{A}_P \theta_P = A_P^0 \theta_P^0 + \bar{A}_E \theta_E + \bar{A}_W \theta_W + \bar{A}_N \theta_N + \bar{A}_S \theta_S \quad (64)$$

onde :

$$A_P = A_P^0 + A_E + A_W + A_N + A_S \quad (65)$$

$$\bar{A}_P = A_P^0 + \bar{A}_E + \bar{A}_W + \bar{A}_N + \bar{A}_S$$

e,



$$A_P^0 = \frac{\Delta X \cdot \Delta Y}{dFo}$$

$$A_E = D_e \cdot A(|Pe_e|) + \left[ -F_e ; 0 \right]$$

$$A_W = D_w \cdot A(|Pe_w|) + \left[ F_w ; 0 \right]$$

$$A_N = D_n \cdot A(|Pe_n|) + \left[ -F_n ; 0 \right]$$

$$A_S = D_s \cdot A(|Pe_s|) + \left[ F_s ; 0 \right]$$

(66)

$$\bar{A}_E = \bar{D}_e \cdot A(|\bar{P}e_e|) + \left[ -F_e ; 0 \right]$$

$$\bar{A}_W = \bar{D}_w \cdot A(|\bar{P}e_w|) + \left[ F_w ; 0 \right]$$

$$\bar{A}_N = \bar{D}_n \cdot A(|\bar{P}e_n|) + \left[ -F_n ; 0 \right]$$

$$\bar{A}_S = \bar{D}_s \cdot A(|\bar{P}e_s|) + \left[ F_s ; 0 \right]$$

Os fluxos de massa nas fronteiras,  $F_e$ ,  $F_w$ ,  $F_n$  e  $F_s$ , são definidos por :

$$\begin{aligned} F_e &= U_e \cdot \Delta Y & ; & & F_n &= V_n \cdot \Delta X \\ F_w &= U_w \cdot \Delta Y & ; & & F_s &= V_s \cdot \Delta X \end{aligned} \quad (67)$$

As correspondentes condutâncias são definidas por :

$$\begin{aligned}
 D_e &= \frac{\text{Pr} \cdot \Delta Y}{\delta X_e} & ; & & D_n &= \frac{\text{Pr} \cdot \Delta X}{\delta Y_n} \\
 D_w &= \frac{\text{Pr} \cdot \Delta Y}{\delta X_w} & ; & & D_s &= \frac{\text{Pr} \cdot \Delta X}{\delta Y_s} \\
 \bar{D}_e &= \frac{\hat{k} \cdot \Delta Y}{\hat{C}_p \cdot \delta X_e} & ; & & \bar{D}_n &= \frac{\hat{k} \cdot \Delta X}{\hat{C}_p \cdot \delta Y_n} \\
 \bar{D}_w &= \frac{\hat{k} \cdot \Delta Y}{\hat{C}_p \cdot \delta X_w} & ; & & \bar{D}_s &= \frac{\hat{k} \cdot \Delta X}{\hat{C}_p \cdot \delta Y_s}
 \end{aligned}
 \tag{68}$$

E os números de Peclet por :

$$\begin{aligned}
 \text{Pe}_e &= \frac{F_e}{D_e} & ; & & \text{Pe}_n &= \frac{F_n}{D_n} \\
 \text{Pe}_w &= \frac{F_w}{D_w} & ; & & \text{Pe}_s &= \frac{F_s}{D_s} \\
 \bar{\text{Pe}}_e &= \frac{F_e}{\bar{D}_e} & ; & & \bar{\text{Pe}}_n &= \frac{F_n}{\bar{D}_n} \\
 \bar{\text{Pe}}_w &= \frac{F_w}{\bar{D}_w} & ; & & \bar{\text{Pe}}_s &= \frac{F_s}{\bar{D}_s}
 \end{aligned}
 \tag{69}$$

A função  $A(|\text{Pe}|)$  para o esquema "POWER LAW" é dada por:

$$A(|\text{Pe}|) = \left[ 0 ; (1 - 0.1|\text{Pe}|^5) \right]
 \tag{70}$$

Analogamente,

$$A(|\bar{P}e|) = \left[ 0 ; ( 1 - 0.1|\bar{P}e|^5 ) \right] \quad (71)$$

O operador  $\left[ A;B \right]$  define o maior valor entre A e B e é equivalente a  $AMAX1(A;B)$  na linguagem de computação FORTRAN.

Os termos denotados com "o" referem-se a valores conhecidos no tempo  $Fo$ , enquanto todos os outros termos referem-se a valores a serem calculados no tempo  $Fo + dFo$ .

Os valores de  $U$ ,  $V$ , e  $\theta$  nas faces dos volumes de controle, denotados com "e, w, n, s", são obtidos pela média entre essas variáveis nos volumes de controle adjacentes. Assim para  $\zeta$  denotando  $U$ ,  $V$  e  $\theta$ , faz-se :

$$\zeta_e = \frac{\zeta_E + \zeta_P}{2} \quad ; \quad \zeta_n = \frac{\zeta_N + \zeta_P}{2} \quad (72)$$

$$\zeta_w = \frac{\zeta_W + \zeta_P}{2} \quad ; \quad \zeta_s = \frac{\zeta_S + \zeta_P}{2}$$

De acordo com as condições que se apresentam, alguns volumes de controle passam a ter um tratamento diferenciado. Assim, no arranjo utilizado para a equação de momento em X e para os volumes de controle 2 a 6, essa equação fica :

#### TIPO 2

$$A_P U_P = A_P^O U_P^O + A_E U_E + A_W U_W + A_N U_N + (P_w - P_e) \Delta Y \quad (73)$$

onde :

$$A_P = A_P^O + A_E + A_W + A_N + A_S^* \quad e \quad A_S^* = \frac{Pr \cdot \Delta X}{(Y_P - Y_S)}$$

TIPO 3

$$A_P U_P = A_P^O U_P^O + A_E U_E + A_W U_W + A_S U_S + (P_w - P_e) \Delta Y$$

onde :

(74)

$$A_P = A_P^O + A_E + A_W + A_S$$

TIPO 4

$$A_P U_P = A_P^O U_P^O + A_W U_W + A_N U_N + (P_w - P_e) \Delta Y$$

onde :

(75)

$$A_P = A_P^O + A_E^* + A_W + A_N + A_S \quad e \quad A_E^* = \frac{Pr \cdot \Delta Y}{(X_e - X_P)}$$

TIPO 5

$$A_P U_P = A_P^O U_P^O + A_W U_W + A_N U_N + A_S U_S + (P_w - P_e) \Delta Y$$

onde :

(76)

$$A_P = A_P^O + A_E^* + A_W + A_N + A_S$$

TIPO 6

$$A_P U_P = A_P^O U_P^O + A_W U_W + A_S U_S + (P_w - P_e) \Delta Y$$

onde :

(77)

$$A_P = A_P^O + A_E^* + A_W + A_S$$

Para o arranjo do momento em Y, Figura (6), os volumes de controle são tratados como segue :

TIPO 7

$$A_P U_P = A_P^O V_P^O + A_W V_W + A_S V_S + (P_S - P_n) \Delta X + Ra \cdot \theta_P \cdot Pr \cdot \Delta Y \cdot \Delta X \quad (78)$$

onde :

$$A_P = A_P^O + A_E + A_W^* + A_N + A_S \quad e \quad A_W^* = \frac{Pr \cdot \Delta Y}{(X_P - X_W)}$$

Para o arranjo relacionado com a equação da energia, Figura (7), tem-se :

TIPO 8

$$\bar{A}_P \theta_P = A_P^O \theta_P^O + \bar{A}_E \theta_E + \bar{A}_N \theta_N - \frac{\frac{\wedge}{k}}{\frac{\wedge}{Cp}} \left[ C1 \cdot q \cdot \Delta Y + Bi \cdot C2 \cdot \Delta X \right] \quad (79)$$

onde :

$$\bar{A}_P = A_P^O + \bar{A}_E + \bar{A}_N + \frac{\frac{\wedge}{k}}{\frac{\wedge}{Cp}} \cdot C2 \cdot Bi \cdot \Delta X$$

TIPO 9

$$\bar{A}_P \theta_P = A_P^O \theta_P^O + \bar{A}_E \theta_E + \bar{A}_N \theta_N + \bar{A}_S \theta_S - \frac{\frac{\wedge}{k}}{\frac{\wedge}{Cp}} C1 \cdot q \cdot \Delta Y \quad (80)$$

onde :

$$\bar{A}_P = A_P^O + \bar{A}_E + \bar{A}_N + \bar{A}_S$$

TIPO 10

$$\bar{A}_P \theta_P = A_P^O \theta_P^O + \bar{A}_E \theta_E + \bar{A}_S \theta_S - \frac{\hat{k}}{\hat{C}_p} \left[ C1.q.\Delta Y + Bi.C2.\Delta X \right]$$

(81)

onde :

$$\bar{A}_P = A_P^O + \bar{A}_E + \bar{A}_S + \frac{\hat{k}}{\hat{C}_p} C2.Bi.\Delta X$$

TIPO 11

$$\bar{A}_P \theta_P = A_P^O \theta_P^O + \bar{A}_E \theta_E + \bar{A}_W \theta_W + \bar{A}_N \theta_N - \frac{\hat{k}}{\hat{C}_p} Bi.C2.\Delta X$$

(82)

onde :

$$\bar{A}_P = A_P^O + \bar{A}_E + \bar{A}_W + \bar{A}_N + \frac{\hat{k}}{\hat{C}_p} C2.Bi.\Delta X$$

TIPO 12

$$\bar{A}_P \theta_P = A_P^O \theta_P^O + \bar{A}_E \theta_E + \bar{A}_W \theta_W + \bar{A}_S \theta_S - \frac{\hat{k}}{\hat{C}_p} Bi.C2.\Delta X$$

(83)

onde :

$$\bar{A}_P = A_P^O + \bar{A}_E + \bar{A}_W + \bar{A}_S + \frac{\hat{k}}{\hat{C}_p} C2.Bi.\Delta X$$

TIPO 13

$$\bar{A}_P \theta_P = A_P^O \theta_P^O + \bar{A}_W \theta_W + \bar{A}_N \theta_N - \frac{\hat{k}}{\hat{C}_p} C2.Bi \left[ \Delta X + \Delta Y \right]$$

onde :

(84)

$$\bar{A}_P = A_P^O + \bar{A}_W + \bar{A}_N + \frac{\hat{k}}{\hat{C}_p} C2.Bi \left[ \Delta X + \Delta Y \right]$$

TIPO 14

$$\bar{A}_P \theta_P = A_P^O \theta_P^O + \bar{A}_W \theta_W + \bar{A}_N \theta_N + \bar{A}_S \theta_S - \frac{\hat{k}}{\hat{C}_p} Bi.C2.\Delta X$$

onde :

(85)

$$\bar{A}_P = A_P^O + \bar{A}_W + \bar{A}_N + \bar{A}_S + \frac{\hat{k}}{\hat{C}_p} C2.Bi.\Delta X$$

TIPO 15

$$\bar{A}_P \theta_P = A_P^O \theta_P^O + \bar{A}_W \theta_W + \bar{A}_S \theta_S - \frac{\hat{k}}{\hat{C}_p} C2.Bi \left[ \Delta X + \Delta Y \right]$$

onde :

(86)

$$\bar{A}_P = A_P^O + \bar{A}_W + \bar{A}_S + \frac{\hat{k}}{\hat{C}_p} C2.Bi \left[ \Delta X + \Delta Y \right]$$

A equação da continuidade integrada no volume de controle do arranjo da Figura (7), que é deslocado em relação aos arranjos das componentes de velocidades na direção X e Y, fornece :

$$\left( U_{i,j+1} - U_{i,j-1} \right) \Delta Y - \left( V_{i+1,j} - V_{i-1,j} \right) \Delta X = 0 \quad (87)$$

A substituição das expressões para as velocidades U e V, obtidas das equações (62) e (63) e que carregam os valores das pressões P nas fronteiras dos volumes de controle, na equação (87), permite a obtenção do campo de pressões correspondente ao escoamento. Isto pode ser melhor entendido observando-se o desenvolvimento abaixo.

Escrevendo as equações (62) e (63) em termos de i, j obtém-se :

$$\begin{aligned} A_{i,j} U_{i,j} &= A_{i,j}^o U_{i,j}^o + A_{i,j+2} U_{i,j+2} + A_{i,j-2} U_{i,j-2} + \\ &+ A_{i+2,j} U_{i+2,j} + A_{i-2,j} U_{i-2,j} + \left( P_{i,j-1} - P_{i,j+1} \right) \Delta Y \end{aligned} \quad (88)$$

e,

$$\begin{aligned} A_{i,j} V_{i,j} &= A_{i,j}^o V_{i,j}^o + A_{i,j+2} V_{i,j+2} + A_{i,j-2} V_{i,j-2} + \\ &+ A_{i+2,j} V_{i+2,j} + A_{i-2,j} V_{i-2,j} + \left( P_{i-1,j} - P_{i+1,j} \right) \Delta X + \\ &+ Ra \cdot \theta_{i,j} \cdot Pr \cdot \Delta X \cdot \Delta Y \end{aligned} \quad (89)$$

ou



$$A_{i,j} U_{i,j} = \phi_{i,j} + \left( P_{i,j-1} - P_{i,j+1} \right) \Delta Y \quad (90)$$

e,

$$A_{i,j} V_{i,j} = \phi_{i,j} + \left( P_{i-1,j} - P_{i+1,j} \right) \Delta X \quad (91)$$

onde :

$$\begin{aligned} \phi_{i,j} = & A_{i,j}^0 U_{i,j}^0 + A_{i,j+2} U_{i,j+2} + A_{i,j-2} U_{i,j-2} + \\ & + A_{i+2,j} U_{i+2,j} + A_{i-2,j} U_{i-2,j} \end{aligned} \quad (92)$$

e,

$$\begin{aligned} \phi_{i,j} = & A_{i,j}^0 V_{i,j}^0 + A_{i,j+2} V_{i,j+2} + A_{i,j-2} V_{i,j-2} + \\ & + A_{i+2,j} V_{i+2,j} + A_{i-2,j} V_{i-2,j} + Ra \cdot \theta_{i,j} \cdot Pr \cdot \Delta X \cdot \Delta Y \end{aligned} \quad (93)$$

Para se obter as velocidades  $U_{i,j+1}$ ,  $U_{i,j-1}$ ,  $V_{i+1,j}$  e  $V_{i-1,j}$ , basta substituir os índices das equações (90) e (91). Assim,

$$A_{i,j+1} U_{i,j+1} = \phi_{i,j+1} + \left( P_{i,j} - P_{i,j+2} \right) \Delta Y \quad (94)$$

$$A_{i,j-1} U_{i,j-1} = \phi_{i,j-1} + \left( P_{i,j-2} - P_{i,j} \right) \Delta Y \quad (95)$$

$$A_{i+1,j} V_{i+1,j} = \phi_{i+1,j} + \left( P_{i,j} - P_{i+2,j} \right) \Delta X \quad (96)$$

$$A_{i,j-1} V_{i-1,j} = \phi_{i-1,j} + \left( P_{i-2,j} - P_{i,j} \right) \Delta X \quad (97)$$

Levando-se as equações (94), (95), (96) e (97) em (87),  
obtem-se :

$$B_{i,j} P_{i,j} = B_{i,j+2} P_{i,j+2} + B_{i,j-2} P_{i,j-2} + B_{i+2,j} P_{i+2,j} + \\ + B_{i-2,j} P_{i-2,j} + \bar{B}_{i,j} \quad (98)$$

onde :

$$B_{i,j+2} = \frac{\Delta Y^2}{A_{i,j+1}} \quad ; \quad B_{i+2,j} = \frac{\Delta X^2}{A_{i+1,j}}$$

$$B_{i,j-2} = \frac{\Delta Y^2}{A_{i,j-1}} \quad ; \quad B_{i-2,j} = \frac{\Delta X^2}{A_{i-1,j}}$$

(99)

$$B_{i,j} = B_{i,j+2} + B_{i,j-2} + B_{i+2,j} + B_{i-2,j}$$

$$\bar{B}_{i,j} = - \frac{\phi_{i,j+1} \cdot \Delta Y}{A_{i,j+1}} + \frac{\phi_{i,j-1} \cdot \Delta Y}{A_{i,j-1}} - \frac{\phi_{i+1,j} \cdot \Delta X}{A_{i+1,j}} + \frac{\phi_{i-1,j} \cdot \Delta X}{A_{i-1,j}}$$

#### IV - SOLUÇÃO NUMÉRICA

Os sistemas de equações lineares para o campo de temperaturas, equação (64) e equações (79) a (86); para o campo de velocidades na direção X, equação (62) e equações (73) a (77); para o campo de velocidades na direção Y, equações (63) e (78) e para o campo de pressões, equações (98) e (99), são resolvidos de maneira implícita e de forma iterativa através de uma variação do método TDMA (Tri-Diagonal Matrix Algebraic) em que se faz a atualização dos coeficientes das linhas e colunas anteriores àquela em que se está calculando.

Os passos realizados para isso, resumidamente são:

- a) Calcula-se um campo de temperaturas  $\bar{\theta}$  para o instante  $Fo + dFo$  com os campos de velocidades,  $U^0$  e  $V^0$ , o de pressões  $P^0$  correspondente a esses e das propriedades do M.M.F.,  $k$ , e  $C_p$ , para  $Fo$ .
- b) Com o valor de  $\bar{\theta}$  assim calculado obtêm-se agora um novo campo de velocidades,  $\bar{U}$  e  $\bar{V}$ , para  $Fo + dFo$ , ainda com o valor do campo de pressões,  $P^0$ , para  $Fo$ .
- c) Com esse campo de velocidades,  $\bar{U}$  e  $\bar{V}$ , calcula-se o campo de pressões,  $\bar{P}$ , correspondente.
- d) Repete-se o cálculo feito em (b) agora com o campo de pressões  $\bar{P}$ , corrigido.

A sequência de operações (b) e (c) é repetida até que seja atingida a convergência para o campo de pressões. Esta convergência para o campo de pressões é considerada atingida

quando para todos os nós do campo verifica-se a relação :

$$\left| \frac{\bar{P}_n - \bar{P}_{n-1}}{\bar{P}_n} \right| < \zeta_1 \quad (100)$$

onde :

$\bar{P}_n$  é o valor da pressão obtido na iteração n

$\bar{P}_{n-1}$  é o valor da pressão obtido na iteração n-1

$\zeta_1$  é a tolerância estabelecida para o campo de pressões.

e) Com estes campos de velocidades e de pressões, recalcula-se o campo de temperaturas. Havendo convergência para este campo, refaz-se as matrizes de propriedades e assume-se uma nova configuração geral de velocidades e temperaturas para  $Fo + dFo$ . Não havendo, refaz-se os passos (b), (c) e (d), recalculando-se o campo de temperaturas até que ocorra convergência para o mesmo. Esta convergência é considerada atingida quando em todos os nós :

$$\left| \frac{\bar{\theta}_n - \bar{\theta}_{n-1}}{\bar{\theta}_n} \right| < \zeta_2 \quad (101)$$

onde :

$\bar{\theta}_n$  é o valor da temperatura obtido na iteração n

$\bar{\theta}_{n-1}$  é o valor da temperatura obtido na iteração n-1

$\zeta_2$  é a tolerância estabelecida para o campo de temperaturas.

Esta sequência pode ser melhor compreendida observando-se o fluxograma apresentado a seguir.

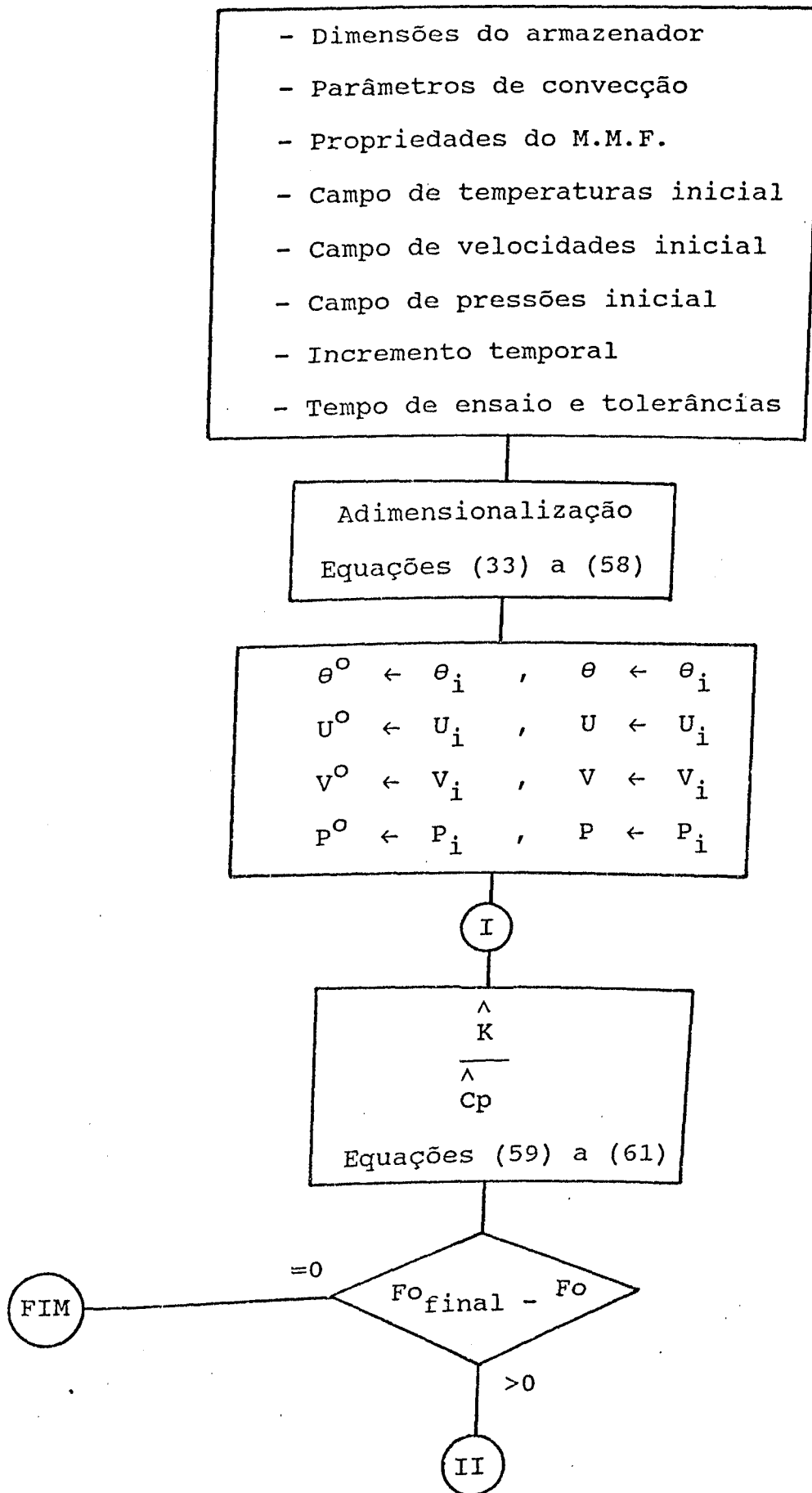


Figura 8. Fluxograma do Programa Computacional

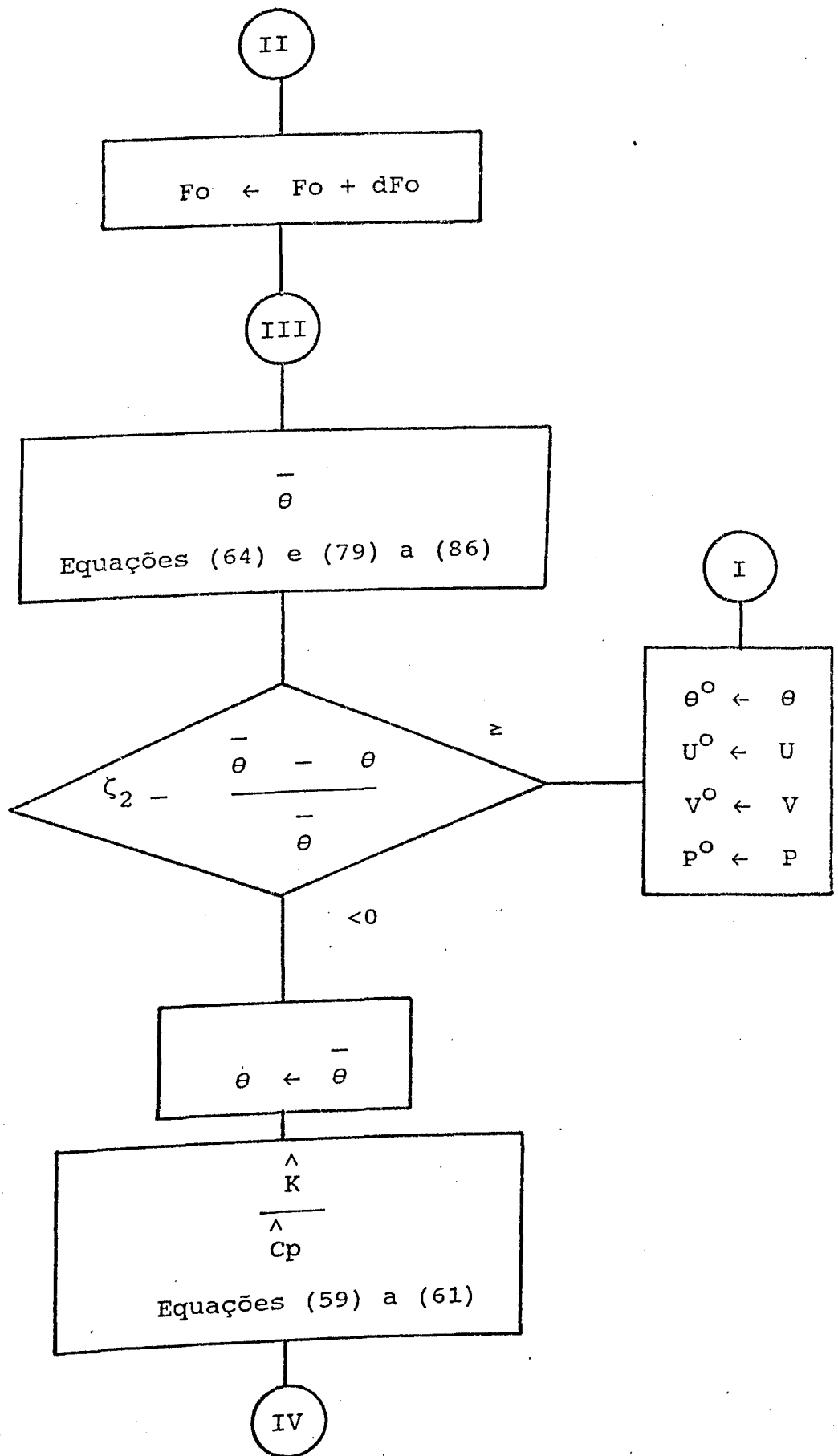


Figura 8. Fluxograma do Programa Computacional

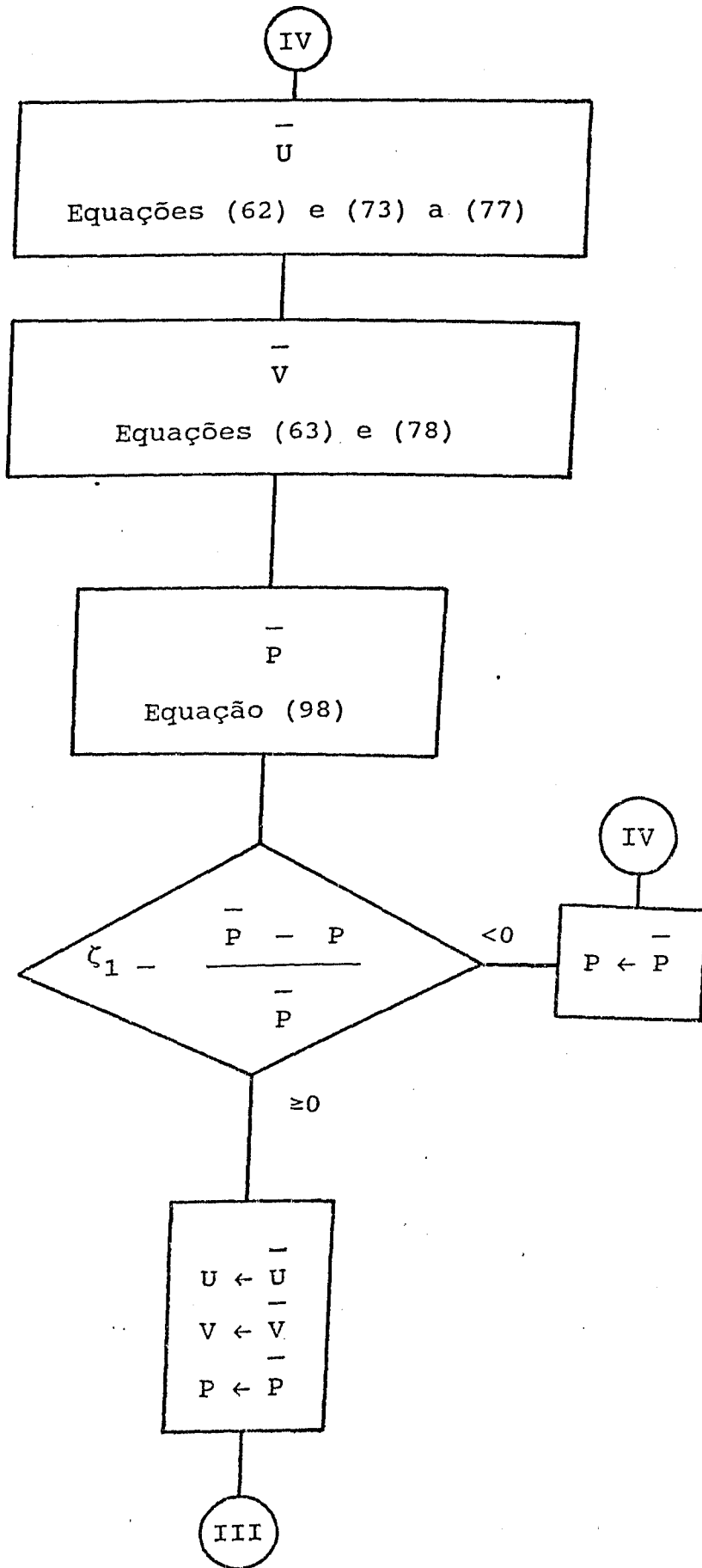


Figura 8. Fluxograma do Programa Computacional

O programa computacional utiliza a linguagem FORTRAN e foi executado no computador IBM 3090 da U.F.U.

Este programa fornece uma série de quantidades calculadas em intervalos de tempo os quais podem ser escolhidos como qualquer múltiplo do incremento de tempo usado nas expressões. As quantidades computadas em cada instante são obtidas em função do campo de temperatura e incluem a fração de massa fundida, o calor armazenado e o calor perdido pelas fronteiras do sistema.

Com o campo de temperaturas pode-se ainda identificar as fronteiras entre as fases sólida e líquida e também verificar o comportamento deste campo na face da placa de material de mudança de fase onde é aplicado o fluxo de calor.

O incremento para o número de Fourier empregado é  $2.5 \cdot 10^8$ . Como verificado por Rego [31], estes valores são estabelecidos após intensa investigação numérica visando otimizar o processo iterativo buscando a convergência dos resultados com o menor número possível de iterações sem causar alterações significativas nos valores encontrados. Ainda, o pequeno incremento empregado para o número de Fourier está relacionado com o modelo utilizado para simular o efeito de mudança de fase. Utilizando-se valores elevados para esse incremento ocorre um salto do campo de temperatura na região de transição levando a erros no valor do calor latente utilizado.



## V - RESULTADOS E ANÁLISES

### V.1 - INTRODUÇÃO

Apresenta-se neste capítulo resultados e detalhes do estudo paramétrico do dispositivo de mudança de fase.

O estudo paramétrico consiste de uma análise térmica da placa plana de material de mudança de fase, mostrada na Figura 1, com uma face exposta a um fluxo de calor e as outras a perdas de calor por convecção.

São realizados vários ensaios utilizando-se o modelo matemático aqui proposto, onde através da variação de parâmetros geométricos e de transferência de calor, pode-se verificar o comportamento do material de mudança de fase em função de :

- Grau de sub-resfriamento inicial no processo de fusão ;
- Intensidade de fluxo de calor fornecida :
- Número de Biot no processo de fusão ;
- Espessura da placa de M.M.F. ;
- Fluxo de calor pulsante com excitação do tipo " tudo ou nada " .

Para estes ensaios são traçadas curvas que mostram a fração de massa fundida e a quantidade de calor armazenado em função do tempo, a posição da frente de fusão e o campo de temperaturas na face exposta ao fluxo de calor. Este campo de temperaturas na parede do M.M.F. é confrontado com aquele campo

que seria obtido na superfície do componente a ser refrigerado se não houvesse o material de mudança de fase. Deve-se notar aqui que a superfície onde é aplicado o fluxo de calor é coincidente com essa superfície do componente.

Outro fato que deve ser destacado é que devido ao grande número de combinações possíveis com os parâmetros geométricos e de transferência de calor, uma infinidade de novos ensaios poderiam ser realizados, o que exigiria um grande tempo computacional. Diante disso, designou-se um ensaio que é tomado como padrão e, a partir deste, são feitos novos ensaios variando-se um parâmetro enquanto os outros permanecem inalterados. Este ensaio é designado como ENSAIO.1.

A Tabela 1 fornece os valores das propriedades do M.M.F. usadas nos ensaios computacionais. Valores das variáveis geométricas e parâmetros de transferência de calor escolhidos para a simulação numérica são listados na Tabela 2. Na Tabela 3 são especificados os ensaios realizados com os dados utilizados e objetivos de cada ensaio.

Tabela 1. Propriedades do M.M.F. usadas nos cálculos computacionais.

DENSIDADE	Kg/m <sup>3</sup>	777.6
CALOR DE FUSÃO	J/Kg	248700
CALOR ESPECÍFICO	J/Kg.°C	2218
CONDUTIVIDADE TÉRMICA	W/m.°C	0.149
TEMPERATURA DE FUSÃO	°C	36.60
TEMPERATURA DE TRANSIÇÃO	°C	36.56
VISCOSIDADE DINÂMICA	Kg/m.s	2.5*10 <sup>-3</sup>
COEFICIENTE DE EXPANSÃO VOLUMÉTRICA	1/°C	8.5*10 <sup>-4</sup>

Tabela 2. Valores das variáveis geométricas e parâmetros de transferência de calor adimensionais escolhidos para o estudo numérico, para H = 0.1 m.

ESPESSURA DA PLACA , L*	0.025	0.05	0.075	0.1
DENSIDADE DE FLUXO DE CALOR APLICADO , q	300	500	750	1000
NÚMERO DE BIOT , Bi	6.71	20.13	33.56	67.11
TEMPERATURAS INICIAL E DE RESFRIAMENTO $\theta_i, \theta_b$	-415	-290	-115	

Tabela 3. Ensaio realizados

ENSAIOS	DADOS	OBJETIVOS
ENSAIO.1	$\theta_i = \theta_b = -415$ $Bi = 20.13$ $L^* = 0.05$ $q = 500$	Verificação do comportamento do M.M.F. até a fusão completa.
ENSAIO.2	$\theta_i = \theta_b = \text{variável}$ $Bi = 20.13$ $L^* = 0.05$ $q = 500$	Analisar o comportamento do M.M.F. para diferentes graus de sub-resfriamento até a fusão total.
ENSAIO.3	$\theta_i = \theta_b = -415$ $Bi = \text{variável}$ $L^* = 0.05$ $q = 500$	Verificar o comportamento do M.M.F. quando submetido à diferentes intensidades de resfriamento.
ENSAIO.4	$\theta_i = \theta_b = -415$ $Bi = 20.13$ $L^* = 0.05$ $q = \text{variável}$	Analisar como se comporta o M.M.F. quando sujeito à diferentes densidades de fluxo de calor.
ENSAIO.5	$\theta_i = \theta_b = -415$ $Bi = 20.13$ $L^* = \text{variável}$ $q = 500$	Verificar o comportamento do M.M.F. em função da variação da espessura da placa deste material.
ENSAIO.6	$\theta_i = \theta_b = -415$ $Bi = 20.13$ $L^* = 0.05$ $q = 0 \text{ ou } 500$	Analisar o comportamento do M.M.F. quando sujeito a pulsos de energia aplicados segundo uma excitação tudo ou nada.

## V.2 - Validação dos resultados

Para se fazer a validação do modelo numérico desenvolvido, foram realizados alguns testes com o intuito de simular determinadas situações conhecidas na literatura.

Um primeiro teste foi realizado no sentido de se obter a solução do problema de condução pura, bidimensional e com as condições de contorno citadas anteriormente.

Os resultados encontrados para o campo de temperaturas, para esta situação, mostraram solução exata quando comparados com a solução analítica.

Um outro teste foi feito, submetendo o material de mudança de fase a uma intensidade de fluxo de calor e a determinados parâmetros de convecção, com a finalidade de se observar o princípio de conservação da energia. A sequência mostrada na Figura 8 fornece a evolução das quantidades de calor fornecido, calor armazenado e calor perdido com o tempo, para diferentes graus de resfriamento, expressos através do número de Biot, para este teste.

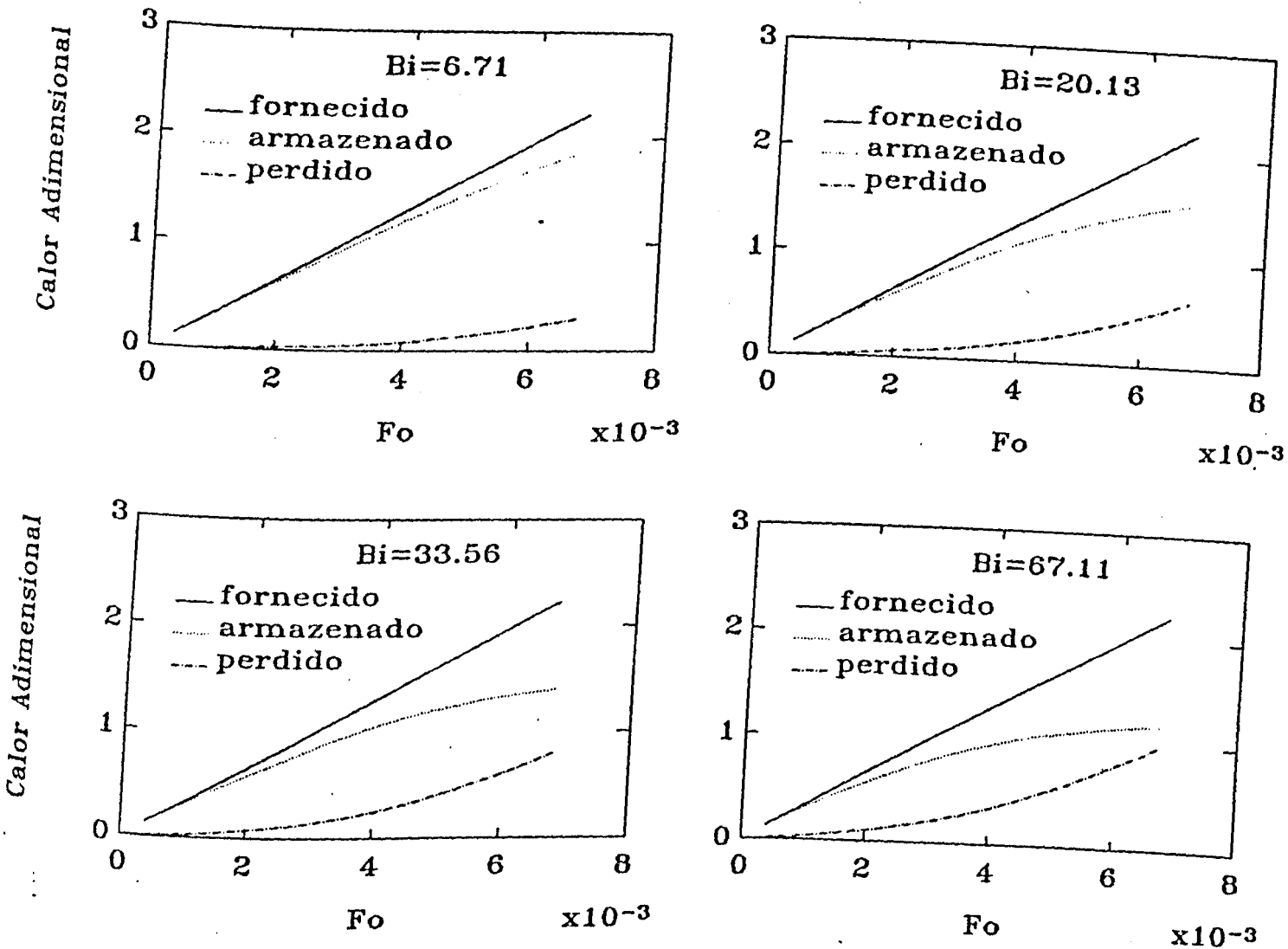


Figura 8 - Comportamento das curvas de calor fornecido, calor armazenado e perdido com o tempo, para diferentes graus de resfriamento

Pode-se observar que, a medida que decorre o tempo, a taxa de crescimento da quantidade de calor armazenado diminui enquanto a taxa de crescimento da quantidade de calor perdido

pelas fronteiras do M.M.F. aumenta. Isto acontece porque à medida que vai aumentando a quantidade de calor fornecida ao M.M.F., vai aumentando também a temperatura da parte fundida do material e, dessa maneira, vão aumentando as perdas pelas fronteiras do sistema.

Em números de Biot mais elevados, devido ao maior efeito de refrigeração imposto externamente pelo fluido de resfriamento, maior é o incremento na taxa de crescimento do calor perdido e, conseqüentemente, menor a parcela de calor armazenado.

Para que a lei da conservação da energia seja satisfeita, é necessário que a soma das quantidades de calor armazenado e perdido seja igual à quantidade de calor fornecido ao M.M.F.. Isto pode ser verificado observando-se as curvas mostradas, onde pode-se constatar o bom comportamento destas curvas com relação a essa característica. Em termos percentuais, o erro relativo entre a soma das quantidades de calor armazenado e perdido em comparação com a quantidade fornecida, situou-se sempre abaixo de 5%.

Um último teste foi realizado com o objetivo de simular os resultados obtidos por Rego [31], onde o fluxo de calor local aplicado ao M.M.F., é função do campo de temperaturas que, por sua vez, varia ao longo da altura do armazenador. Adotou-se, então, no presente trabalho, uma função representativa deste fluxo ao longo da parede do armazenador e obteve-se as curvas da fração de massa fundida, do calor armazenado e das frentes de fusão em função do tempo. Os resultados obtidos nesta condição apresentaram uma diferença relativa inferior a 8%, quando comparados com os resultados daquele autor.

## V.3 - RESULTADOS DOS ENSAIOS

## V.3.1 - ENSAIO.1

As Figuras 10, 11, 12 e 13, mostradas a seguir, referem-se aos resultados obtidos segundo os dados para o ENSAIO.1.

A Figura 10 mostra como é o avanço da frente de fusão com o tempo para este ensaio.

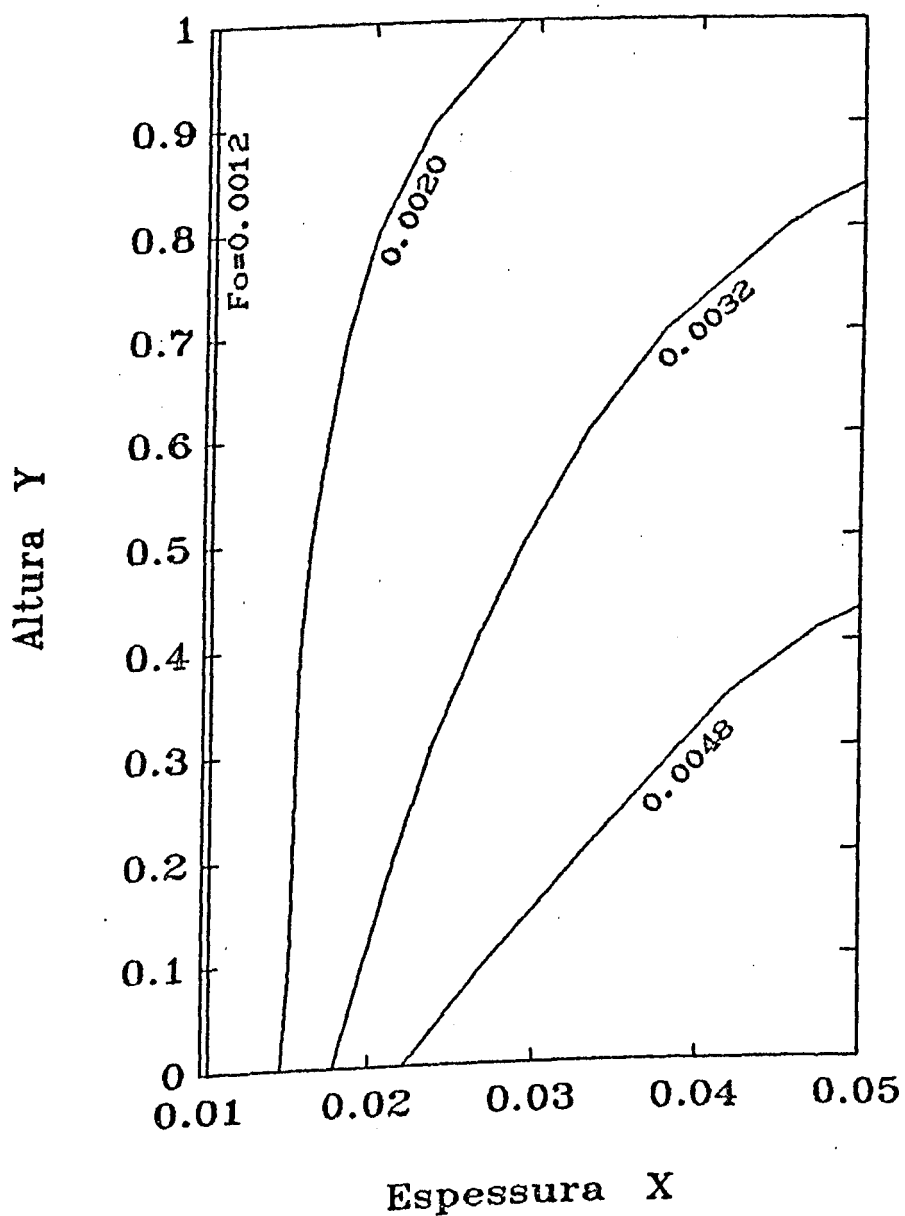


Figura 10. Frente de fusão x Fourier - ENSAIO.1



As Figuras 11 e 12 mostram, respectivamente, a fração de massa fundida e o calor armazenado com o tempo.

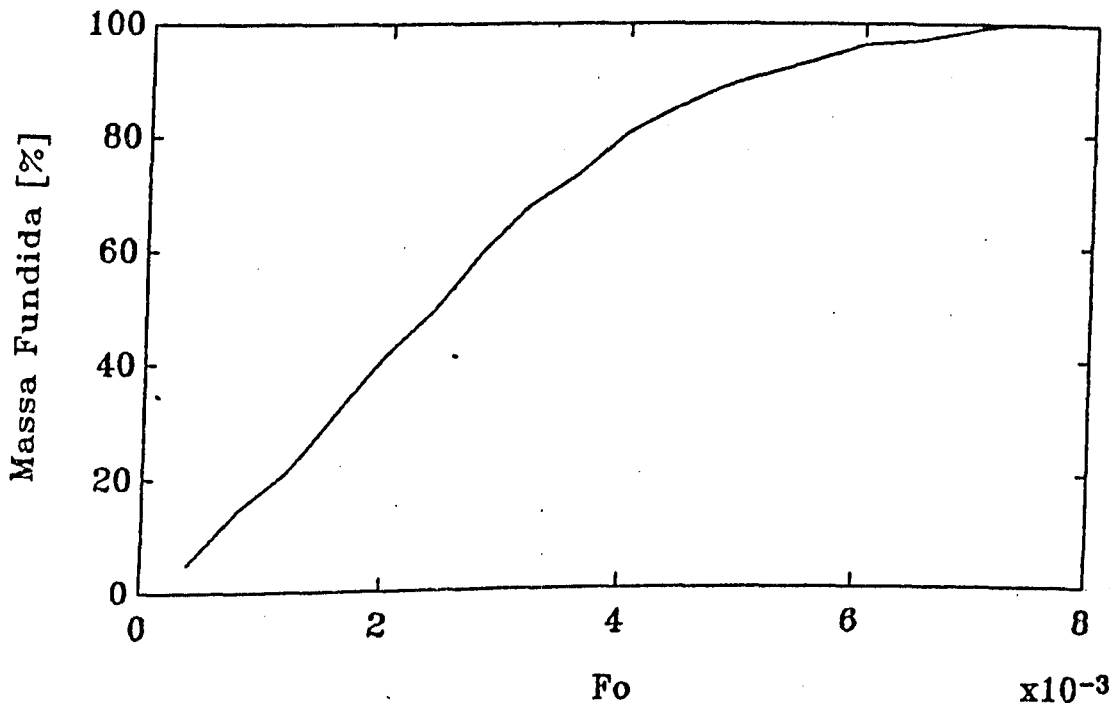


Figura 11. Fração de massa fundida x Fourier - ENSAIO.1

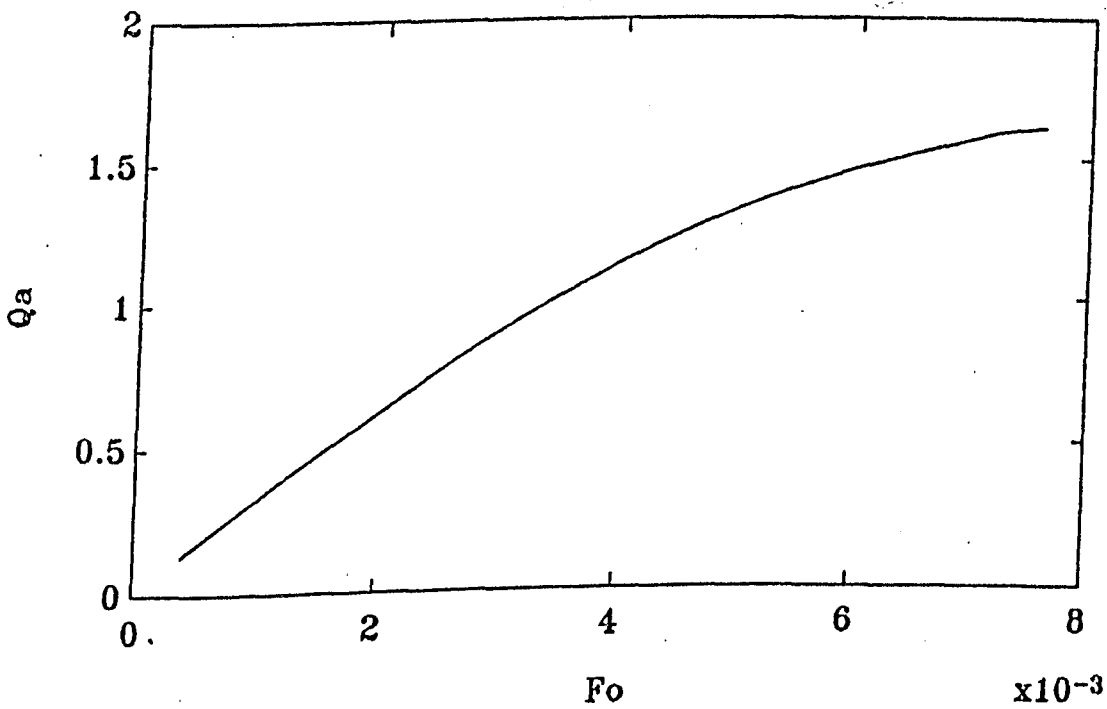


Figura 12. Calor armazenado adimensional x Fourier - ENSAIO.1

A Figura 13 mostra o comportamento do campo de temperaturas da face sujeita ao fluxo de calor para os tempos de  $t=138.9$  s,  $t=555.6$  s e  $t=856.6$  s, sendo este último o tempo para o qual ocorre a fusão total do material de mudança de fase. A curva pontilhada corresponde àquela curva de temperatura que seria obtida na face do meio a ser refrigerado se não houvesse o M.M.F., com os mesmos parâmetros de convecção. Como mencionado anteriormente, essa face é coincidente com a superfície do material onde é aplicado o fluxo de calor.

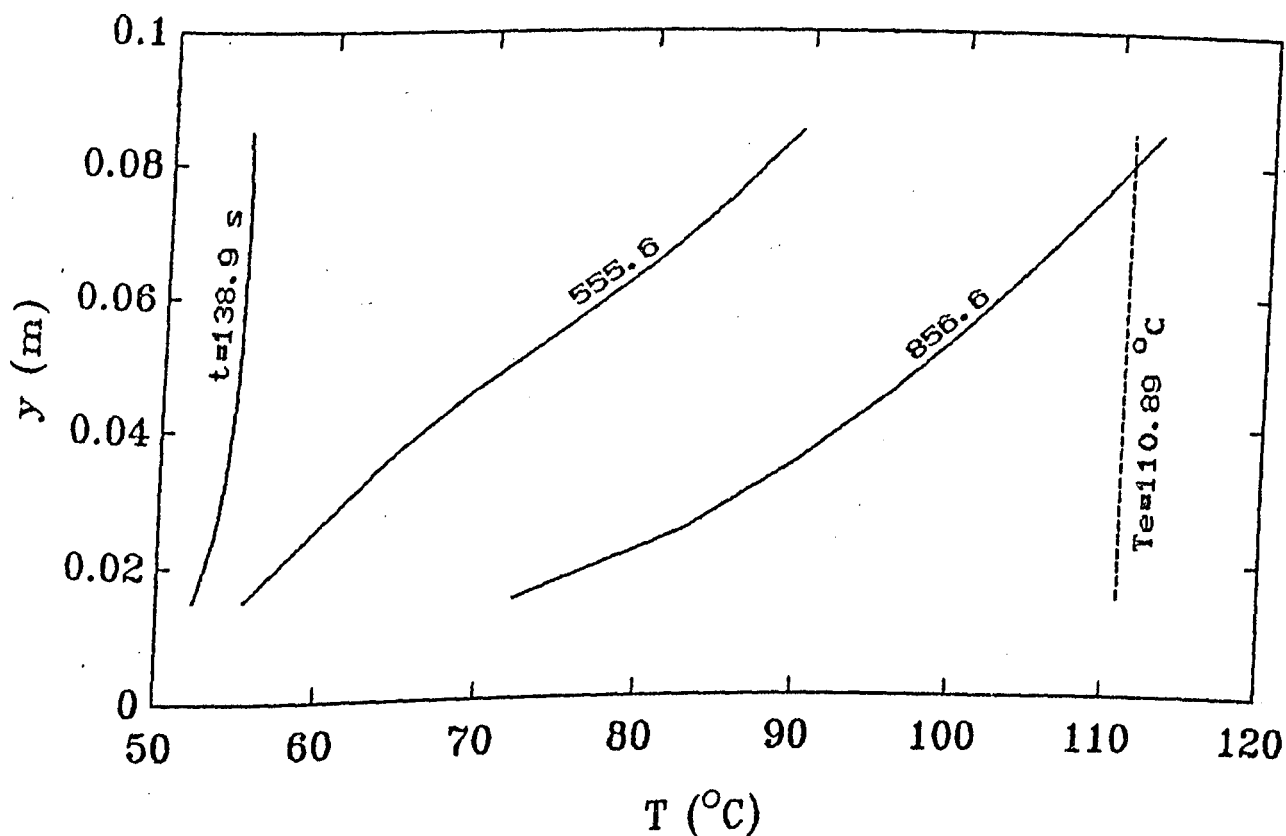


Figura 13. Temperatura na parede x Tempo - ENSAIO.1

Com relação ao ENSAIO.1, pode-se fazer as seguintes observações:

a) Analisando-se a Figura 10, que mostra o comportamento da frente de fusão, pode-se observar que no início do processo

quando o material é sujeito ao fluxo de calor, a frente é praticamente paralela ao eixo vertical da placa de material de mudança de fase. Isto foi observado por Rego [31] e deve-se ao fato que no início do processo de carga do M.M.F., os efeitos de condução de calor são predominantes, atenuando-se a seguir a medida que ocorre a fusão quando então começam a se manifestar os efeitos de convecção térmica na fase já fundida do M.M.F. A parcela líquida de M.M.F. sob a ação das forças de empuxo, devido à diferença de densidade entre a parte fundida, e portanto com maior temperatura, e a parte que está fundindo, com menor temperatura, se acumula na parte superior do armazenador intensificando o processo de fusão nesta região e distorcendo a frente.

b) Com relação às Figuras 11 e 12 que mostram, respectivamente, a variação da fração de massa fundida e o calor armazenado adimensional com o número de Fourier, pode-se verificar que no início do processo de carga esses valores crescem rapidamente e depois menos intensamente. Isto está ligado ao fato de que, no início, os efeitos de refrigeração externa, através das perdas por convecção, são pequenos e com isso a maior parte da energia que é fornecida ao sistema é armazenada, facilitando dessa maneira o processo de fusão. À medida que decorre o tempo, esses efeitos de refrigeração externa aumentam, ou seja, uma parcela maior de energia é perdida pelas fronteiras do M.M.F., diminuindo com isso as taxas de crescimento das quantidades mostradas nas curvas.

A densidade de fluxo de calor fornecido ao M.M.F. é constante e, portanto, a quantidade de calor recebida é função

aumentando com o tempo, a quantidade armazenada que também é uma função crescente com o tempo, vai diminuindo progressivamente sua taxa de crescimento. Em regime permanente é esperado que essa taxa seja nula e, desta maneira, todo incremento de energia adicionado ao sistema seja perdido por convecção, permanecendo invariável a quantidade de calor armazenado.

c) Com relação à Figura 13, que mostra o comportamento do campo de temperaturas na face do M.M.F. sujeita ao fluxo de calor, observa-se um aumento neste campo a medida que decorre o tempo sendo este aumento mais acentuado na parte superior do armazenador. Este fato é resultado do processo de convecção natural que faz com que a parcela fluida mais quente se situe num patamar mais elevado que a parcela fluida mais fria. Outro aspecto importante a ser observado é o fato do campo de temperatura, até que se obtenha a fusão completa em  $t=856.6$  s, permanecer quase que completamente abaixo da temperatura que seria obtida na superfície do meio a ser controlado termicamente se não se utilizasse o material de mudança de fase. Este fato explica a importância do M.M.F. no processo de controle térmico de componentes eletrônicos. O material absorve uma grande quantidade de energia na forma de calor latente e mantém o componente em temperaturas mais reduzidas. Contudo a parcela fundida aumenta gradativamente sua temperatura devido à absorção de calor sensível diminuindo com isso a eficiência de arrefecimento. Para manter a temperatura mais baixa, ligeiramente acima da temperatura de mudança de fase seria interessante que se dispusesse de um artifício de substituição dessa parcela já

fundida por material sólido, tal como é feito na tecnologia da ablação. Esta tecnologia tem sido utilizada em situações de reentrada de míssil onde a superfície do corpo é revestida com um material sólido que é exposto a um alto fluxo de calor. À medida que o material vai fundindo, a parcela líquida vai sendo removida e substituída por material sólido.

Portanto, uma grande quantidade de energia é gasta na fusão do material antes de ser conduzida para o interior do veículo, fazendo com que a temperatura da superfície deste veículo seja reduzida. O material de mudança de fase funde-se e absorve uma grande quantidade de calor. Por causa do grande calor latente de fusão desses materiais e da temperatura de fusão praticamente constante, a temperatura na superfície é mantida moderadamente maior do que a temperatura de mudança de fase.

V.3.2 - ENSAIO.2

O ENSAIO.2 é realizado para se estudar os efeitos do sub-resfriamento do material de mudança de fase no processo de fusão. Inicialmente o material se encontra em uma temperatura abaixo da temperatura de fusão e, iniciado o processo de carga, são mostrados o comportamento da frente de fusão, da fração de massa fundida, da quantidade de calor armazenado e do campo de temperaturas na parede, para as tres situações de sub-resfriamento.

A Figura 14, mostrada a seguir, fornece a variação da fração de massa fundida com o tempo para este ensaio.

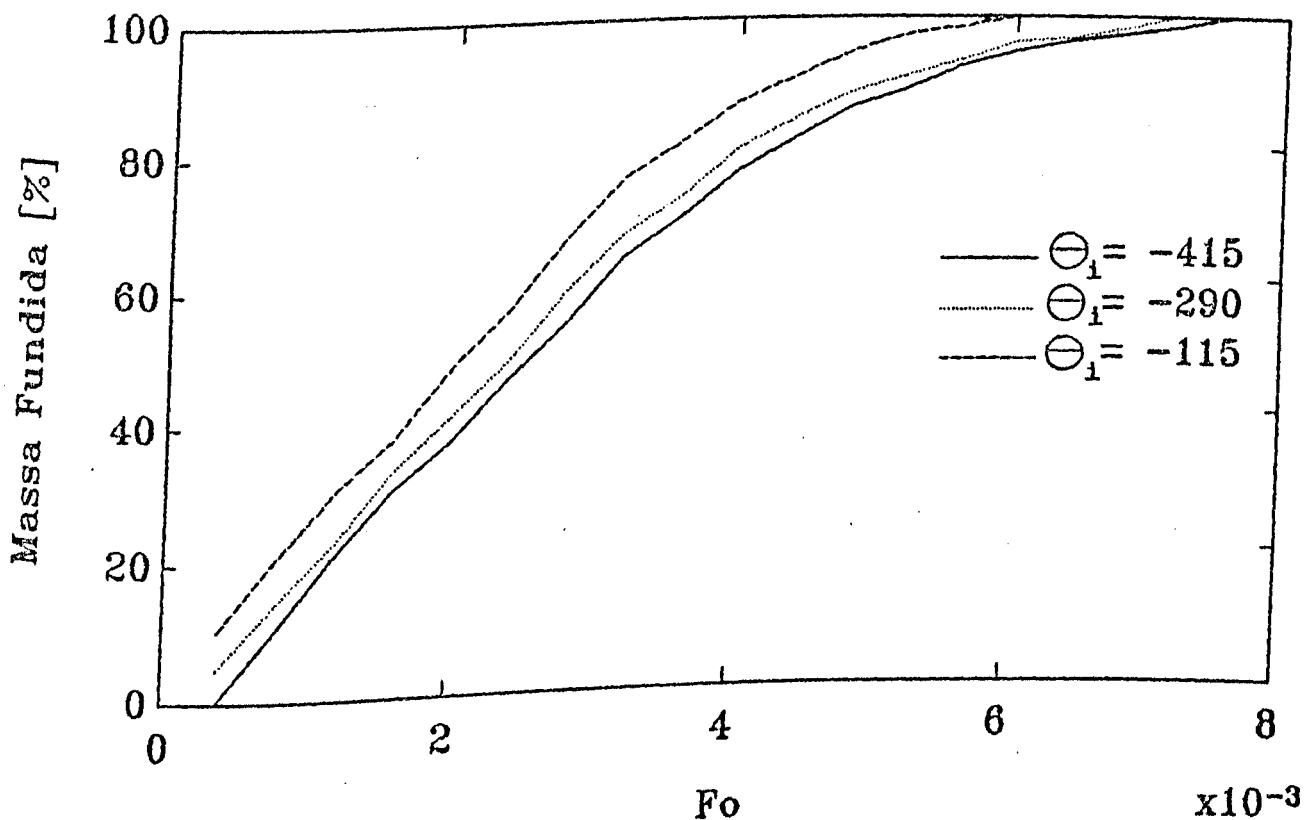


Figura 14. Fração de massa fundida x Fourier - ENSAIO.2

Já as Figuras 15, 16 e 17 a seguir, mostram, respectivamente, as

frentes de fusão, o campo de temperaturas na parede e a quantidade de calor armazenado em função do número de Fourier.

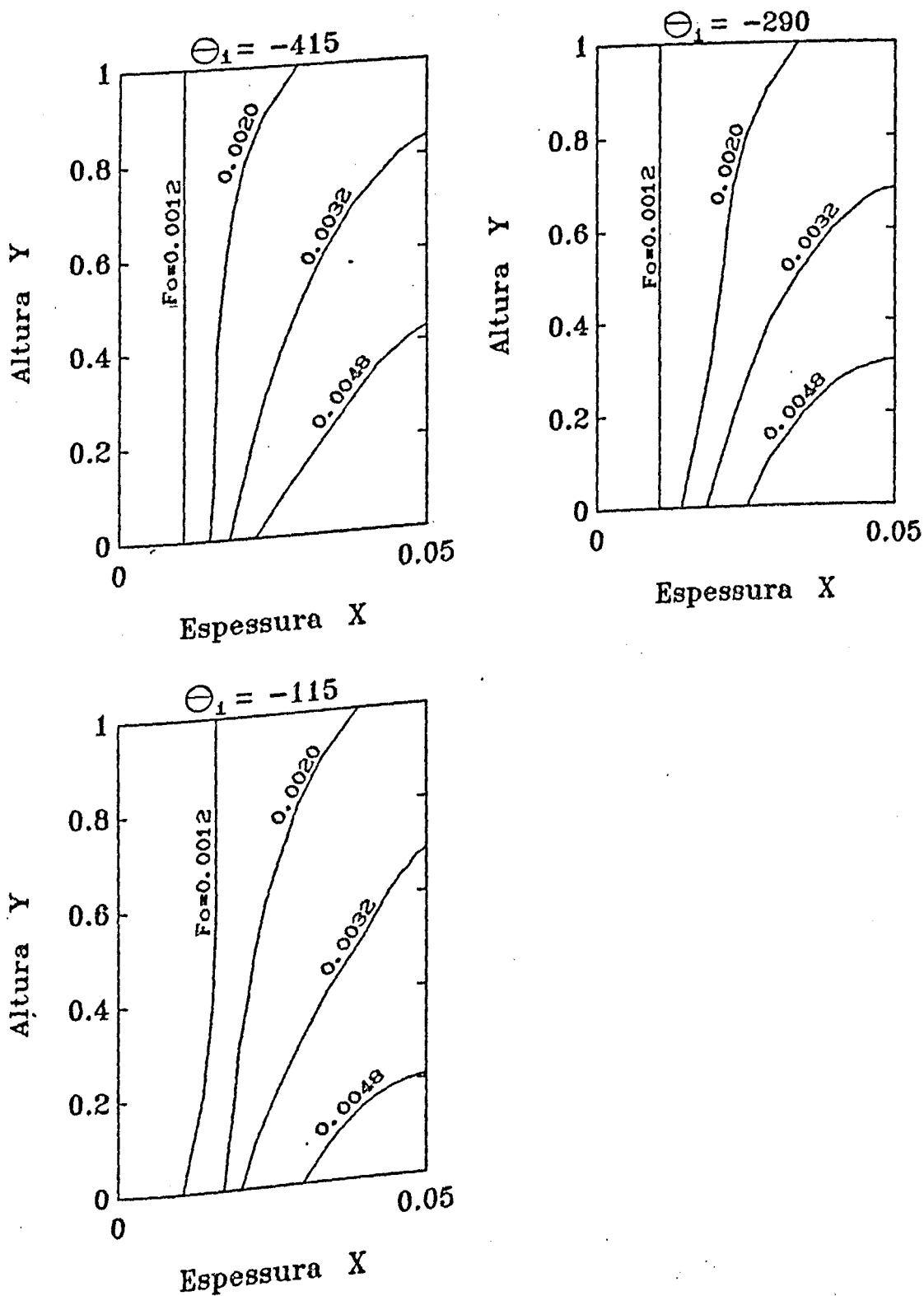


Figura 15. Frentes de fusão x Fourier - ENSAIO.2

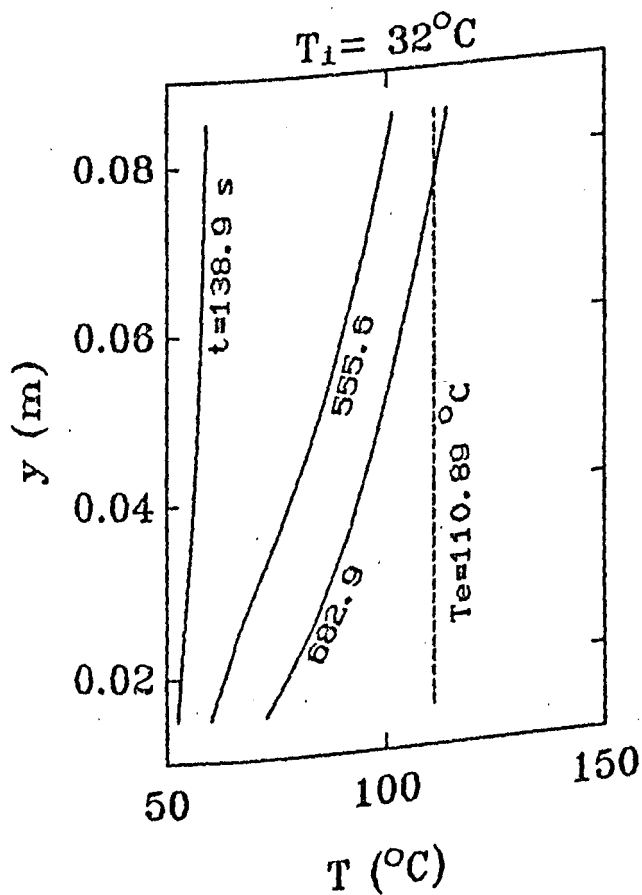
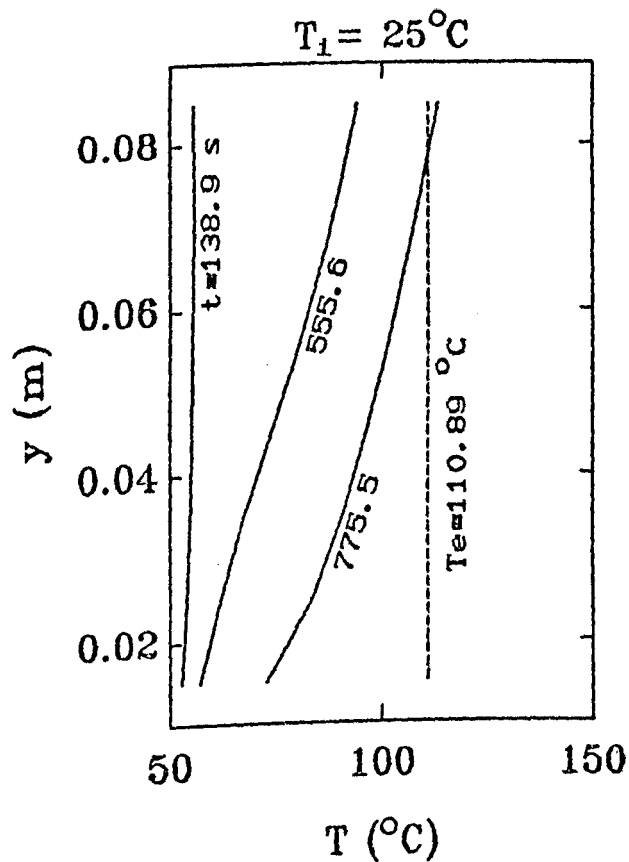
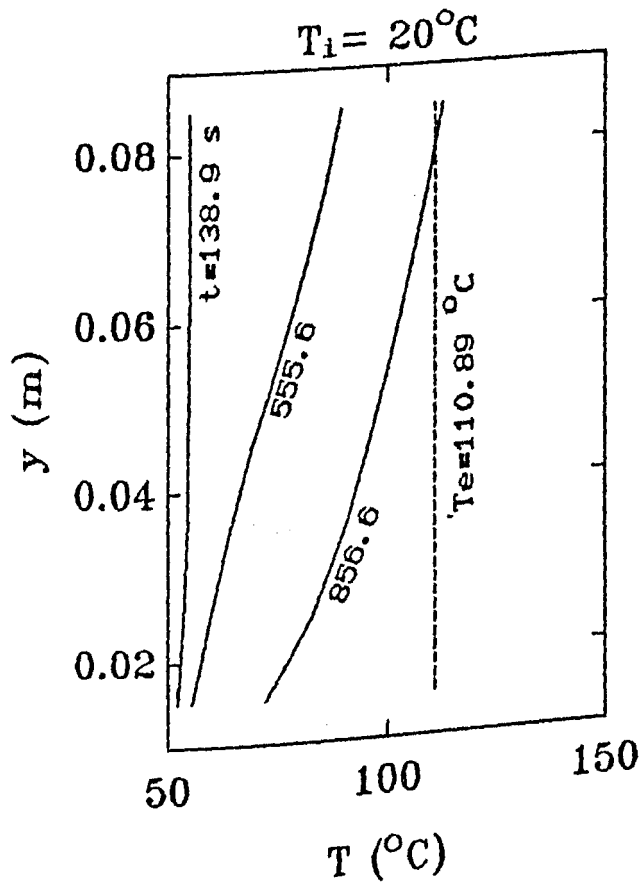


Figura 16. Temperatura na parede x Tempo - ENSAIO.2



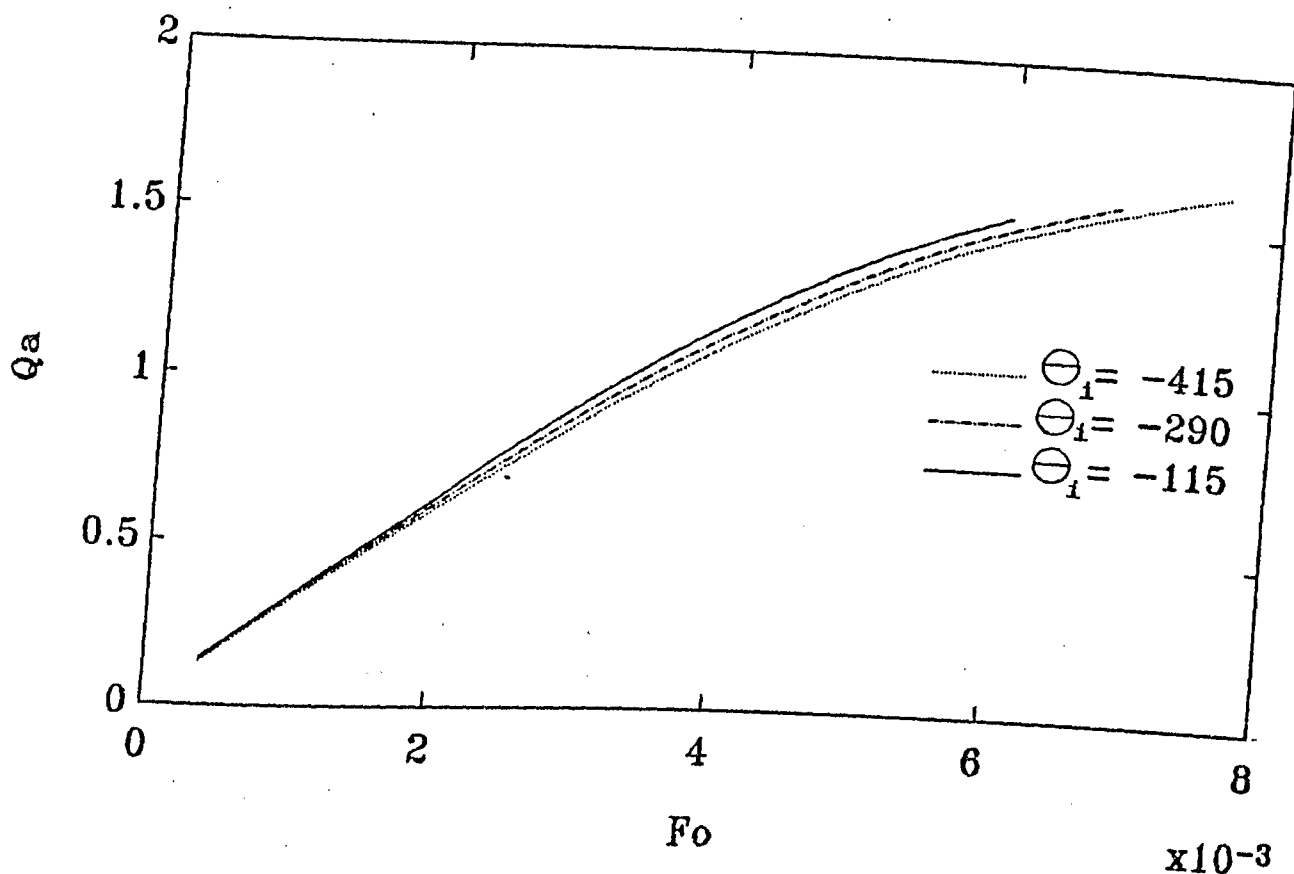


Figura 17. Calor armazenado adimensional x Fourier - ENSAIO.2

Para este ensaio pode-se fazer as seguintes observações :

a) Com relação à Figura 14, que mostra a fração de massa fundida com o tempo, pode-se verificar que quanto maior a temperatura inicial do material de mudança de fase menor é o tempo para que ocorra a fusão completa. Isto é esperado, porque estando o material em uma temperatura inicial mais elevada, a quantidade de calor necessária para fundi-lo totalmente é menor. Como esta quantidade é uma função direta do tempo, tem-se que uma menor quantidade de calor fornecida ao M.M.F. implica em um menor tempo para se realizar a fusão completa.

b) Com relação às curvas para a posição das frentes de fusão, mostradas na Figura 15, pode-se observar que no início do processo, para as três temperaturas consideradas, as frentes são praticamente paralelas ao eixo vertical do armazenador, indicando com isso que neste estágio a transferência de calor por condução é predominante. Com o decorrer do tempo estas frentes são distorcidas devido aos efeitos de convecção natural que fazem com que a parcela líquida mais quente se situe na parte superior do armazenador intensificando o processo de fusão nesta região. Pode-se ver que quanto maior a temperatura inicial do material de mudança de fase mais rapidamente se inicia este processo de convecção e conseqüentemente mais rápido é o avanço da frente de fusão culminando em um menor tempo para se completar a fusão.

c) É mostrado na sequência da Figura 16, o comportamento do campo de temperatura na parede com o tempo, até que se atinja a fusão completa do material para o grau de sub-resfriamento estudado, ou seja, para as situações em que o material se encontra abaixo da temperatura de mudança de fase, para as três temperaturas especificadas. Observa-se uma maior mudança neste campo na parte superior da placa como resultado do processo de convecção natural que se inicia com a fusão do material. Novamente pode-se constatar o fato de que a temperatura da face do dispositivo a ser controlado termicamente permanece quase que totalmente abaixo daquela temperatura que seria esperada se não fosse utilizado o material de mudança de fase para absorção da potência liberada pelo dispositivo. Isto mostra a eficiência do

M.M.F. como meio de controle térmico enquanto ele está na fase sólida. À partir do instante que ocorre a fusão total do material essa eficiência cai rapidamente devido à absorção de calor sensível que eleva a temperatura a níveis mais elevados que a esperada com a refrigeração sendo feita diretamente na superfície do meio a ser refrigerado.

d) Analisando-se as curvas para a quantidade de calor armazenado com o tempo, mostradas na Figura 17, pode-se observar que no início do processo de carga as curvas se sobrepõem havendo uma melhor resolução à medida que decorre o tempo. Este comportamento na fase inicial do processo de carga é explicado pelo fato que neste estágio a parcela de material fundido é pequena e a soma do calor sensível e latente é pequena comparada com o calor latente total do sistema usado na adimensionalização da expressão do calor armazenado.

Outro fato que pode-se constatar é que o calor armazenado, até que se atinja a fusão completa, é maior que a unidade, evidenciando com isso que uma parcela considerável de calor é absorvido na forma de calor sensível. Esta parcela é tanto maior quanto menor a temperatura inicial do M.M.F..

V.3.3 - ENSAIO.3

O ENSAIO.3 é realizado para se observar a influência do número de Biot no processo de fusão do M.M.F.. Este número está relacionado com a intensidade de resfriamento nas faces não aquecidas do armazenador.

A Figura 18, a seguir, mostra as curvas de fração de massa fundida com o tempo para os diversos números de Biot utilizados.

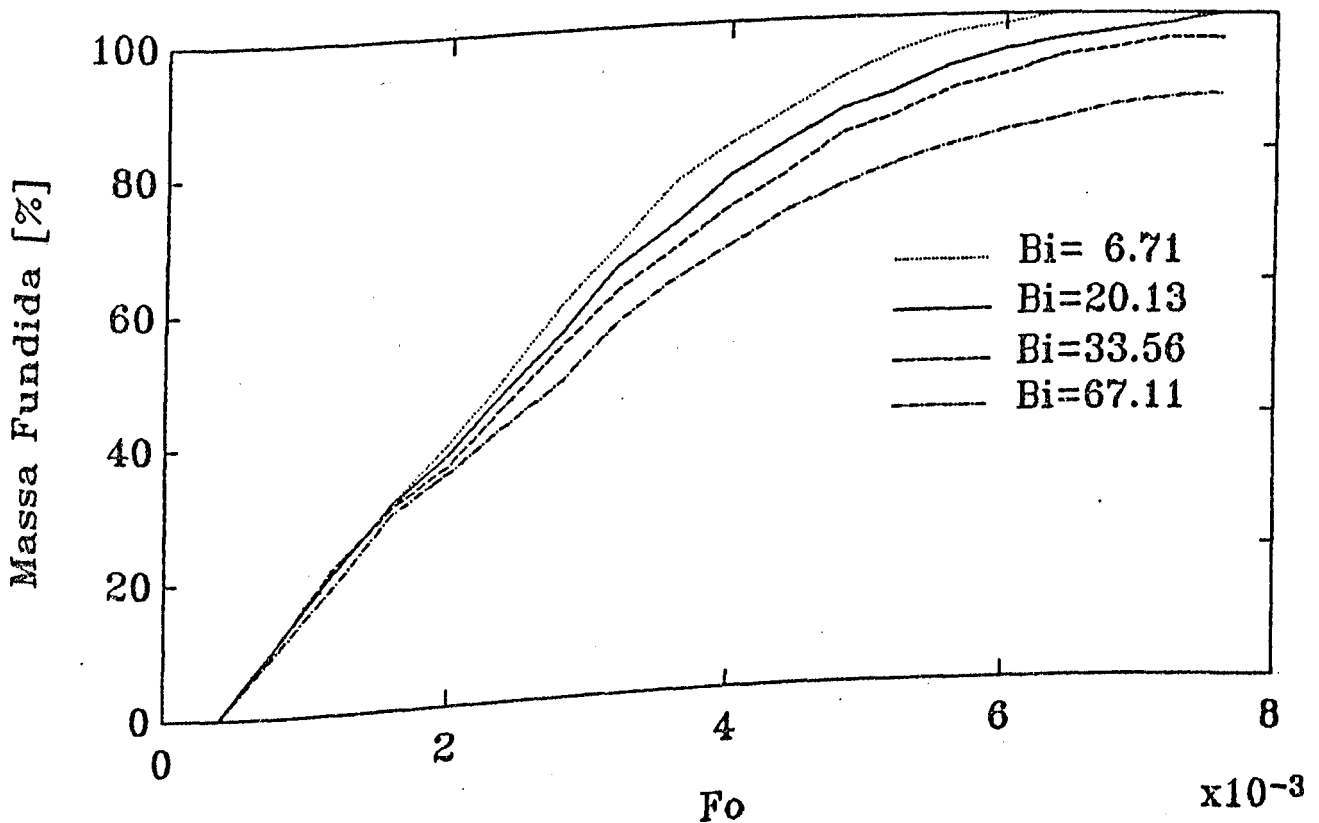


Figura 18. Fração de massa fundida x Fourier - ENSAIO.3

Já as Figuras 19, 20 e 21 mostram em sequência a posição das frentes de fusão, o campo de temperaturas na parede do M.M.F. e o calor armazenado adimensional com o tempo.

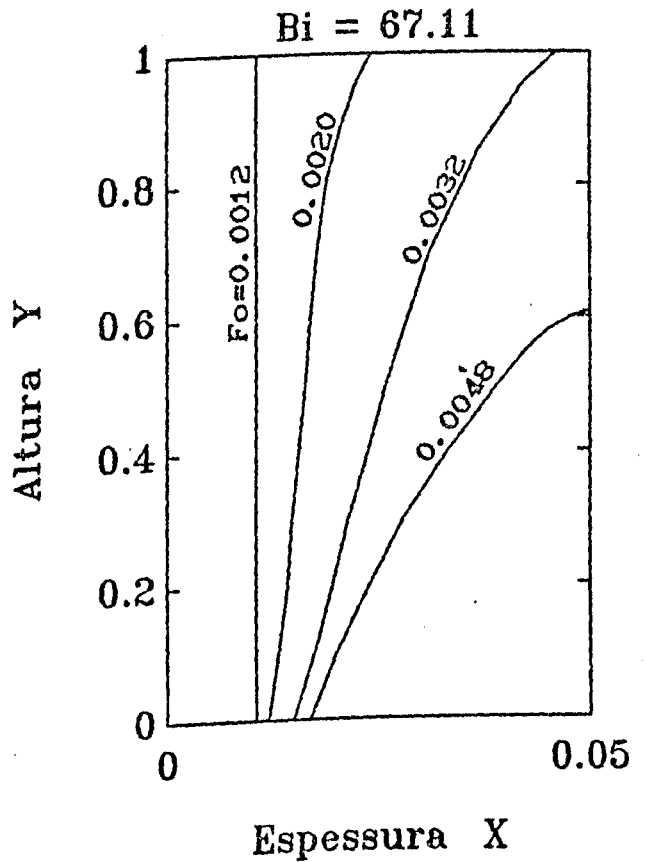
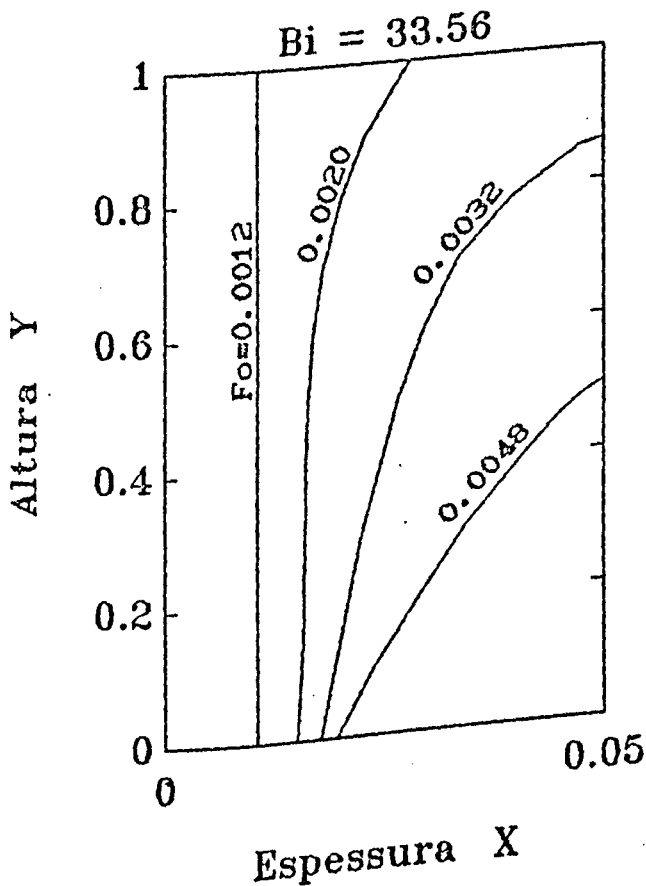
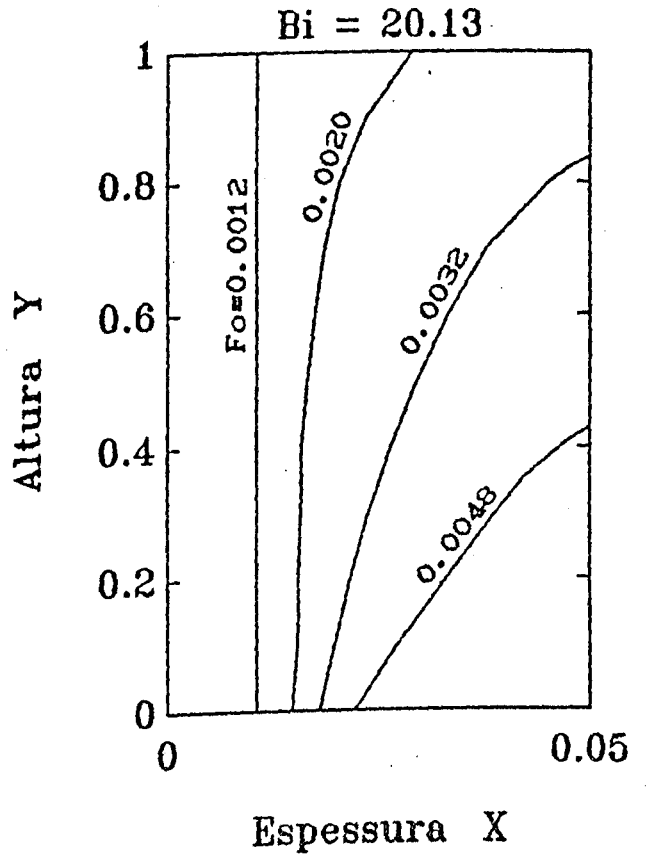
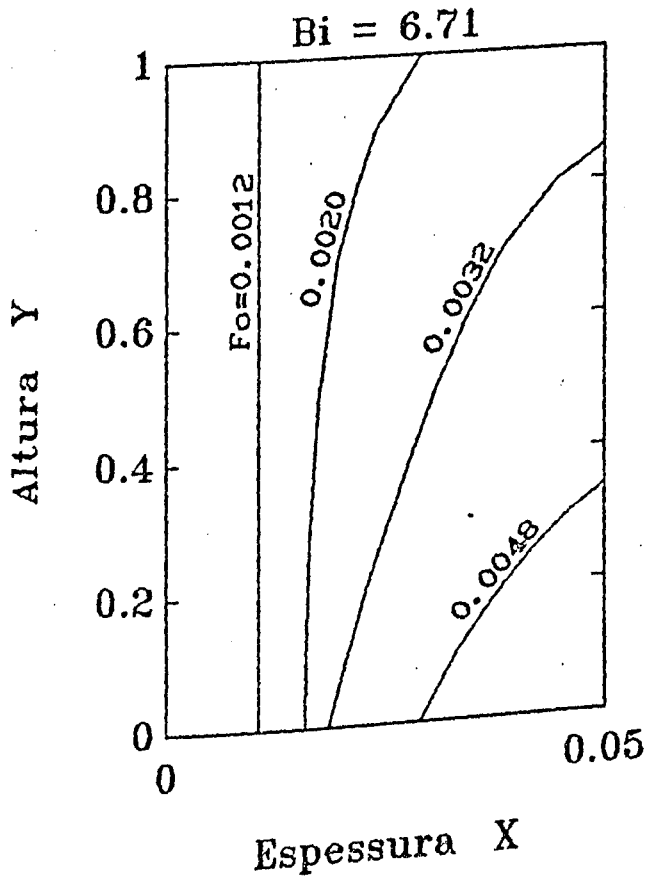


Figura 19. Frentes de fusão x Fourier - ENSAIO.3

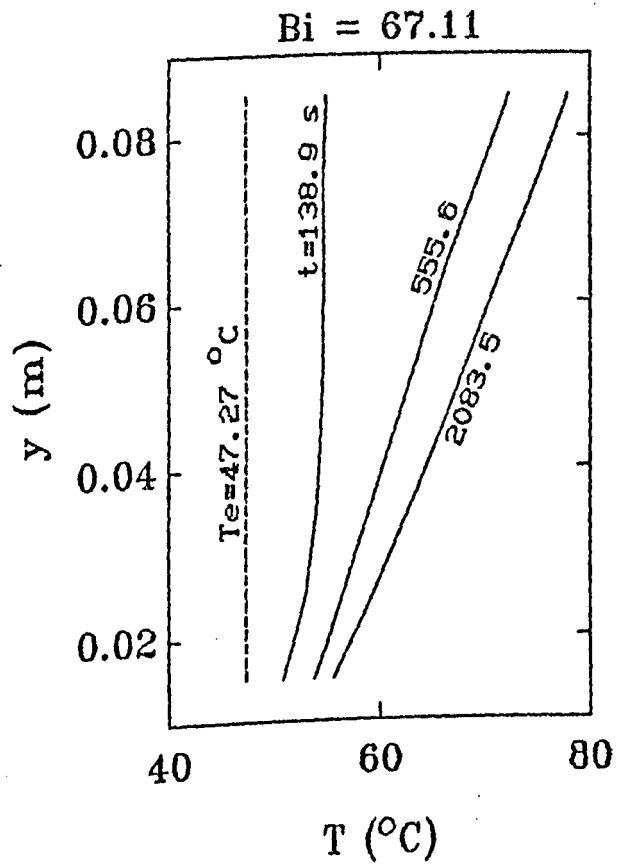
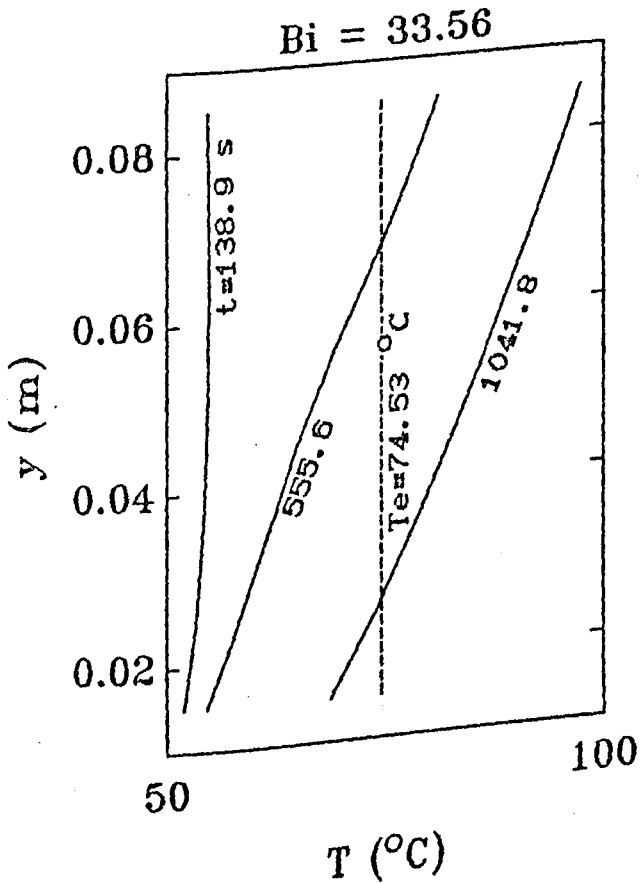
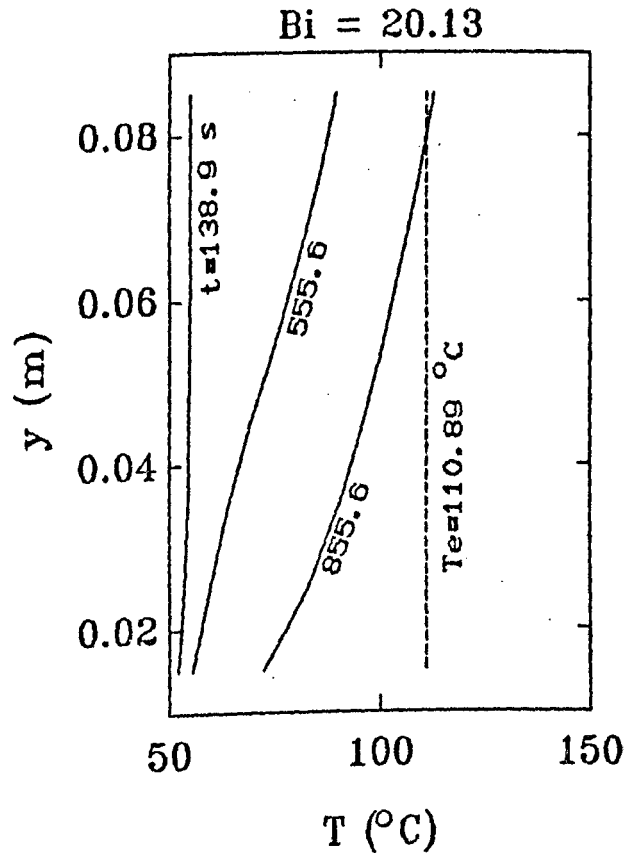
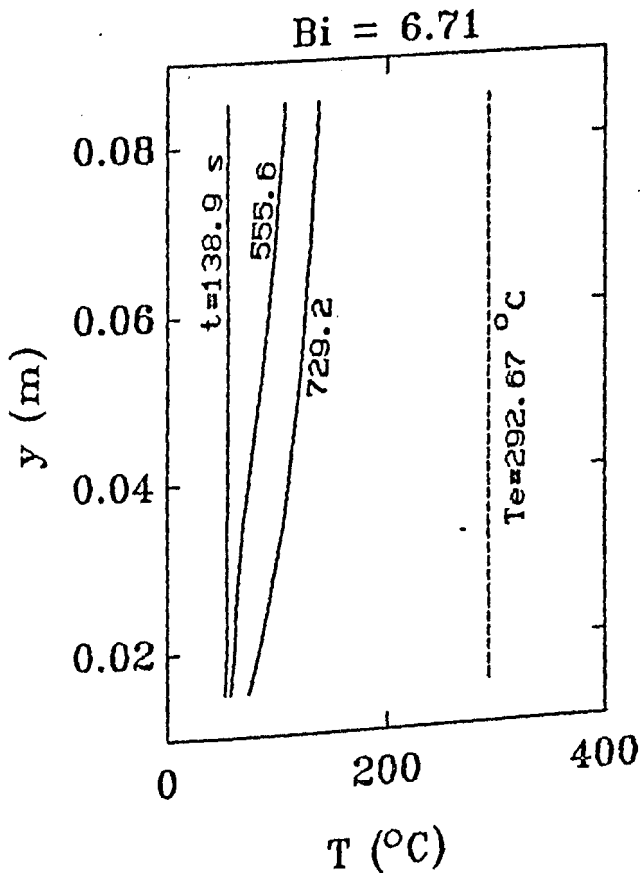


Figura 20. Temperatura na parede x Tempo - ENSAIO.3

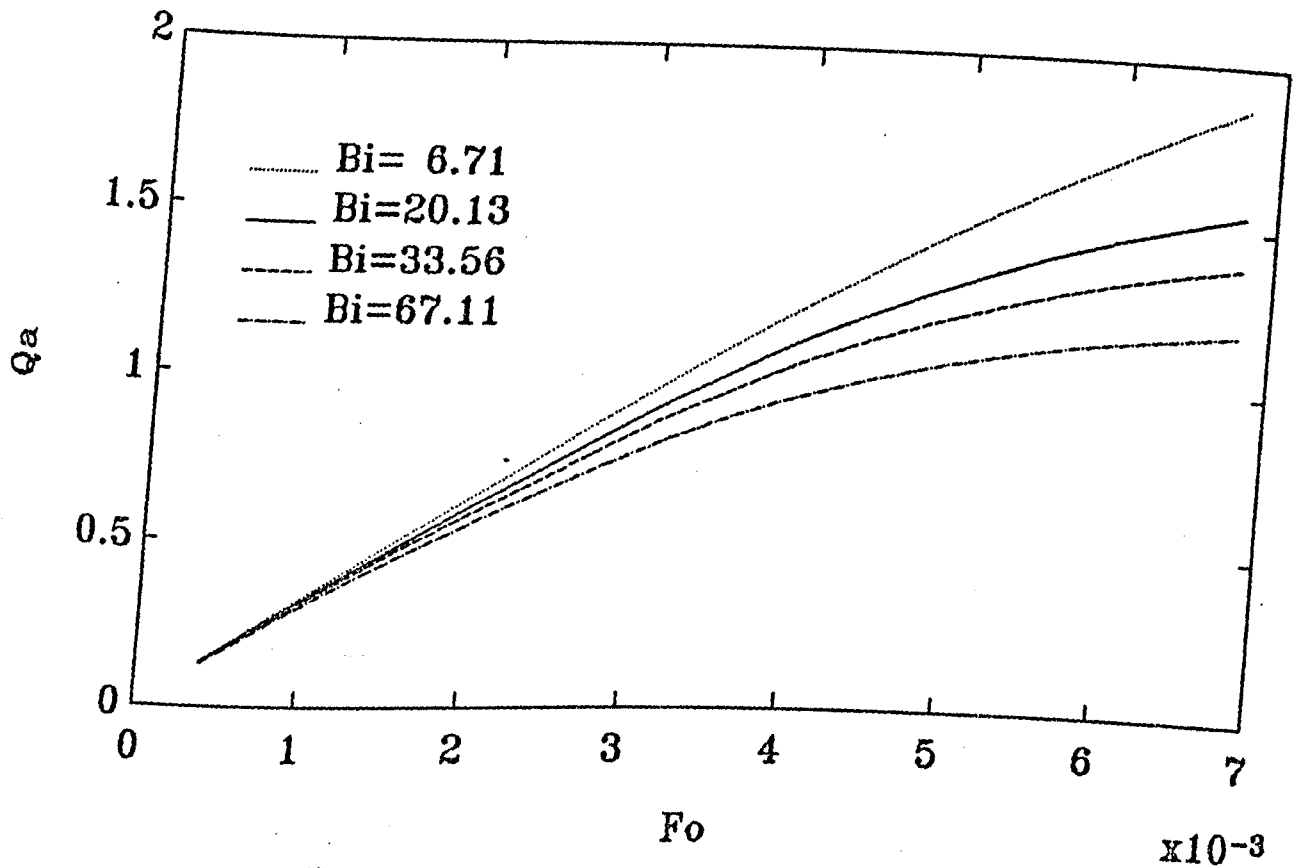


Figura 21. Calor armazenado adimensional x Fourier - ENSAIO.3

Com relação a este ensaio pode-se fazer as seguintes observações :

a) Analizando-se a Figura 18, que mostra o comportamento das curvas de fração de massa fundida com o tempo, para diferentes valores do número de Biot, observa-se que no início do processo de carga, as curvas são muito próximas umas das outras e se distanciam à medida que decorre o tempo. Como dito anteriormente, no início do processo, a transferência de calor é basicamente por condução e, a medida que vai ocorrendo a fusão, os efeitos de convecção térmica passam também a ser

importantes, influenciando na velocidade de fusão do material. A variação do número de Biot afeta todo esse processo de transferência de calor, atuando diretamente nesta velocidade. Quanto maior esse número, maior é a perda de energia pelas fronteiras do sistema e, com isso, menor a temperatura do material. Quanto menor a temperatura, menor é o incremento na taxa de fração de massa fundida e, portanto, menor a velocidade de fusão e maior o tempo requerido para que ela se complete.

b) Observando-se a Figura 19, pode-se ver o desenvolvimento das frentes de fusão com o tempo, para o caso aqui estudado, e constatar o fato mencionado no item a, com respeito à velocidade de avanço do processo de fusão do material. Quanto maior o número de Biot, maior é o efeito de refrigeração no M.M.F. e, conseqüentemente, mais lento é o avanço da frente.

c) Com relação à Figura 20, que dá o comportamento do campo de temperaturas na parede, para os tempos considerados, sendo a curva com  $t$  mais elevado correspondente à situação onde o material acaba de fundir totalmente, pode-se constatar o fato de diminuição desse campo em maiores números de Biot. Adicionalmente pode-se verificar que à medida que cresce o número de Biot, o campo de temperaturas vai se tornando mais elevado que aquele campo teórico que seria obtido na superfície do meio a ser refrigerado se não houvesse o material de mudança de fase. Este campo teórico é dado pela curva pontilhada na seqüência da Figura 20. Com isso pode-se afirmar que para Biot muito elevados o controle térmico pode ser, teoricamente, mais eficiente se a refrigeração for feita diretamente na superfície



do componente que necessita ser refrigerado, dispensando a utilização de material de mudança de fase.

d) Observando-se a Figura 21, que mostra a quantidade de calor armazenada com o número de Fourier, para os números de Biot considerados, ve-se que esta quantidade diminui com o tempo tanto quanto maior é o número de Biot. Isto é esperado, pois um maior Biot implica em uma quantidade maior de energia perdida pelas fronteiras do sistema. Como a quantidade de energia fornecida ao M.M.F., em cada instante, deve ser igual à soma das quantidades armazenada e perdida, deve-se obter uma menor quantidade armazenada conforme aumentam as perdas de energia pelas fronteiras.

Pode-se observar ainda que a distorção nas curvas diminui em menores números de Biot, apresentando um comportamento cada vez mais linear conforme simula-se a condição de isolamento perfeito. Se nenhuma energia é perdida pelas fronteiras, é evidente que toda quantidade fornecida ao sistema é armazenada, daí o comportamento linear nestas condições.

V.3.4 - ENSAIO.4

O ENSAIO.4 é realizado para se verificar o comportamento do M.M.F., quando sujeito a diferentes densidades de fluxo de calor.

A Figura 22 mostra o comportamento das curvas de fração de massa fundida com o tempo, para este ensaio.

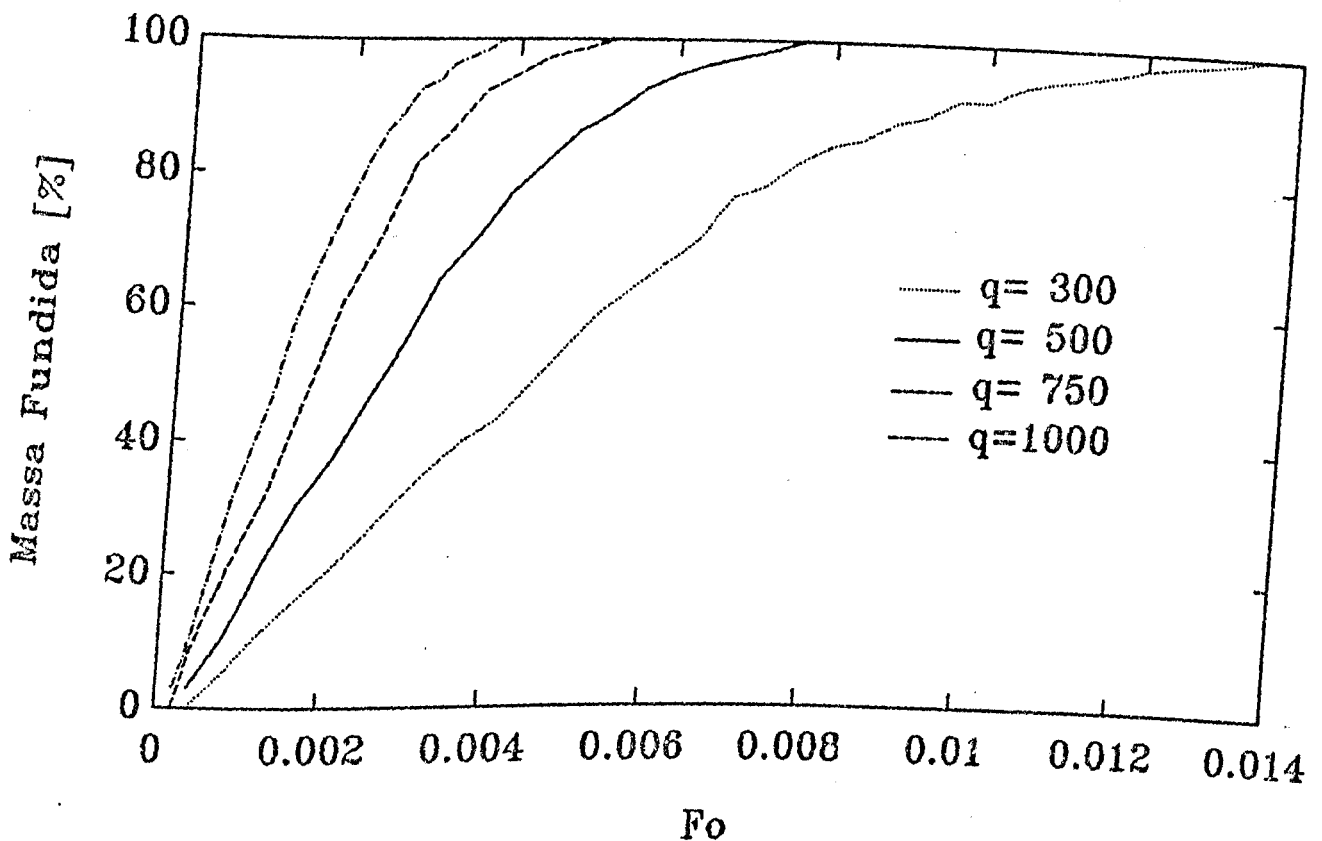


Figura 22. Fração de massa fundida x Fourier - ENSAIO.4

Tal como feito para os outros ensaios, mostram-se nas Figuras 23, 24 e 25, respectivamente, as curvas para a posição da frente de fusão, para o campo de temperaturas na parede e para a quantidade de calor armazenado adimensional.

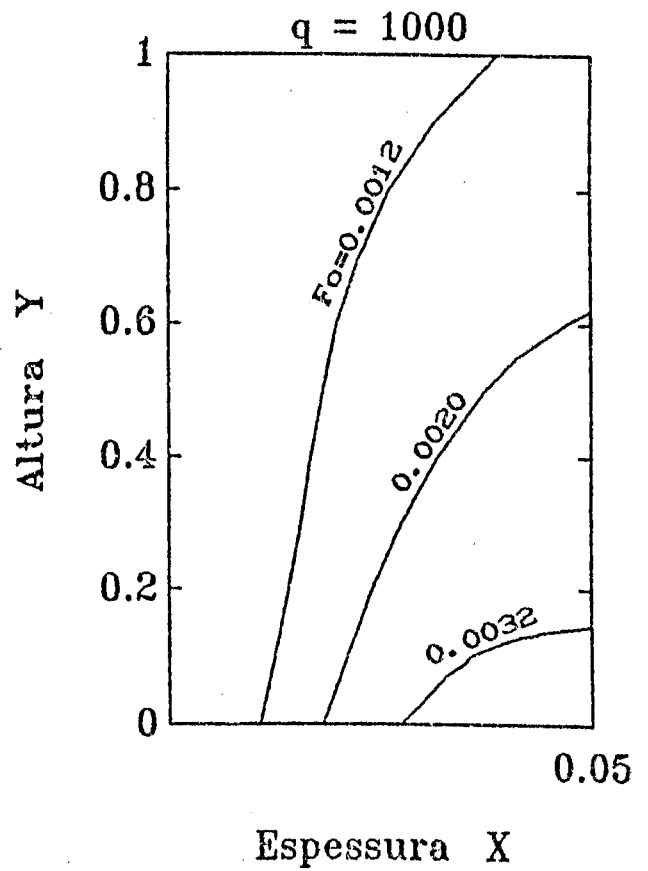
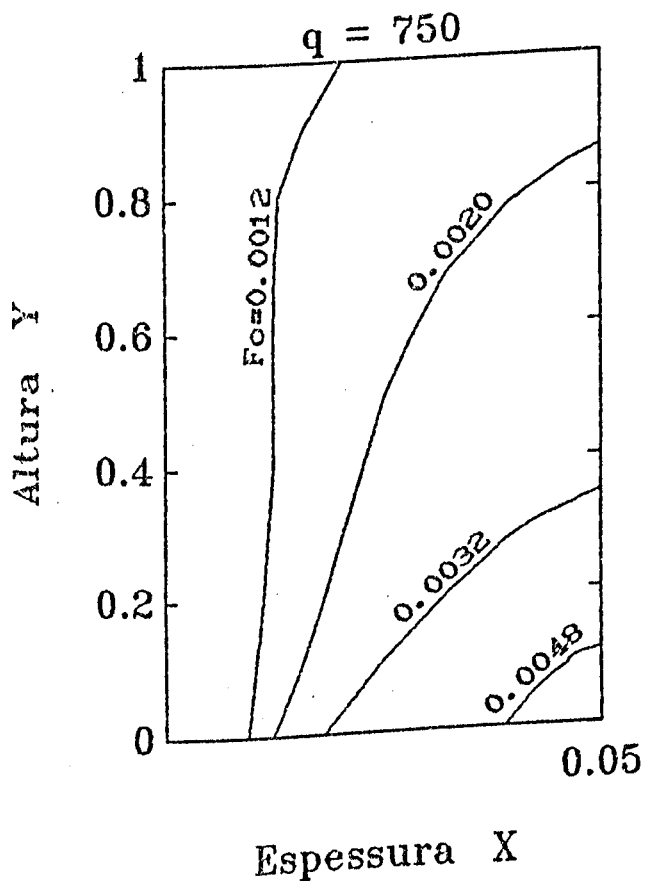
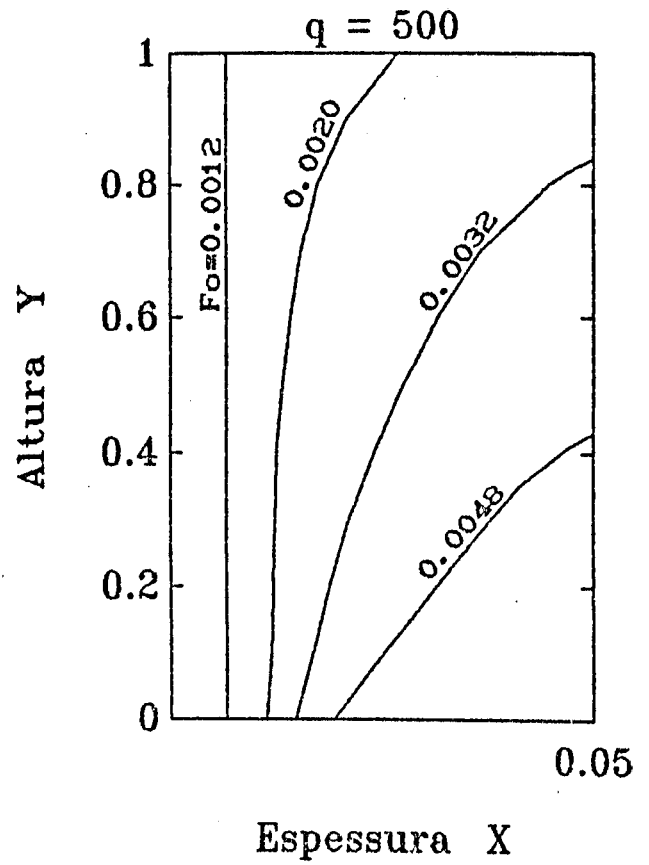
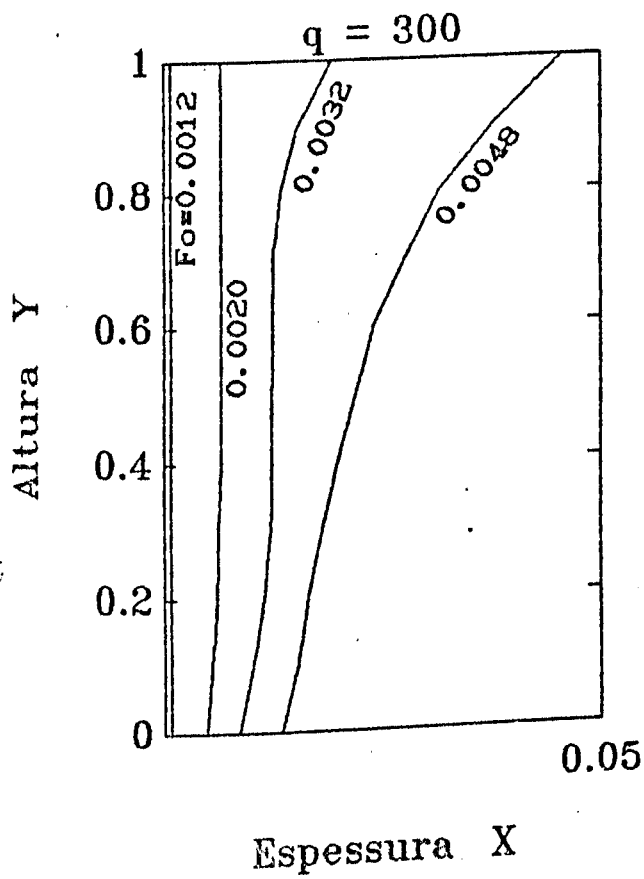


Figura 23. Frentes de fusão x Fourier - ENSAIO.4

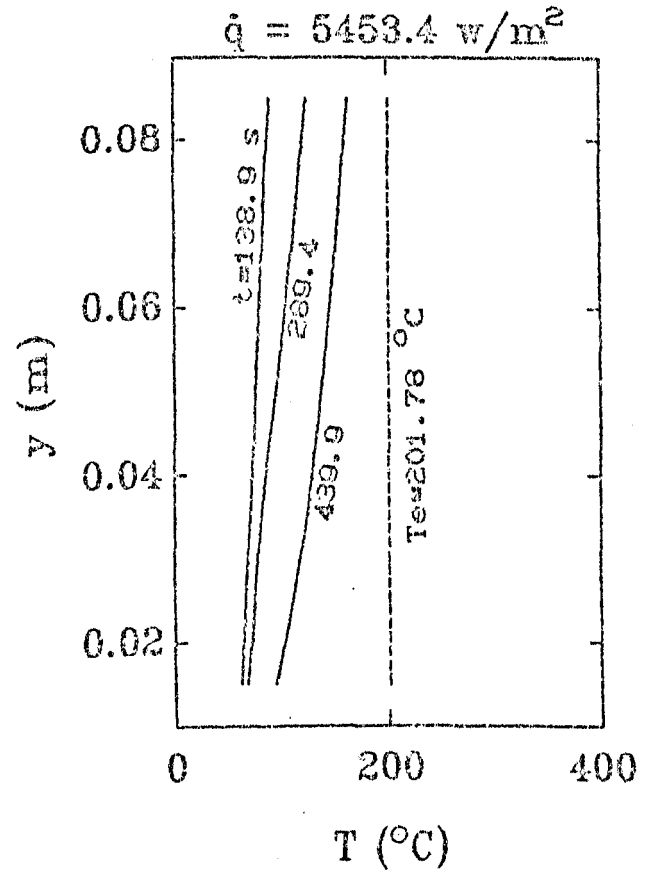
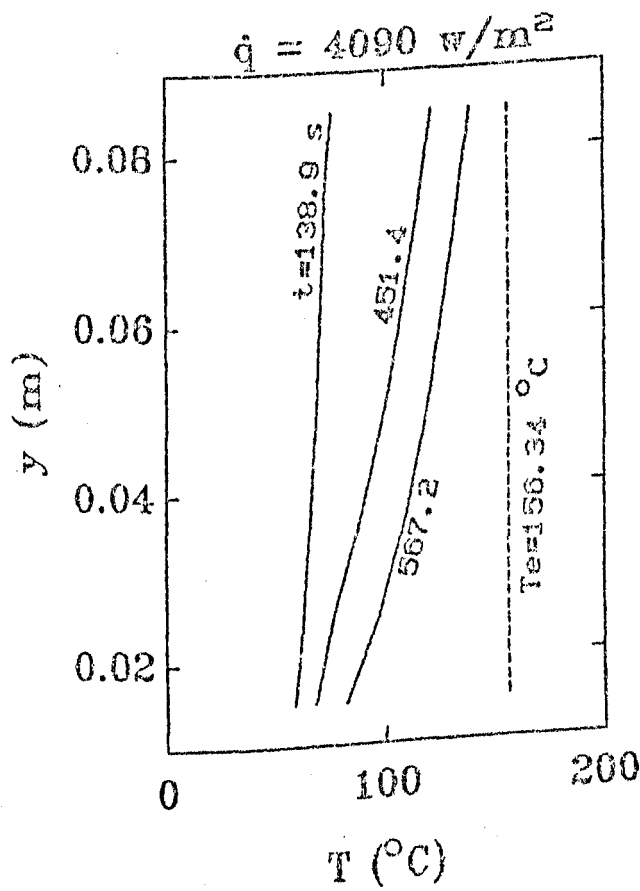
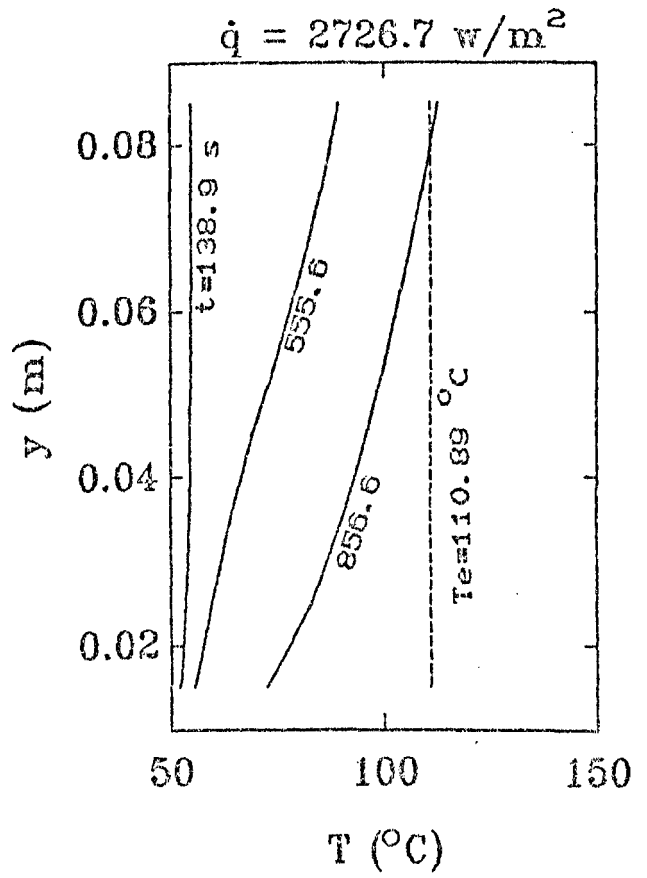
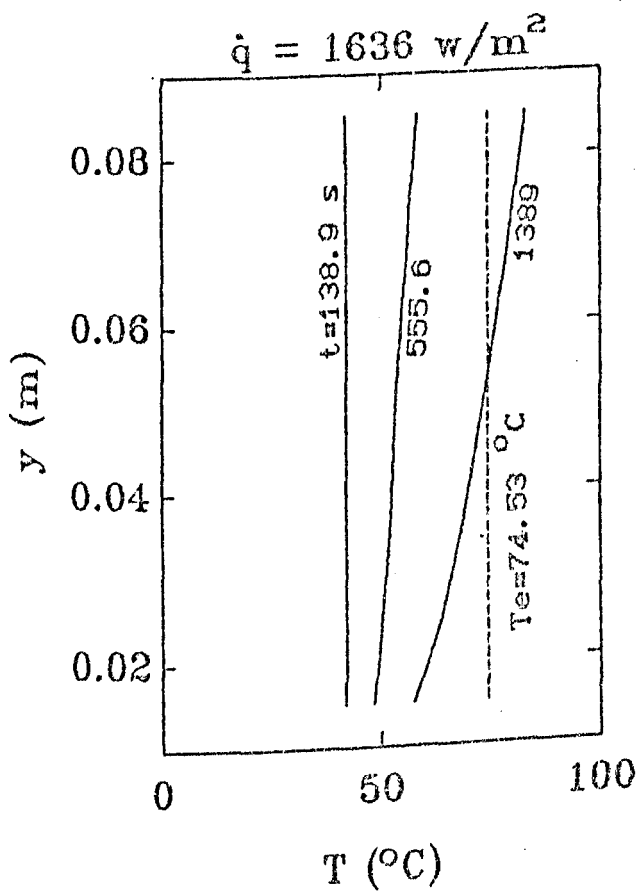


Figura 24. Temperatura na parede x Tempo - ENSAIO.4

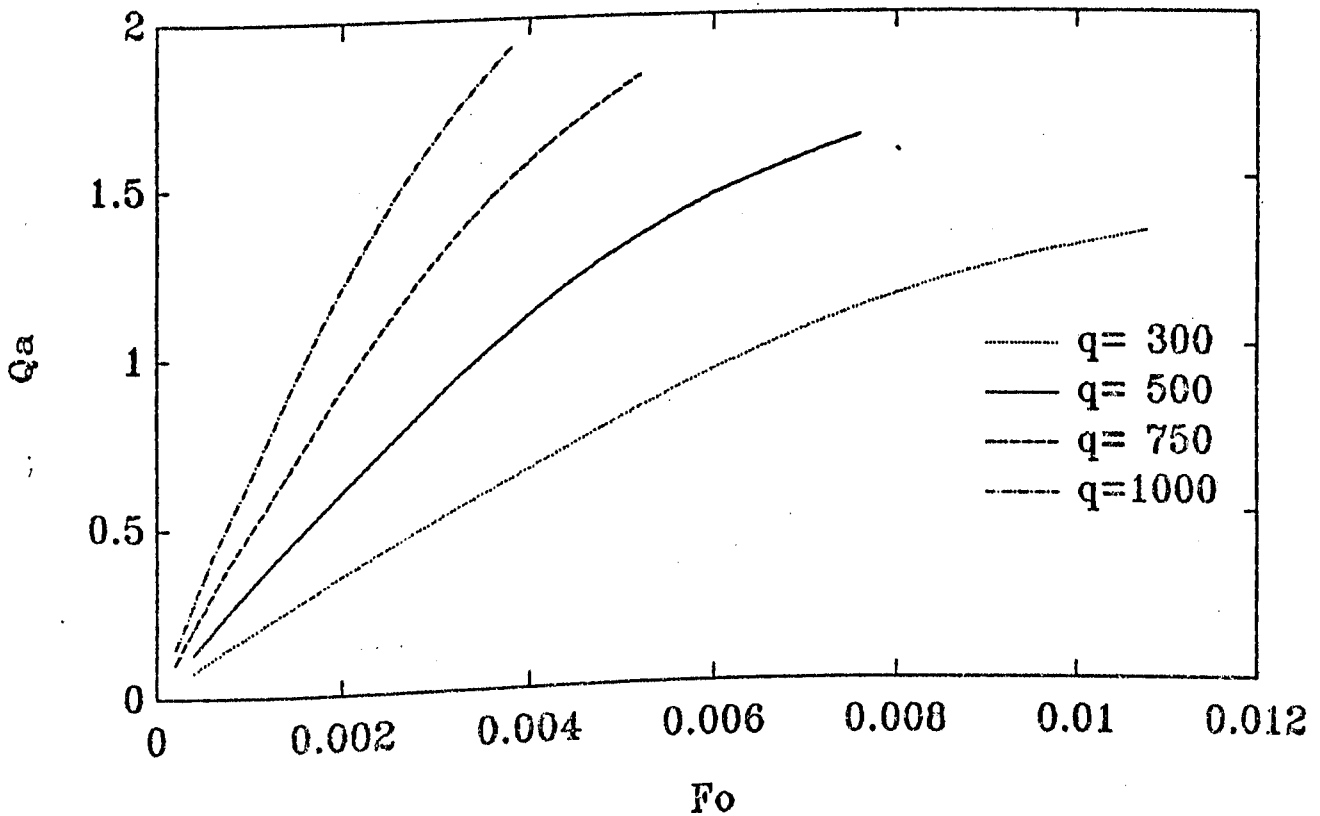


Figura 25. Calor armazenado adimensional x Fourier - ENSAIO.4

Com relação a este ensaio pode-se fazer as seguintes observações :

a) Observa-se na Figura 22 que quanto maior a densidade de fluxo de calor, menor é o tempo para o material fundir completamente. À medida que aumenta-se o fluxo de calor, aumenta-se o incremento da parcela fundida e com isso a fusão se completa mais rapidamente. Isto pode ser visto facilmente analisando-se as curvas da Figura 23, que mostram o comportamento das frentes de fusão para diferentes fluxos de calor. Observa-se que, para um mesmo tempo, a frente é mais

avançada quanto maior é o fluxo, sendo que para  $q=1000$  no tempo  $F_0=0.0048$ , o material se encontra totalmente fundido, inexistindo, por isso, a curva para esse tempo em questão.

Pode-se ver ainda que as curvas são distorcidas na parte superior e que, para menores fluxos, surgem também distorções na parte inferior do armazenador. As distorções em cima se devem ao fato do acúmulo de material líquido mais quente nesta região, devido aos efeitos de convecção natural. Na parte inferior do M.M.F., a distorção se deve ao efeito de refrigeração que é imposto externamente através das perdas por convecção forçada.

b) As temperaturas na parede são esperadas ser maiores em maiores densidades de fluxo de calor, e isso é o que se observa quando se analisa a Figura 24.

Pode-se observar ainda que para maiores fluxos de calor, essas temperaturas são menores que aquela que seriam obtidas na parede se não houvesse o material de mudança de fase. Isto é explicado pelo fato que como o calor fornecido é muito elevado, o material funde-se mais rápido não havendo tempo para que haja um aumento demasiado de temperatura pela absorção de calor sensível na parcela líquida.

c) Com relação às curvas para a quantidade de calor armazenada, dadas na Figura 25, observa-se para um mesmo tempo, que quanto maior o fluxo de calor maior a quantidade armazenada. Outro aspecto interessante, que pode ser visto analisando-se em conjunto as Figuras 22 e 25, é a grande quantidade de calor armazenado em maiores fluxos de calor, até a fusão completa do material. É sabido que a parafina, que é usada aqui como M.M.F.,

tem baixa condutividade térmica e, desta maneira, atua como um inibidor à transferência de calor. Isto faz com que o processo de fusão seja lento, acarretando um grande ganho de calor sensível na parcela já fundida. O ideal, como dito anteriormente, é que se eliminasse essa parcela fundida e a substituísse por material sólido. Isto evitaria o problema de acúmulo de calor sensível, que eleva a temperatura a patamares indesejáveis.

### V.3.5 - ENSAIO.5

O ENSAIO.5 é realizado para se analisar como se comporta o M.M.F. quando se varia a espessura da placa.

Para este ensaio limitou-se a traçar as curvas de fração de massa fundida com o tempo, em gramas, e as curvas da temperatura na parede até fusão completa. Curvas como a quantidade de calor armazenado e posição das frentes de fusão não teriam sentido se fossem traçadas sobrepostas, uma vez que as dimensões do armazenador são variáveis e o processo de adimensionalização é feito em função destas dimensões. Consequentemente, isso tornaria a análise sem sentido.

A Figura 26, a seguir, mostra a quantidade de massa fundida com o tempo para as diferentes dimensões tomadas para a espessura da placa.

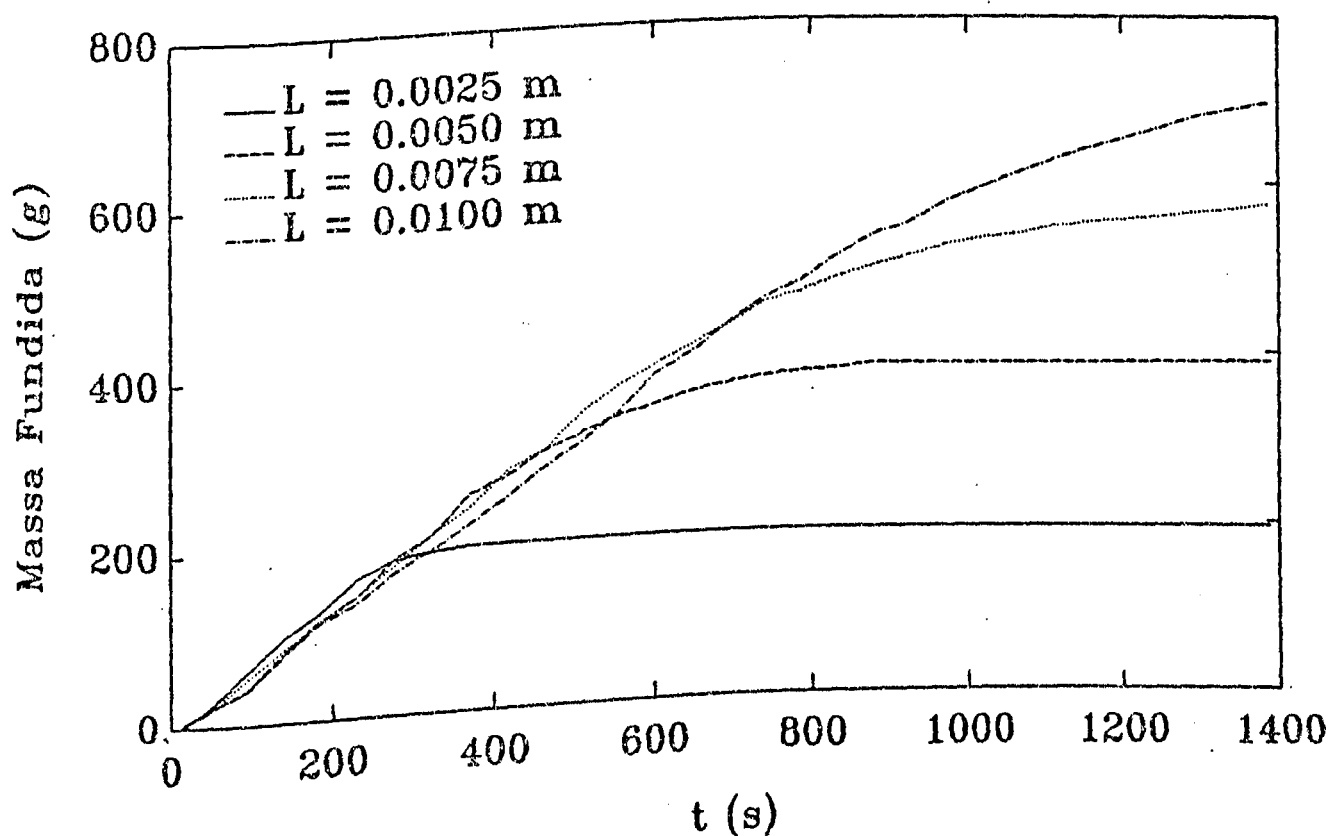


Figura 26. Massa fundida x tempo - ENSAIO.5



A Figura 27 mostra o comportamento do campo de temperaturas com o tempo.

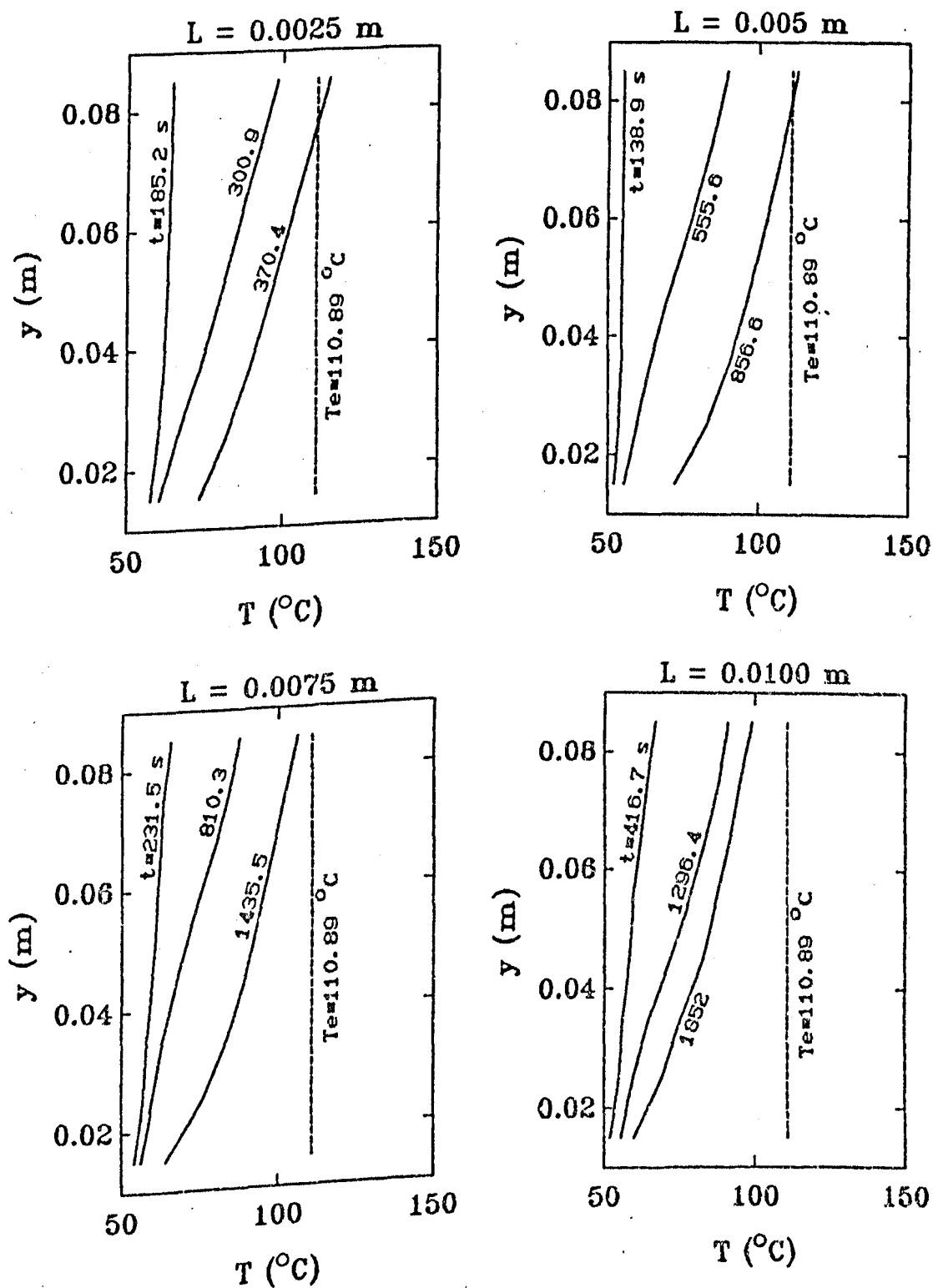


Figura 27. Temperatura na parede x Tempo - ENSAIO.5

Analisando a Figura 26, ve-se que, no início do processo de carga, a massa fundida cresce quase que linearmente com o tempo, para as quatro diferentes espessuras da placa. À medida que decorre o tempo, vão aumentando os efeitos de refrigeração externa, e há um decaimento na taxa de crescimento da quantidade fundida.

Como esperado, quanto menor a espessura da placa, mais rápido ocorre a fusão total do material, fato este representado pela parte horizontal das curvas para  $L = 0.0025$  m e  $L = 0.005$  m. Para as placas com  $L = 0.0075$  m e  $L = 0.01$  m, a fusão total ocorre nos tempos de  $t = 1435.5$  s e  $t = 1852$ s, respectivamente, como pode ser visto na Figura 27.

Com relação à Figura 27, que dá o campo de temperaturas na parede, para os tempos mostrados, observa-se que há uma diminuição nesse campo conforme é aumentada a espessura da placa de material de mudança de fase. Pode-se afirmar que, à medida que aumenta-se a espessura da placa, aumenta-se a massa do armazenador e, conseqüentemente, uma maior quantidade de calor latente pode ser absorvida, reduzindo com isso a temperatura. Dessa maneira, a refrigeração no componente também é influenciada quando a espessura é maior, pois um menor campo de temperaturas é obtido.

V.3.6 - ENSAIO.6

Finalizando a série de ensaios, o ENSAIO.6 é realizado para se verificar como se comporta o M.M.F. quando sujeito a densidades de fluxo de calor aplicadas de maneira intermitente ou cíclica. Para um ciclo completo, que corresponde ao tempo em que o fluxo está aplicado mais o tempo em que o fluxo é zero, observa-se o comportamento do material de mudança de fase com relação à fração de massa fundida, calor armazenado e o campo de temperaturas na parede.

Deve-se ressaltar aqui alguns fatores necessários à boa compreensão deste ensaio :

1) Os tempos que dizem respeito a um ciclo completo são iguais, ou seja, o tempo de duração de aplicação do fluxo de calor é idêntico àquele em que não há fluxo atuante ;

2) As curvas para a frentes de fusão foram omitidas devido à dificuldade de traçá-las nestas condições ;

3) Diferentemente do que foi feito para os outros ensaios anteriores, mostra-se a evolução da temperatura de três pontos da parede da placa de material de mudança de fase com o tempo. Os pontos escolhidos situam-se em  $y=0.025m$ ,  $y=0.045m$  e  $y=0.065m$ .

A Figura 28, a seguir, mostra o comportamento das curvas de fração de massa fundida para os quatro ciclos de tempo estudados. Na sequência são mostradas nas Figuras 29 e 30, respectivamente, as curvas de calor armazenado e da temperatura na parede para os ciclos em questão.

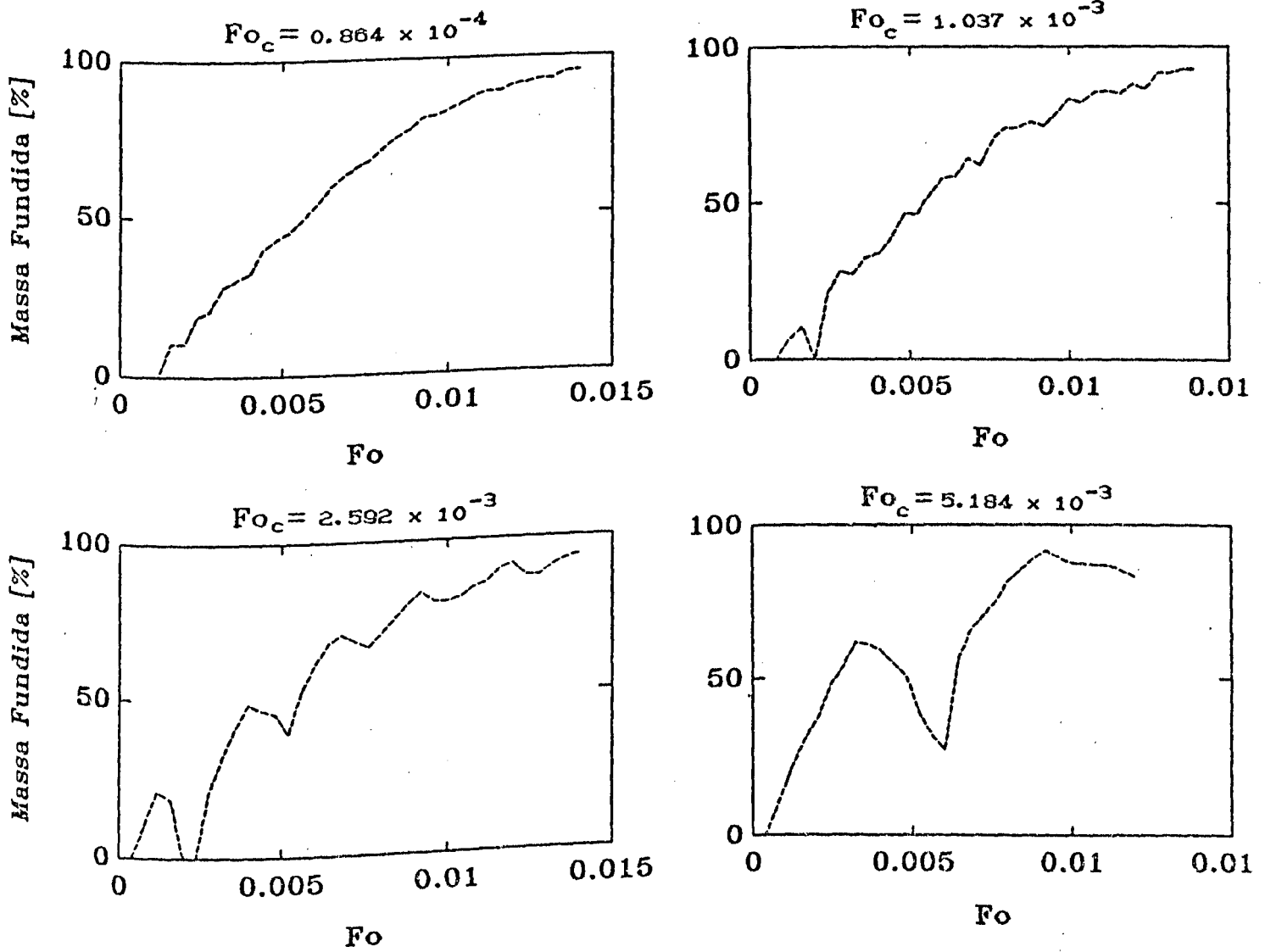


Figura 28. Fração de massa fundida x Fourier - ENSAIO.6

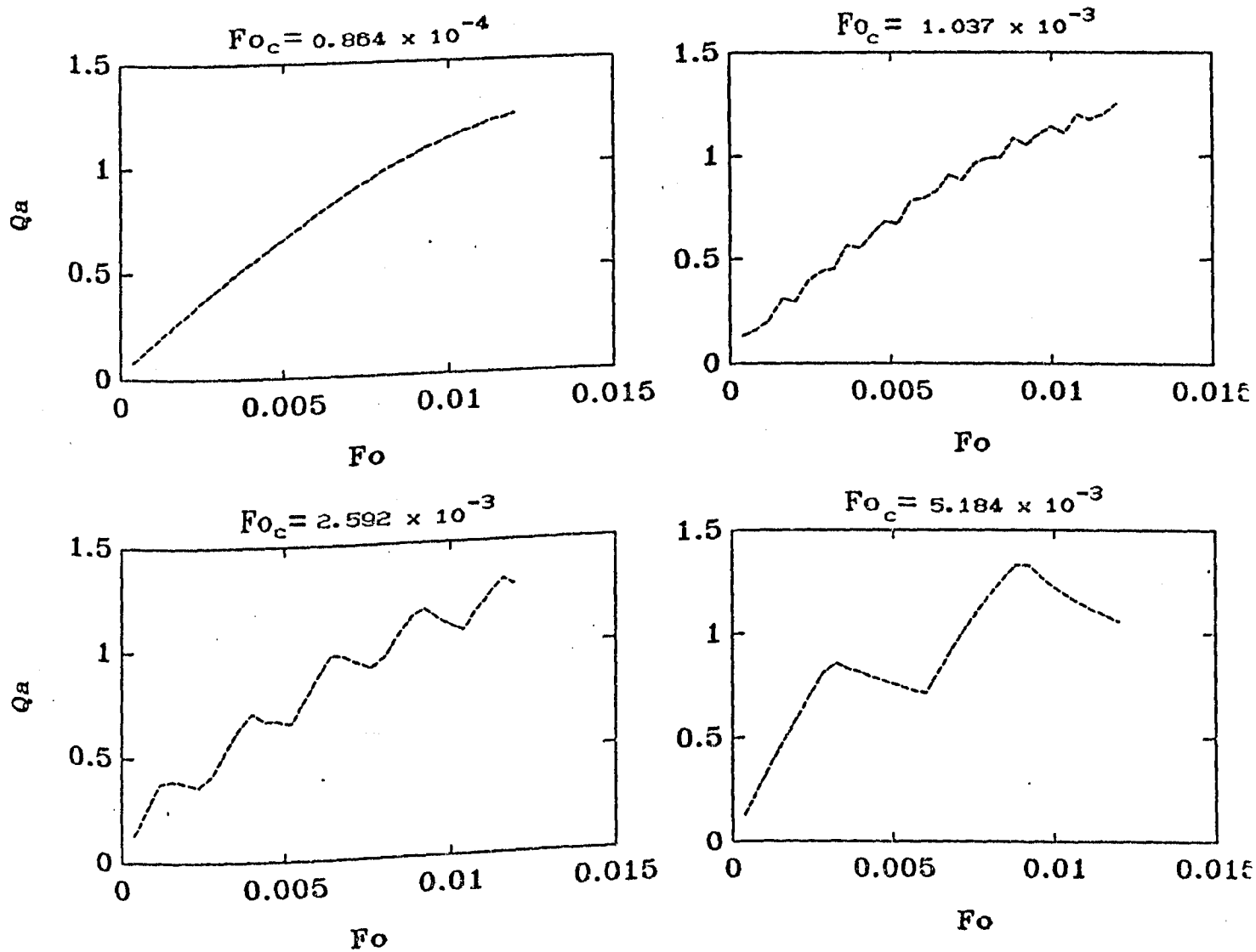


Figura 29. Calor armazenado adimensional x Fourier - ENSAIO.6

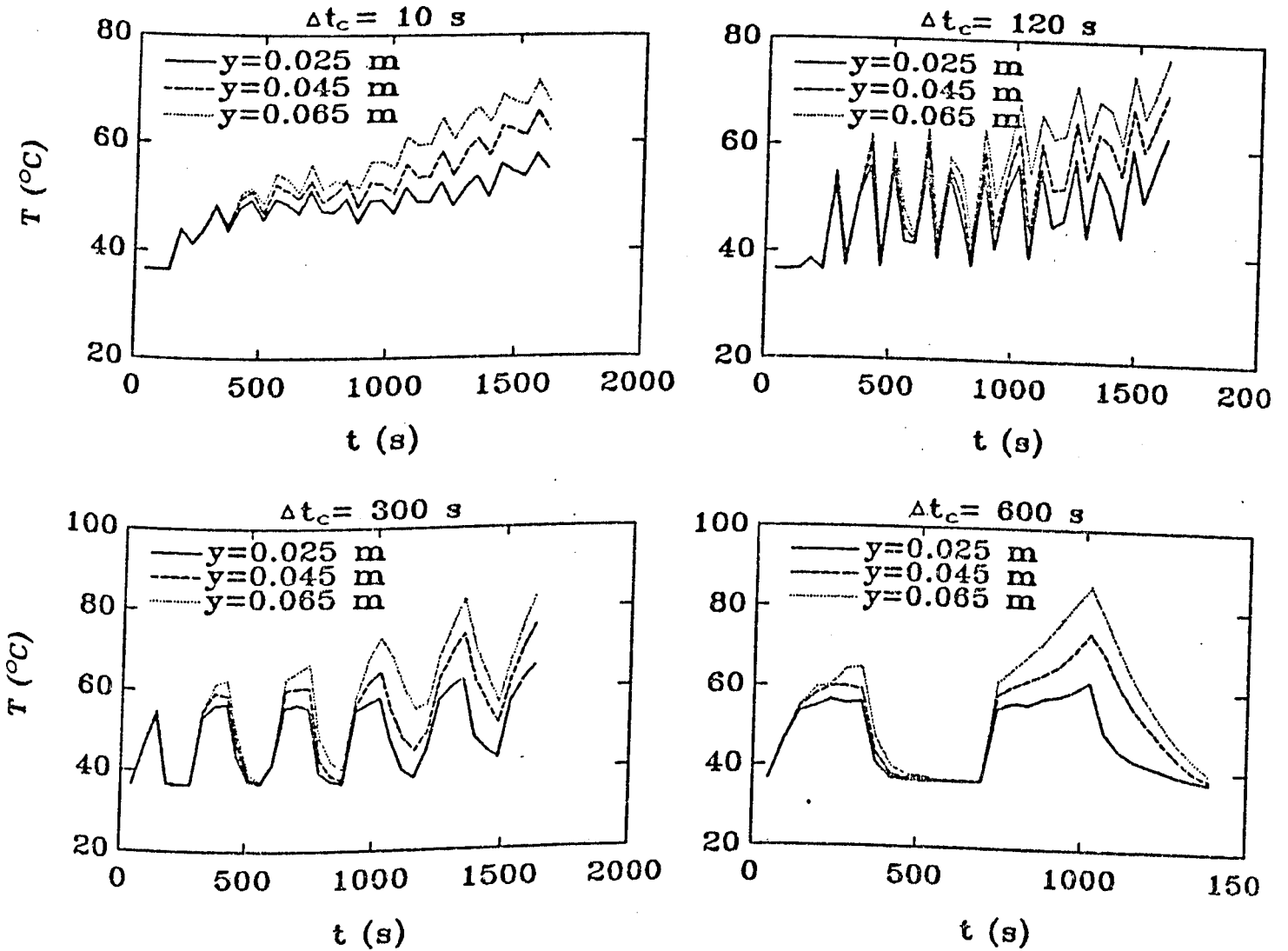


Figura 30. Temperatura dos pontos escolhidos x Tempo

ENSAIO.6

Com relação a este ensaio pode-se fazer as seguintes observações :

a) Para as curvas de fração de massa fundida e do calor armazenado com o tempo, pode-se observar o comportamento cíclico com que é realizada a fusão do material. Pode-se constatar que para os ciclos com menores períodos de tempo, as oscilações são menos acentuadas e que a amplitude dessas oscilações diminui a medida que o material vai fundindo. Este comportamento pode ser explicado pelo fato que, no início do processo, quando o fluxo de calor é aplicado, ou seja, quando o componente é ligado, o material absorve uma parcela de energia na forma de calor sensível e uma outra parcela na forma de calor latente pela fusão de parte do material. Assim que o fluxo deixa de atuar, ou seja, assim que o componente é desligado, parte dessa energia é perdida pelas fronteiras por convecção, fazendo com que uma parcela do material fundido solidifique. Pode-se ver que para as curvas com  $Fo_c = 1.037 \cdot 10^{-3}$  e  $Fo_c = 2.592 \cdot 10^{-3}$  essa solidificação inicial é total.

Com o decorrer do processo de carga e descarga, a quantidade de calor armazenada, que é uma função crescente, vai diminuindo sua taxa de crescimento devido ao aumento da quantidade de energia perdida pelas fronteiras do sistema fazendo com que haja uma maior resistência à fusão do material. Adicionalmente, como há uma grande parcela de energia armazenada sob a forma de calor latente, a intensidade com que ocorre a solidificação vai diminuindo, pois há uma maior disponibilidade de calor que pode ser perdida até que se inicie esse processo de solidificação.

b) As curvas que fornecem a evolução da temperatura com o tempo, para os três pontos escolhidos, mostram também o comportamento cíclico do processo de carga e descarga a que é submetido o material de mudança de fase. Inicialmente as três curvas estão superpostas e, a medida que decorre o tempo, estas curvas vão distanciando-se umas das outras devido ao processo de convecção natural que faz com que o fluido com maior temperatura se aloje na parte superior do armazenador.

Pode-se constatar ainda um aumento na amplitude das oscilações conforme aumenta-se o período de tempo de carga e descarga. Ve-se também que para  $\Delta t_c = 10$  s e  $\Delta t_c = 120$  s, no início do processo, a temperatura permanece constante, indicando que o material absorve o calor fornecido na forma de calor latente.

Outro fato que pode ser observado é que, nos processos de descarga, a temperatura final é sempre maior ou igual à temperatura de mudança de fase. Isto indica que o material possui uma parcela de calor latente armazenada que é maior que a parcela de calor que é retirada por convecção, mantendo assim a temperatura nos níveis citados.



## VI - CONCLUSÕES

Como citado no início deste trabalho, o principal objetivo a ser alcançado era a confecção de um código computacional que permitisse simular o comportamento de um dispositivo de mudança de fase quando sujeito às condições de contorno do tipo fluxo de calor imposto e perdas de calor por convecção. Pode-se dizer que este objetivo foi atingido.

A utilização deste código, com a finalidade de testar os resultados obtidos por ele, aplicados às aquelas situações com soluções conhecidas na literatura como o caso de condução pura e os resultados numéricos obtidos por Rego [31], permite-nos concluir que o mesmo pode simular satisfatoriamente o comportamento desses dispositivos de controle térmico e armazenamento de energia.

Os resultados obtidos, através de simulações numéricas, apresentaram consistência física e pode-se afirmar que outras situações possam ser estudadas com boa confiabilidade. Especificamente com relação à densidade de fluxo de calor fornecida ao M.M.F., pode-se esperar que o modelo computacional forneça bons resultados para outros tipos de excitação que aquelas estudadas neste trabalho.

A comparação entre o campo de temperaturas na parede do armazenador, obtido utilizando-se o material de mudança de fase associado aos processos convencionais de refrigeração por convecção, e aquele campo obtido se não se utilizasse o M.M.F., leva-nos à conclusão que, como esperado, enquanto o material não funde totalmente, o processo de arrefecimento é mais eficaz para o primeiro caso. Isto só não é verificado para aquelas situações em que o material é sujeito a altos graus de

refrigeração, expressos através de um número de Biot elevado. Neste caso é, teoricamente, mais eficiente fazer a refrigeração do componente diretamente em sua superfície.

Os resultados para o campo de temperaturas na parede, para todos os ensaios realizados, e o estudo do comportamento do armazenador para regimes em que o fluxo de calor é aplicado na forma de pulsos de energia, vem complementar o trabalho de outros autores e podem fornecer uma importante contribuição para o projeto desses dispositivos.

Devido ao bom comportamento dos resultados, podemos afirmar que a técnica dos volumes de controle finitos e o esquema "POWER LAW", utilizados neste trabalho, possam ser aplicados com sucesso em diferentes geometrias e para outras condições de contorno.

Também o modelo proposto por Bonacina para simular o efeito de calor latente de mudança de fase, aqui empregado, mostrou-se satisfatório e permite-nos afirmar que sua utilização possa ser adotada para outras configurações e condições de contorno.

Finalmente, acredita-se que o tempo de processamento do código, para os diversos casos estudados, possa ser reduzido através da investigação no programa da possibilidade de otimização dos procedimentos computacionais.

## VII - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] - ALVES, C.L.F., REGO, O.A.A., e TORO, P.G.P.; Estabilização de temperatura de dispositivos eletrônicos através do uso de calor latente. In: II CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR E MATÉRIA. Anais...;221-231; Vol.1; São Paulo; Brasil;1986.
- [2] - BART, G.C.J., HOOGENDOORN, C.J.; A heat transfer analysis of the solidification of a binary eutetic sistem; ASME Journal of Heat Transfer; 89 : 230-234; 1967.
- [3] - BATHELT, A.G., VISKANTA, R.; Generalize phase change model for melting and solidification with internal heat generation; Journal of Thermophysics; 1(2) : 171-174; 1989.
- [4] - BATHELT, A.G., VISKANTA, R., e LEIDENFROST, W.; An experimental investigation of natural convection in the melted region around a heated horizontal cylinder (Part 2);Journal of Fluid Mechanics; 90 :227-239; 1979.
- [5] - BATHELT, A.G., VISKANTA, R., e LEIDENFROST, W.; Latent heat-of-fusion energy storage : Experiments on heat transfer from cylinders during fusion; ASME Journal Heat Transfer; 101 : 453-458; 1979.
- [6] - BECKERMANN, C.,e VISKANTA, R.; Effect subcooling on natural convection melting of a pure metal; ASME Journal of Heat Hransfer; 111 : 416-424; 1989.
- [7] - BEJAN, A.; Theory of melting with natural convection in an enclosed porous medium; ASME Journal of Heat Transfer; 111 : 407-415; 1989.

- [8] - BELL, G.E.; A refinement of the heat balance integral method applied to a melting problem; International Journal of Heat Transfer; 21 : 1357-1362; 1978.
- [9] - BENARD, C., GOBIN, D., e ZANOLLI, A.; Moving boundary problem :Heat conduction in the solid phase of a phase-change material during melting driven by convection in the liquid; International Journal of Heat and Mass Transfer ; 1669-1681; 1986.
- [10] - BONACINA, C., COMINI, G., et al; Numerical solution of phase-change problems; International Journal of Heat and Mass Transfer; 16 : 1825-1832; 1973.
- [11] - BRASIL JR, A.C.P., MENDES, P.R.S.; Heat transfer during fusion in an vertical cylindrical geometry. In : VII COBEM. Anais...; 205-208 ; São José dos Campos ; S.P.; Brasil; 1985.
- [12] - CARLSSON, B., WETTERMARK, G.; Heat transfer properties of a heat-of-fusion store based on a  $\text{Ca} \cdot \text{Cl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  ; Energy Solar; 24 : 239-247; 1980.
- [13] - CHAN, S.H., HSU, K.Y.; Generalize phase change model for melting and solidification with internal heat generation; Journal of Thermophysics; 1(2) : 171-174 ; 1987.
- [14] - CHELLAIAH, S., VISKANTA, R.; Freezing of water-saturated porous media in the presence of natural convection : Experiments and analysis; ASME Journal of Heat Transfer, 111 : 425-432; 1989.
- [15] - CHO, S.H. et al; Heat-conduction problems with melting or freezing; ASME Journal of Heat Transfer; 91 : 421-426; 1969.

- [16] - CHUANG, Y.K., SZEKELY, J.; The use of Green's function for solving melting or solidification problems in the cylindrical coordinate system; International Journal of Heat and Mass Transfer; 15 : 1171-1174; 1972.
- [17] - HALE JR, N.W., VISKANTA, R.; Solid-liquid phase-change heat transfer and interface motion in materials cooled or heated from above or below; International Journal Heat and Mass Transfer; 23(3) : 283-292; 1980.
- [18] - HIJIKATA, K., HIMENO, N. et al; Latent heat thermal energy storage by using binary mixture; Proc. of the 8th INTERNATIONAL HEAT TRANSFER CONFERENCE; 1767-1772; vol.4; San Francisc; USA; 1986.
- [19] - HUMPHRIES, W.R., GRIGGS, E.I.; A Design Handbook For Phase Change Thermal Control and Energy storage Devices; NASA-TP-1074; (1977).
- [20] - ISMAIL, K.A.R., ALVES, C.L.F.; Phase change thermal energy storage in shell and circular-tube annulus configuration. Proc. of the 7th MIAMI INTERNATIONAL CONFERENCE OF ALTERNATIVE ENERGY SOURCES ; USA; 1985.
- [21] - ISMAIL, K.A.R., ALVES, C.L.F.; Analysis of shell-tube PCM storage sistem; Proc. of the 8th INTERNATIONAL HEAT TRANSFER CONFERENCE AND EXIBITION ; San Francisc; USA; 1986.
- [22] - KALHORI, B., RAMADHIANI, S.; Studies on heat transfer from a vertical cylinder, with or without fins, embedeed in a solid phase change medium; ASME Journal of Heat Transfer; 107 : 44-51; 1985.

- [23] - KAMIMOTO, M., ABE, Y. et alli; Latent thermal storage unit using form-stable high density polyethylene (Part II)-Numerical analysis of heat transfer; ASME Journal of Solar Energy Engineering; 108 : 290-297; 1986.
- [24] - KAMIMOTO, M., ABE, Y. et alli; Latent thermal storage unit using form-stable high density polyethylene (Part I)- Numerical analysis of heat transfer; ASME Journal of Solar Energy Engineering; 108 : 282-289 ; 1986.
- [25] - KAMIMOTO, M., TANAKA, T. et alli; Investigation of nitrate salts for solar latent heat storage; Solar Energy; 14 :581-587; 1980.
- [26] - LEDERMAN, J.M., BOLEY, B.A.; Axisymmetric melting or solidification of circular cylinders; International Journal of Heat and Mass Transfer; 13 : 413-427; 1970.
- [27] - LOGWELL, P.A.; A graphical method for solution of freezing; A.I.Ch.E.J. ; 4 : 53-57; 1958.
- [28] - MUEHLBAUER, J.C, HATCHER, J.D. et alli; Transient heat transfer analysis of alloy solidification; ASME Journal of Heat transfer; 95 : 324-331; 1973.
- [29] - MURRAY, W.D., LANDIS, F.; Numerical and machine solution of transient heat conduction problems involving melting or freezing (Part I) - Method of analysis and sample solutions; ASME Journal of Heat Transfer; 106-112; 1959.
- [30] - PATANKAR, S.V.; Numerical Heat Transfer and fluid Flow ; McGraw-Hill; Hemisphere Publishing Corporation; 1980.

- [31] - REGO, O.A.A.; Análise do desempenho de armazenadores térmicos por calor latente de eixo vertical; Tese de doutorado; Instituto Tecnológico da Aeronáutica; São José dos Campos; S.P.; Brasil; 1991; 114 p..
- [32] - RIEGER, H., PROJAHN, U., BEER, H.; Analysis of the heat transport mechanisms during melting around a horizontal circular cylinders; International Journal of Heat and Mass Transfer; 25(1) : 137-147; 1982.
- [33] - SAITOH, T.; Numerical method for multi-dimensional freezing problems in arbitrary domains; ASME Journal of Heat Transfer; 100 : 299-299; 1978.
- [34] - SPARROW, E.M., PATANKAR, S.V., RAMADHANI, S.; Analysis of melting in the presence of natural convection in the melt region; ASME Journal of Heat Transfer; 99 : 520-526; 1977.
- [35] - SPARROW, E.M., RAMADHANI, S., PATANKAR, S.V.; Effect subcooling of cylindrical melting; ASME Journal of Heat Transfer; 100 : 395-402; 1978.
- [36] - SPARROW, E.M., RAMSEY, J.W., HARRIS, J.S.; The transition from natural convection-controlled freezing to conduction-controlled freezing; ASME Journal of Heat Transfer; 103 : 7-12; 1981.