

Jorge Guillermo Nikulin Aracena
Eng. Naval, Universidad Técnica Del Estado de Chile, 1978

ANÁLISE TEÓRICA EXPERIMENTAL DE UM MODELO
MATEMÁTICO APERFEIÇOADO, PARA DETERMINAR
A DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURAS NOS PRO
CESSOS DE SOLDAGEM

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da USP para obtenção
do título de Mestre em
Engenharia Naval.

Orientador: Prof.Dr. Célio Taniguchi, Deptº. Eng. Naval

São Paulo, 1988

D.A. 23.06.1988

fd. 933

DEDICATÓRIA

PARA VOCE, MEU AMADO FILHO JORGE RODRIGO,
DISTANTE HÁ CINCO ANOS, PELA RESIGNAÇÃO
AO SACRIFÍCIO DA SEPARAÇÃO

TE AMO MUITO

Aos meus
Pais

Aos meus
Irmãos

AGRADECIMENTOS

O autor deseja externar os sinceros agradecimentos àqueles que direta ou indiretamente contribuíram decisivamente para a concretização deste trabalho. Em especial é mister destacar as colaborações das seguintes pessoas ou entidades:

- Dos meus pais, pelo seu amor e compreensão.
- Do meu orientador Prof. Dr. CÉLIO TANIGUCHI, pelo seu incentivo e colaboração durante o desenvolvimento deste trabalho.
- Do Contra-Almirante (EN) ÉLCIO DE SÁ FREITAS diretor da Diretoria de Engenharia Naval (DEN) da Marinha do Brasil, pelo seu incentivo, confiança e oportunidade dada para a continuidade de meus estudos de pós-graduação na Universidade de São Paulo (USP).
- Da Profa. GEDITE FÓNTES TAVARES, pelo importantíssimo auxílio prestado na estrutura lingüística e redação deste trabalho.
- Da Srta. IVANILDE DÊMICO, pelo importante auxílio prestado na gramática deste trabalho.
- Do Eng^o. Naval CAIO MARCELO TONDO, pelas suas valiosas sugestões e revisão do texto final deste trabalho.
- Da empresa ALCAN Alumínio do Brasil, na pessoa do Eng^o. FERNANDO FILIPSON, pela doação dos corpos de provas utilizados durante os levantamentos experimentais.
- Do Núcleo de Tecnologia de Equipamentos Industriais do IPT (NTE-IPT) na pessoa do Eng^o. RICARDO YAMAGISHI e do Sr. SERGIO MILEO, pela colaboração prestada na instrumentação dos corpos de provas.
- Da Fundação Rotária, pela confiança depositada e pelos recursos financeiros fornecidos.
- Do Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento do Brasil (CNPq), pelos recursos financeiros fornecidos.

- Da Coordenadoria de Atividades Culturais da Universidade de São Paulo (CODAC), pelos recursos financeiros fornecidos.
- Do Museu Paulista da Universidade de São Paulo, na pessoa da Prof^a. SONIA THEREZINHA DORTA, pelo auxílio prestado na utilização do computador.
- De todos os meus professores, colegas e amigos, tanto civis como militares, pelos incentivos, demonstrações de amizade e ajuda prestadas.

RESUMO

O presente trabalho mostra uma nova solução analítica para o problema de fluxo de calor que se desenvolve num corpo metálico, aquecido por uma fonte de calor móvel, proveniente dos processos industriais com chama ou soldagem.

Essa solução leva em consideração a dependência das propriedades térmicas dos materiais com a temperatura e a quantidade de calor transferida ao meio circundante pelos fenômenos de convecção e irradiação das superfícies do corpo metálico aquecido.

É apresentada também uma nova modelagem para a fonte de calor, a qual foi considerada como sendo finita e tridimensional, em lugar da clássica modelagem de fonte puntiforme.

Com base na solução desenvolvida, é proposto um programa geral de computador para determinar a distribuição de temperaturas em corpos metálicos aquecidos por uma fonte de calor móvel tridimensional.

Finalmente, com auxílio de resultados experimentais obtidos pelo autor, é efetuada uma análise comparativa, onde se verifica a boa adequabilidade desse novo modelo matemático aos casos reais da prática.

ABSTRACT

The present work provides a new analytic solution for the problem of heat flow developed in a metallic body, heated by a mobile heat source, using industrial processes like as welding or flame heating

This solution takes into consideration the dependence of thermal properties of those materials with temperature and the quantity of heat transferred to the surrounding media by the phenomena of convection and radiation the surfaces of the heated metallic body.

Also is presented a new model for the heat source which is considered to be finite and three dimensional instead of the classical point source model.

Based on the above developments a general computer program is proposed for the calculation of temperatures distribution within the metallic bodies processed by the mobile heat source.

Finally, a comparative analysis is carried out where is shown the good correlation between the developed model and the experimental results obtained by the author.

ÍNDICE

DEDICATÓRIA.....	3
AGRADECIMENTOS.....	4
RESUMO.....	6
ABSTRACT.....	7
ÍNDICE.....	8
LISTA DE FIGURAS.....	11
LISTA DE GRÁFICOS.....	20
LISTA DE TABELAS.....	22
NOMENCLATURA.....	24
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	29
1.1 - OBJETIVOS DO TRABALHO.....	30
1.2 - LIMITAÇÕES DO TRABALHO.....	31
CAPÍTULO 2 - TRATAMENTO ANALÍTICO DO FLUXO DE CALOR DURANTE O PROCESSO DE SOLDAGEM OU OPERAÇÕES INDUSTRIAIS COM CHAMA.....	33
2.1 - VARIAÇÃO DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS DOS MATERIAIS..	33
2.2 - MODELAGEM DA FONTE DE CALOR.....	34
2.3 - HIPÓTESES UTILIZADAS NA MODELAGEM DO PROBLEMA DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR.....	46
2.4 - EQUAÇÃO QUE GOVERNA O FLUXO DE CALOR NOS PROCESSOS DE SOLDAGEM E OPERAÇÕES INDUSTRIAIS COM CHAMA.....	47
2.5 - CONDIÇÕES DE CONTORNO DO PROBLEMA.....	52
2.6 - DESENVOLVIMENTO DA SOLUÇÃO DO PROBLEMA EM DERIVADAS PARCIAIS.....	55
2.6.1 - SOLUÇÃO EXTERNA ($r > r_h$).....	56
2.6.2 - SOLUÇÃO INTERNA ($r < r_h$).....	62
2.6.2.1 - PRIMEIRA PARTE DA SOLUÇÃO INTERNA ($\phi_I^1(r, z)$).....	62
2.6.2.2 - SEGUNDA PARTE DA SOLUÇÃO INTERNA ($\phi_{II}^1(r, z)$).....	66

2.6.2.3 - CONDIÇÕES DE COMPATIBILIDADE ENTRE AS SOLUÇÕES INTERNA E EXTERNA ($r=r_h$).....	68
CAPÍTULO 3 - CARACTERÍSTICAS GERAIS DAS LIGAS DE ALUMÍNIO E CONSEQUÊNCIAS DAS VARIAÇÕES DE TEMPERATURA NAS SUAS PROPRIEDADES.....	
3.1 - CARACTERÍSTICAS GERAIS DO ALUMÍNIO.....	73
3.2 - IDENTIFICAÇÃO DAS LIGAS DE ALUMÍNIO.....	74
3.3 - FORMAÇÃO DAS LIGAS DE ALUMÍNIO.....	74
3.4 - PROPRIEDADES E CARACTERÍSTICAS GERAIS DA LIGA 1050 E DA LIGA 5052.....	76
3.5 - VARIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DO ALUMÍNIO E DA LIGA ALUMÍNIO-MAGNÉSIO.....	78
CAPÍTULO 4 - DESENVOLVIMENTO DE UM PROGRAMA DE COMPUTADOR PARA ESTUDAR A CONDUÇÃO DE CALOR EM CORPOS METÁLICOS, PROCESSADOS POR FONTE MOVEL.....	
4.1 - PROGRAMA PRINCIPAL.....	88
4.2 - AVALIAÇÃO DA INTEGRAL " K_N ".....	88
4.3 - SOLUÇÃO DA EQUAÇÃO TRANSCENDENTAL.....	90
4.4 - CÁLCULO DA INTENSIDADE DE CALOR NO CENTRO DA ÁREA DE CALOR.....	93
4.5 - CÁLCULO DAS FUNÇÕES DE BESSEL.....	95
4.6 - CÁLCULO DAS FUNÇÕES DE BESSEL.....	96
CAPÍTULO 5 - RESULTADOS NUMÉRICOS.....	
5.1 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE COEFICIENTES UTILIZADOS NAS SÉRIES SOLUÇÕES.....	98
5.2 - ANÁLISE COMPARATIVA PRELIMINAR.....	114
5.3 - SELEÇÃO DOS CASOS PARA CÁLCULO NUMÉRICO.....	121
5.4 - APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS NUMÉRICOS.....	121
CAPÍTULO 6 - RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	
6.1 - CONDIÇÕES PARA OS ENSAIOS EXPERIMENTAIS.....	147
6.2 - METODOLOGIA DOS ENSAIOS E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS.....	151

	10
6.3 - APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	156
CAPÍTULO 7 - ANÁLISE COMPARATIVA, CONCLUSÕES E SUGES- TÕES.....	178
7.1 - ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE AS DISTRIBUIÇÕES TEÓRI- CAS E EXPERIMENTAIS.....	178
7.2 - CONCLUSÕES.....	200
7.3 - SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.....	200
BIBLIOGRAFIA.....	202
APÊNDICES:	
I - LISTAGEM DO PROGRAMA E SIMBOLOGIA USADA..	208
II - MANUAL DO USUÁRIO DO PROGRAMA "DISTEMP"..	226
III - PROBLEMA-EXEMPLO PARA A UTILIZAÇÃO DO PRO- GRAMA "DISTEMP".....	232
IV - ANÁLISE DE REGRESSÃO.....	239

LISTA DE FIGURAS

FIGURA		PÁGINA
2.1	DISTRIBUIÇÃO DA INTENSIDADE DE CALOR PROPOSTA POR RYKALIN.....	39
2.2	REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA DISTRIBUIÇÃO DA INTENSIDADE DE CALOR, TRANSFERIDA A UM CORPO POR UMA FONTE DE CALOR.....	40
2.3	REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA ÁREA DE CALOR...	41
2.4	DISTORÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DA INTENSIDADE DE CALOR.....	45
2.5	CONDUÇÃO LINEAR DE CALOR.....	47
2.6	CONDUÇÃO DE CALOR ATRAVÉS DE UM ELEMENTO INFINITESIMAL DE VOLUME.....	48
2.7	REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURAS NUMA CHAPA SENDO SOLDADA.....	50
2.8	REPRESENTAÇÃO GEOMÉTRICA PARA VISUALIZAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CONTORNO DO PROBLEMA DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR.....	53
2.9	REPRESENTAÇÃO DO FLUXO DE CALOR ATRAVÉS DE UMA SUPERFÍCIE ELEMENTAR DE CILINDRO.....	59
2.10	REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA SUPERPOSIÇÃO ADOTADA NA SOLUÇÃO INTERNA.....	63
4.1	DIAGRAMA DE BLOCOS.....	89
4.2	INTERVALO REPRESENTATIVO USADO NA INTEGRAÇÃO NUMÉRICA.....	92
5.1	DISTRIBUIÇÕES TEÓRICAS DE TEMPERATURAS GERADAS PELO PROGRAMA "DISTEMP", UTILIZANDO OS VALORES DO CASO 1 DA TABELA 5.3.....	126
5.2	DISTRIBUIÇÕES TEÓRICAS DE TEMPERATURAS GERADAS PELO PROGRAMA "DISTEMP", UTILIZANDO OS VALORES DO CASO 2 DA TABELA 5.3.....	127
5.3	DISTRIBUIÇÕES TEÓRICAS DE TEMPERATURAS GERADAS PELO PROGRAMA "DISTEMP", UTILIZANDO OS VALORES DO CASO 3 DA TABELA 5.3.....	128

FIGURA		PÁGINA
5.4	DISTRIBUIÇÕES TEÓRICAS DE TEMPERATURAS GERADAS PELO PROGRAMA "DISTEMP", UTILIZANDO OS <u>VA</u> LORES DO CASO 4 DA TABELA 5.3.....	129
5.5	DISTRIBUIÇÕES TEÓRICAS DE TEMPERATURAS GERADAS PELO PROGRAMA "DISTEMP", UTILIZANDO OS <u>VA</u> LORES DO CASO 5 DA TABELA 5.3.....	130
5.6	DISTRIBUIÇÕES TEÓRICAS DE TEMPERATURAS GERADAS PELO PROGRAMA "DISTEMP", UTILIZANDO OS <u>VA</u> LORES DO CASO 6 DA TABELA 5.3.....	131
5.7	DISTRIBUIÇÕES TEÓRICAS DE TEMPERATURAS GERADAS PELO PROGRAMA "DISTEMP", UTILIZANDO OS <u>VA</u> LORES DO CASO 7 DA TABELA 5.3.....	132
5.8	DISTRIBUIÇÕES TEÓRICAS DE TEMPERATURAS GERADAS PELO PROGRAMA "DISTEMP", UTILIZANDO OS <u>VA</u> LORES DO CASO 8 DA TABELA 5.3.....	133
5.9	DISTRIBUIÇÕES TEÓRICAS DE TEMPERATURAS GERADAS PELO PROGRAMA "DISTEMP", UTILIZANDO OS <u>VA</u> LORES DO CASO 9 DA TABELA 5.3.....	134
5.10	DISTRIBUIÇÕES TEÓRICAS DE TEMPERATURAS GERADAS PELO PROGRAMA "DISTEMP", UTILIZANDO OS <u>VA</u> LORES DO CASO 1 DA TABELA 5.4.....	135
5.11	DISTRIBUIÇÕES TEÓRICAS DE TEMPERATURAS GERADAS PELO PROGRAMA "DISTEMP", UTILIZANDO OS <u>VA</u> LORES DO CASO 2 DA TABELA 5.4.....	136
5.12	DISTRIBUIÇÕES TEÓRICAS DE TEMPERATURAS GERADAS PELO PROGRAMA "DISTEMP", UTILIZANDO OS <u>VA</u> LORES DO CASO 3 DA TABELA 5.4.....	137
5.13	DISTRIBUIÇÕES TEÓRICAS DE TEMPERATURAS GERADAS PELO PROGRAMA "DISTEMP", UTILIZANDO OS <u>VA</u> LORES DO CASO 4 DA TABELA 5.4.....	138
5.14	DISTRIBUIÇÕES TEÓRICAS DE TEMPERATURAS GERADAS PELO PROGRAMA "DISTEMP", UTILIZANDO OS <u>VA</u> LORES DO CASO 5 DA TABELA 5.4.....	139

FIGURA		PÁGINA
5.15	DISTRIBUIÇÕES TEÓRICAS DE TEMPERATURAS GERADAS PELO PROGRAMA "DISTEMP", UTILIZANDO OS VALORES DO CASO 6 DA TABELA 5.4.....	140
5.16	DISTRIBUIÇÕES TEÓRICAS DE TEMPERATURAS GERADAS PELO PROGRAMA "DISTEMP", UTILIZANDO OS VALORES DO CASO 7 DA TABELA 5.4.....	141
5.17	DISTRIBUIÇÕES TEÓRICAS DE TEMPERATURAS GERADAS PELO PROGRAMA "DISTEMP", UTILIZANDO OS VALORES DO CASO 8 DA TABELA 5.4.....	142
5.18	DISTRIBUIÇÕES TEÓRICAS DE TEMPERATURAS GERADAS PELO PROGRAMA "DISTEMP", UTILIZANDO OS VALORES DO CASO 9 DA TABELA 5.4.....	143
5.19	DISTRIBUIÇÕES TEÓRICAS DE TEMPERATURAS GERADAS PELO PROGRAMA "DISTEMP", UTILIZANDO OS VALORES DO CASO 10 DA TABELA 5.4.....	144
5.20	DISTRIBUIÇÕES TEÓRICAS DE TEMPERATURAS GERADAS PELO PROGRAMA "DISTEMP", UTILIZANDO OS VALORES DO CASO 11 DA TABELA 5.4.....	145
5.21	DISTRIBUIÇÕES TEÓRICAS DE TEMPERATURAS GERADAS PELO PROGRAMA "DISTEMP", UTILIZANDO OS VALORES DO CASO 12 DA TABELA 5.4.....	146
6.1	PROCESSO DE SOLDAGEM DCSP-TIG.....	148
6.2	POSIÇÃO DO ELETRODO E DISTÂNCIA À CHAPA.....	150
6.3	CORPO DE PROVA PARA A REALIZAÇÃO DAS EXPERIÊNCIAS.....	154
6.4	POSIÇÃO DOS TERMO-PARES.....	154
6.5	ARRANJO DO EQUIPAMENTO PARA MEDIR AS DISTRIBUIÇÕES DE TEMPERATURAS.....	155
6.6	PERFIL DE TEMPERATURA MEDIDOS EXPERIMENTALMENTE USANDO AS CONDIÇÕES OPERACIONAIS DA TABELA 6.3, PARA O MODELO DE CHAPA DE 4,5mm E VELOCIDADE 9,0 mm/s.....	157

FIGURA		PÁGINA
6.7	PERFIS DE TEMPERATURA MEDIDOS EXPERIMENTALMENTE USANDO AS CONDIÇÕES OPERACIONAIS DA TABELA 6.3, PARA O MODELO DE CHAPA DE 4,5mm E VELOCIDADE 6,0 mm/s.....	158
6.8	PERFIS DE TEMPERATURA MEDIDOS EXPERIMENTALMENTE USANDO AS CONDIÇÕES OPERACIONAIS DA TABELA 6.3, PARA O MODELO DE CHAPA DE 4,5mm E VELOCIDADE 4,0 mm/s.....	159
6.9	PERFIS DE TEMPERATURA MEDIDOS EXPERIMENTALMENTE USANDO AS CONDIÇÕES OPERACIONAIS DA TABELA 6.3, PARA O MODELO DE CHAPA DE 6,5mm E VELOCIDADE 9,0 mm/s.....	160
6.10	PERFIS DE TEMPERATURA MEDIDOS EXPERIMENTALMENTE USANDO AS CONDIÇÕES OPERACIONAIS DA TABELA 6.3, PARA O MODELO DE CHAPA DE 6,5mm E VELOCIDADE 6,0 mm/s.....	161
6.11	PERFIS DE TEMPERATURA MEDIDOS EXPERIMENTALMENTE USANDO AS CONDIÇÕES OPERACIONAIS DA TABELA 6.3, PARA O MODELO DE CHAPA DE 6,5mm E VELOCIDADE DE 4,0 mm/s.....	162
6.12	PERFIS DE TEMPERATURA MEDIDOS EXPERIMENTALMENTE USANDO AS CONDIÇÕES OPERACIONAIS DA TABELA 6.3, PARA O MODELO DE CHAPA DE 10,5mm E VELOCIDADE DE 9,0 mm/s.....	163
6.13	PERFIS DE TEMPERATURA MEDIDOS EXPERIMENTALMENTE USANDO AS CONDIÇÕES OPERACIONAIS DA TABELA 6.3, PARA O MODELO DE CHAPA DE 10,5mm E VELOCIDADE DE 6,0 mm/s.....	164
6.14	PERFIS DE TEMPERATURA MEDIDOS EXPERIMENTALMENTE USANDO AS CONDIÇÕES OPERACIONAIS DA TABELA 6.3, PARA O MODELO DE CHAPA DE 10,5mm E VELOCIDADE DE 4,0 mm/s.....	165

FIGURA		PÁGINA
6.15	PERFIS DE TEMPERATURA MEDIDOS EXPERIMENTALMENTE USANDO AS CONDIÇÕES OPERACIONAIS DA TABELA 6.4, PARA O MODELO DE CHAPA DE 4,0mm E VELOCIDADE 4,0mm/s.....	166
6.16	PERFIS DE TEMPERATURA MEDIDOS EXPERIMENTALMENTE USANDO AS CONDIÇÕES OPERACIONAIS DA TABELA 6.4, PARA O MODELO DE CHAPA DE 4,0mm E VELOCIDADE 6,0mm/s.....	167
6.17	PERFIS DE TEMPERATURA MEDIDOS EXPERIMENTALMENTE USANDO AS CONDIÇÕES OPERACIONAIS DA TABELA 6.4, PARA O MODELO DE CHAPA DE 4,0mm E VELOCIDADE 9,0mm/s.....	168
6.18	PERFIS DE TEMPERATURA MEDIDOS EXPERIMENTALMENTE USANDO AS CONDIÇÕES OPERACIONAIS DA TABELA 6.4, PARA O MODELO DE CHAPA DE 6,5mm E VELOCIDADE 4,0mm/s.....	169
6.19	PERFIS DE TEMPERATURA MEDIDOS EXPERIMENTALMENTE USANDO AS CONDIÇÕES OPERACIONAIS DA TABELA 6.4, PARA O MODELO DE CHAPA DE 6,5mm E VELOCIDADE 6,0mm/s.....	170
6.20	PERFIS DE TEMPERATURA MEDIDOS EXPERIMENTALMENTE USANDO AS CONDIÇÕES OPERACIONAIS DA TABELA 6.4, PARA O MODELO DE CHAPA DE 6,5mm E VELOCIDADE 9,0mm/s.....	171
6.21	PERFIS DE TEMPERATURA MEDIDOS EXPERIMENTALMENTE USANDO AS CONDIÇÕES OPERACIONAIS DA TABELA 6.4, PARA O MODELO DE CHAPA DE 9,5mm E VELOCIDADE 4,0mm/s.....	172
6.22	PERFIS DE TEMPERATURA MEDIDOS EXPERIMENTALMENTE USANDO AS CONDIÇÕES OPERACIONAIS DA TABELA 6.4, PARA O MODELO DE CHAPA DE 9,5mm E VELOCIDADE 6,0mm/s.....	173

FIGURA	PÁGINA	
6.23	PERFIS DE TEMPERATURA MEDIDOS EXPERIMENTALMENTE USANDO AS CONDIÇÕES OPERACIONAIS DA TABELA 6.4, PARA O MODELO DE CHAPA DE 9,5mm E VELOCIDADE 9,0mm/s.....	174
6.24	PERFIS DE TEMPERATURA MEDIDOS EXPERIMENTALMENTE USANDO AS CONDIÇÕES OPERACIONAIS DA TABELA 6.4, PARA O MODELO DE CHAPA DE 12,0mm E VELOCIDADE 4,0mm/s.....	175
6.25	PERFIS DE TEMPERATURA MEDIDOS EXPERIMENTALMENTE USANDO AS CONDIÇÕES OPERACIONAIS DA TABELA 6.4, PARA O MODELO DE CHAPA DE 12,0mm E VELOCIDADE 6,0mm/s.....	176
6.26	PERFIS DE TEMPERATURA MEDIDOS EXPERIMENTALMENTE USANDO AS CONDIÇÕES OPERACIONAIS DA TABELA 6.4, PARA O MODELO DE CHAPA DE 12,0mm E VELOCIDADE 9,0mm/s.....	177
7.1	SUPERPOSIÇÃO DAS CURVAS TEÓRICA E EXPERIMENTAL DE DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA, OBTIDAS PARA UMA CHAPA DE ALUMÍNIO-PURO DE 10,5mm, AQUECIDA POR UMA FONTE MOVIMENTANDO-SE A 9,0 mm/s.....	179
7.2	SUPERPOSIÇÃO DAS CURVAS TEÓRICA E EXPERIMENTAL DE DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA, OBTIDAS PARA UMA CHAPA DE ALUMÍNIO-PURO DE 10,5mm, AQUECIDA POR UMA FONTE MOVIMENTANDO-SE A 6,0 mm/s.....	180
7.3	SUPERPOSIÇÃO DAS CURVAS TEÓRICA E EXPERIMENTAL DE DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA, OBTIDAS PARA UMA CHAPA DE ALUMÍNIO-PURO DE 10,5mm, AQUECIDA POR UMA FONTE MOVIMENTANDO-SE A 4,0 mm/s.....	181

FIGURA		PÁGINA
7.4	SUPERPOSIÇÃO DAS CURVAS TEÓRICA E EXPERIMENTAL DE DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA, OBTIDAS PARA UMA CHAPA DE ALUMÍNIO-PURO DE 6,5mm, AQUECIDA POR UMA FONTE MOVIMENTANDO-SE A 9,0 mm/s.....	182
7.5	SUPERPOSIÇÃO DAS CURVAS TEÓRICA E EXPERIMENTAL DE DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA, OBTIDAS PARA UMA CHAPA DE ALUMÍNIO-PURO DE 6,5mm, AQUECIDA POR UMA FONTE MOVIMENTANDO-SE A 6,0 mm/s.....	183
7.6	SUPERPOSIÇÃO DAS CURVAS TEÓRICA E EXPERIMENTAL DE DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA, OBTIDAS PARA UMA CHAPA DE ALUMÍNIO-PURO DE 6,5mm, AQUECIDA POR UMA FONTE MOVIMENTANDO-SE A 4,0 mm/s.....	184
7.7	SUPERPOSIÇÃO DAS CURVAS TEÓRICA E EXPERIMENTAL DE DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA, OBTIDAS PARA UMA CHAPA DE ALUMÍNIO-PURO DE 4,5mm, AQUECIDA POR UMA FONTE MOVIMENTANDO-SE A 9,0 mm/s.....	185
7.8	SUPERPOSIÇÃO DAS CURVAS TEÓRICA E EXPERIMENTAL DE DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA, OBTIDAS PARA UMA CHAPA DE ALUMÍNIO-PURO DE 4,5mm, AQUECIDA POR UMA FONTE MOVIMENTANDO-SE A 6,0 mm/s.....	186
7.9	SUPERPOSIÇÃO DAS CURVAS TEÓRICA E EXPERIMENTAL DE DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA, OBTIDAS PARA UMA CHAPA DE ALUMÍNIO-PURO DE 4,5mm, AQUECIDA POR UMA FONTE MOVIMENTANDO-SE A 6,0 mm/s.....	187
7.10	SUPERPOSIÇÃO DAS CURVAS TEÓRICA E EXPERIMENTAL DE DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA, OBTIDAS PARA UMA CHAPA DE ALUMÍNIO-MAGNÉSIO DE 4,0mm, AQUECIDA POR UMA FONTE MOVIMENTANDO-SE A 9,0 mm/s.....	188

FIGURA		PÁGINA
7.11	SUPERPOSIÇÃO DAS CURVAS TEÓRICA E EXPERIMENTAL DE DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA, OBTIDAS PARA UMA CHAPA DE ALUMÍNIO-MAGNÉSIO DE 4,0mm, AQUECIDA POR UMA FONTE MOVIMENTANDO-SE A 6,0 mm/s.....	189
7.12	SUPERPOSIÇÃO DAS CURVAS TEÓRICA E EXPERIMENTAL DE DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA, OBTIDAS PARA UMA CHAPA DE ALUMÍNIO-MAGNÉSIO DE 4,0mm, AQUECIDA POR UMA FONTE MOVIMENTANDO-SE A 4,0 mm/s.....	190
7.13	SUPERPOSIÇÃO DAS CURVAS TEÓRICA E EXPERIMENTAL DE DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA, OBTIDAS PARA UMA CHAPA DE ALUMÍNIO-MAGNÉSIO DE 6,5mm, AQUECIDA POR UMA FONTE MOVIMENTANDO-SE A 9,0 mm/s.....	191
7.14	SUPERPOSIÇÃO DAS CURVAS TEÓRICA E EXPERIMENTAL DE DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA, OBTIDAS PARA UMA CHAPA DE ALUMÍNIO-MAGNÉSIO DE 6,5mm, AQUECIDA POR UMA FONTE MOVIMENTANDO-SE A 6,0 mm/s.....	192
7.15	SUPERPOSIÇÃO DAS CURVAS TEÓRICA E EXPERIMENTAL DE DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA, OBTIDAS PARA UMA CHAPA DE ALUMÍNIO-MAGNÉSIO DE 6,5mm, AQUECIDA POR UMA FONTE MOVIMENTANDO-SE A 4,0 mm/s.....	193
7.16	SUPERPOSIÇÃO DAS CURVAS TEÓRICA E EXPERIMENTAL DE DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA, OBTIDAS PARA UMA CHAPA DE ALUMÍNIO-MAGNÉSIO DE 9,5mm, AQUECIDA POR UMA FONTE MOVIMENTANDO-SE A 9,0 mm/s.....	194
7.17	SUPERPOSIÇÃO DAS CURVAS TEÓRICA E EXPERIMENTAL DE DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA, OBTIDAS PARA UMA CHAPA DE ALUMÍNIO-MAGNÉSIO DE 9,5mm, AQUECIDA POR UMA FONTE MOVIMENTANDO-SE A 6,0 mm/s.....	195

FIGURA		PÁGINA
7.18	SUPERPOSIÇÃO DAS CURVAS TEÓRICA E EXPERIMENTAL DE DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA, OBTIDAS PARA UMA CHAPA DE ALUMÍNIO-MAGNÉSIO DE 9,5mm, AQUECIDA POR UMA FONTE MOVIMENTANDO-SE A 4,0 mm/s.....	196
7.19	SUPERPOSIÇÃO DAS CURVAS TEÓRICA E EXPERIMENTAL DE DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA, OBTIDAS PARA UMA CHAPA DE ALUMÍNIO-MAGNÉSIO DE 12,0mm, AQUECIDA POR UMA FONTE MOVIMENTANDO-SE A 9,0 mm/s.....	197
7.20	SUPERPOSIÇÃO DAS CURVAS TEÓRICA E EXPERIMENTAL DE DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA, OBTIDAS PARA UMA CHAPA DE ALUMÍNIO-MAGNÉSIO DE 12,0mm, AQUECIDA POR UMA FONTE MOVIMENTANDO-SE A 6,0 mm/s.....	198
7.21	SUPERPOSIÇÃO DAS CURVAS TEÓRICA E EXPERIMENTAL DE DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA, OBTIDAS PARA UMA CHAPA DE ALUMÍNIO-MAGNÉSIO DE 12,0mm, AQUECIDA POR UMA FONTE MOVIMENTANDO-SE A 4,0 mm/s.....	199
II.1	ESQUEMA DA ORDENAÇÃO DOS CARTÕES DE LEITURA..	231

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO		PÁGINA
2.1	RENDIMENTO TÉRMICO DE UMA CHAMA EM FUNÇÃO DA VAZÃO, PROPOSTO POR RYKALIN.....	35
2.2	VARIAÇÃO DO RENDIMENTO TÉRMICO DE TRANSMISSÃO EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE DA FONTE DE CALOR, PROPOSTA POR TANIGUCHI.....	36
3.1	CONDUTIBILIDADE TÉRMICA DO ALUMÍNIO.....	82
3.2	CONDUTIBILIDADE TÉRMICA DA LIGA ALUMÍNIO+MAGNÉSIO+ ΣX_1	83
3.3	CALOR ESPECÍFICO DO ALUMÍNIO.....	84
3.4	EXPANSÃO TÉRMICA LINEAR DO ALUMÍNIO.....	85
3.5	EXPANSÃO TÉRMICA LINEAR DA LIGA ALUMÍNIO+MAGNÉSIO+ ΣX_1	86
3.6	DIFUSIVIDADE TÉRMICA DO ALUMÍNIO.....	87
5.1	INFLUÊNCIA DO PARÂMETRO EFICIÊNCIA TÉRMICA DO PROCESSO NA DISTRIBUIÇÃO A BAIXAS TEMPERATURAS	102
5.2	INFLUÊNCIA DO PARÂMETRO COEFICIENTE DE CONCENTRAÇÃO DA FONTE DE CALOR NA DISTRIBUIÇÃO A BAIXAS TEMPERATURAS.....	103
5.3	INFLUÊNCIA DO PARÂMETRO COEFICIENTE DE VARIAÇÃO DA CONDUTIBILIDADE TÉRMICA DO MATERIAL NA DISTRIBUIÇÃO A BAIXAS TEMPERATURAS.....	104
5.4	INFLUÊNCIA DO PARÂMETRO COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR DA SUPERFÍCIE SUPERIOR DO CORPO NA DISTRIBUIÇÃO A BAIXAS TEMPERATURAS.....	105
5.5	INFLUÊNCIA DO PARÂMETRO COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR DA SUPERFÍCIE INFERIOR DO CORPO NA DISTRIBUIÇÃO A BAIXAS TEMPERATURAS.....	106
5.6	INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR DO CORPO NA DISTRIBUIÇÃO A BAIXAS TEMPERATURAS.....	107
5.7	INFLUÊNCIA DO PARÂMETRO EFICIÊNCIA TÉRMICA DO PROCESSO NA DISTRIBUIÇÃO A ALTAS TEMPERATURAS.	108

GRÁFICO		PÁGINA
5.8	INFLUÊNCIA DO PARÂMETRO COEFICIENTE DE CONCENTRAÇÃO DA FONTE DE CALOR NA DISTRIBUIÇÃO A ALTAS TEMPERATURAS.....	109
5.9	INFLUÊNCIA DO PARÂMETRO COEFICIENTE DE VARIAÇÃO DA CONDUTIBILIDADE TÉRMICA DO MATERIAL NA DISTRIBUIÇÃO A ALTAS TEMPERATURAS.....	110
5.10	INFLUÊNCIA DO PARÂMETRO COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR DA SUPERFÍCIE SUPERIOR DO CORPO NA DISTRIBUIÇÃO A ALTAS TEMPERATURAS.....	111
5.11	INFLUÊNCIA DO PARÂMETRO COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR DA SUPERFÍCIE INFERIOR DO CORPO NA DISTRIBUIÇÃO A ALTAS TEMPERATURAS.....	112
5.12	INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR DO CORPO NA DISTRIBUIÇÃO A ALTAS TEMPERATURAS.....	113
5.13	PRIMEIRA FASE DA ANÁLISE PRELIMINAR ENTRE OS RESULTADOS GERADOS ATRAVÉS DOS PROGRAMAS "TEMPER" E "DISTEMP", PARA O PONTO DISTANTE 10mm DA LINHA DE SOLDAGEM.....	116
5.14	PRIMEIRA FASE DA ANÁLISE PRELIMINAR ENTRE OS RESULTADOS GERADOS ATRAVÉS DOS PROGRAMAS "TEMPER" E "DISTEMP", PARA O PONTO DISTANTE 32mm DA LINHA DE SOLDAGEM.....	117
5.15	SEGUNDA FASE DA ANÁLISE PRELIMINAR ENTRE OS RESULTADOS GERADOS ATRAVÉS DOS PROGRAMAS "TEMPER" E "DISTEMP", PARA O PONTO DISTANTE 10mm DA LINHA DE SOLDAGEM.....	119
5.16	SEGUNDA FASE DA ANÁLISE PRELIMINAR ENTRE OS RESULTADOS GERADOS ATRAVÉS DOS PROGRAMAS "TEMPER" E "DISTEMP", PARA O PONTO DISTANTE 32mm DA LINHA DE SOLDAGEM.....	120

LISTA DE TABELAS

TABELA		PÁGINA
2.1	RENDIMENTO TÉRMICO DE UMA CHAMA DE GÁS PROPOSTO POR RYKALIN.....	35
2.2	VALORES DA EFICIÊNCIA DE ARCO PARA DIFERENTES PROCESSOS DE SOLDAGEM.....	38
2.3	VALORES EXPERIMENTAIS DO COEFICIENTE DE CONCENTRAÇÃO DA INTENSIDADE DE CALOR "C", PROPOSTOS POR RYKALIN E NIKOLAEV PARA PROCESSOS DE SOLDAGEM.....	43
2.4	VALORES EXPERIMENTAIS DO COEFICIENTE DE CONCENTRAÇÃO DA INTENSIDADE DE CALOR "C", PROPOSTOS POR RYKALIN PARA PROCESSOS DE OPERAÇÃO COM CHAMA.....	44
3.1	PROPRIEDADES FÍSICAS FUNDAMENTAIS DO ALUMÍNIO	75
3.2	PROPRIEDADES MECÂNICAS DO ALUMÍNIO.....	75
3.3	SISTEMA ADOPTADO PELA AA/ASTM PARA DESIGNAR AS LIGAS DE ALUMÍNIO.....	77
3.4	SIGNIFICADO DE CADA DÍGITO IDENTIFICADOR AA/ASTM.....	77
3.5	CORRESPONDÊNCIA DE NORMAS ESTRANGEIRAS.....	79
3.6	COMPOSIÇÃO QUÍMICA.....	79
3.7	PROPRIEDADES MECÂNICAS.....	80
5.1	PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DAS DISTRIBUIÇÕES EXPERIMENTAIS UTILIZADAS COMO PADRÕES DE COMPARAÇÃO DURANTE AS ANÁLISES DE SENSIBILIDADE.	100
5.2	FAIXAS DE VALORES RECOMENDADAS PARA OS COEFICIENTES UTILIZADOS NAS SÉRIES SOLUÇÕES, EXTRAÍDAS DA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE.....	101
5.3	DADOS DE ENTRADA PARA O CÁLCULO NUMÉRICO DO ALUMÍNIO PURO (1050).....	122
5.4	DADOS DE ENTRADA PARA O CÁLCULO NUMÉRICO DA LIGA ALUMÍNIO-MAGNÉSIO (5052).....	124

TABELA		PÁGINA
6.1	PREPARAÇÃO DAS PONTAS DOS ELETRODOS PARA OPERAÇÃO DCSP-TIG.....	149
6.2	FAIXAS RECOMENDADAS PARA O PROCESSO DE SOLDAGEM DCSP-TIG.....	150
6.3	CONDIÇÕES OPERACIONAIS PARA OS ENSAIOS COM CORPO DE PROVAS CONSTITUÍDOS PELA LIGA 1050 E UTILIZANDO O PROCESSO DE SOLDAGEM DCSP-TIG.....	153
6.4	CONDIÇÕES OPERACIONAIS PARA OS ENSAIOS COM CORPO DE PROVAS CONSTITUÍDOS PELA LIGA 5052 E UTILIZANDO O PROCESSO DE SOLDAGEM DCSP-TIG.....	153
6.5	ESPECIFICAÇÕES DOS EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS.....	156

NOMENCLATURA

A	: Ampère.
AC	: Corrente alternada (alternating current).
A_f	: fator de forma.
A_i	: Área do corpo (mm^2).
Å	: Angstrom.
$A_1, A_2, A_1^*, A_2^*, \bar{A}_1, \bar{A}_2, A_{2n}$: Constantes arbitrárias.
$B_1, B_2, B_1^*, B_2^*, \bar{B}_1, \bar{B}_2, B_{2n}$: Constantes arbitrárias.
C	: Coeficiente de concentração da intensidade de calor da fonte (cm^{-2}).
c	: Calor específico do material ($\text{cal/g/}^\circ\text{C}$).
ca	: Corrente alternada (A).
cal	: Caloria.
cc	: Corrente contínua (A).
cm	: Centímetro.
$^\circ\text{C}$: Grau Celsius.
DCSP, dcsp	: Corrente contínua com polaridade direta (direct current straight polarity).
DCRP, dcrp	: Corrente contínua com polaridade inversa (direct current reverse polarity).
e	: Base do logarítmo neperiano.
ϵ	: Emissividade da superfície do corpo.
$^\circ\text{F}$: Grau Fahrenheit.
GMAW	: Soldagem a arco elétrico com proteção gasosa (gas metal arc welding).

GTAW	: Soldagem a arco elétrico com proteção gasosa e eletrodo de tungstênio (gas tungsten arc welding).
g	: Grama.
H	: Espessura do material (mm).
h	: Hora.
h_1, h_2	: Valores médios dos coeficientes de transferência de calor ao meio circundante pelos fenômenos de convecção e radiação das superfícies superior e inferior do corpo (cal/seg/mm/mm/°C).
\hat{h}_1, \hat{h}_2	: Valores dos coeficientes de transferência de calor ao meio circundante pelos fenômenos de convecção e radiação das superfícies superior e inferior do corpo (cal/seg/mm/mm/°C).
h_c	: Coeficiente de película.
I	: Corrente do arco elétrico (A).
$I_0(x), I_1(x)$: Funções de Bessel modificadas de primeira espécie e de ordem zero e um.
$J_0(x), J_1(x)$: Funções de Bessel de primeira espécie e de ordem zero e um.
$K_0(x), K_1(x)$: Funções de Bessel modificadas de segunda espécie e de ordem zero e um.
k	: Condutibilidade térmica do material (cal/mm/seg/°C).

k_0	: Condutibilidade térmica do material para zero grau Celsius (cal/mm/seg/ $^{\circ}$ C).
$k(T)$: Função que descreve a dependência da condutibilidade térmica do material com a temperatura.
κ	: Difusividade térmica do material (mm^2/seg).
$^{\circ}$ K	: Grau Kelvin.
l	: Litros.
MOL_{ac}	: Molécula grama do gás combustível.
MS	: Sistema móvel.
mm	: Milímetro.
η	: Eficiência térmica do processo.
η_{ac}	: Rendimento térmico do processo de conformação.
η_s	: Eficiência do arco elétrico.
θ	: Temperatura do material ($^{\circ}$ C).
θ_e	: Temperatura do meio ambiente ($^{\circ}$ C).
θ_o	: Temperatura inicial do corpo ($^{\circ}$ C).
ϕ	: Diâmetro do eletrodo (mm).
Q	: Potência total absorvida pelo material.
Q_{est}	: Calor resultante da combustão primária do gás combustível, por molécula grama de gás, segundo a equação estequiométrica.
q_o	: Intensidade de calor da fonte no centro da área de calor.

q_{max}	: Máxima intensidade de calor na fonte.
r	: Distância radial (mm).
r_h	: Distância radial da área de calor (mm).
r, ψ, z	: Coordenadas cilíndricas.
SAW	: Soldagem a arco submerso (submerged arc welding).
seg	: Segundo.
SMAW	: Soldagem com eletrodo revestido (shielded metal arc welding).
SS	: Sistema estacionário.
t	: Tempo (seg).
T	: Temperatura ($^{\circ}C$).
TIG	: Processo de soldagem com eletrodo de tungstênio e proteção gasosa (Tungsten Inert Gas).
v	: Velocidade de avanço da fonte de calor (mm/seg).
V	: Voltagem.
V_{ac}	: Vazão do gás combustível (l/h).
W_i	: Variação da energia interna do sistema.
x, y, z	: Sistema de coordenadas cartesianas fixas.
$Y_0(x), Y_1(x)$: Funções de Bessel de segunda espécie e de ordem zero e um.

- $\zeta = x - vt$: Coordenada móvel na direção do eixo "x".
- γ : Coeficiente de variação linear da condutibilidade térmica do material com a temperatura.
- γ_{ac} : Peso específico do gás combustível à temperatura de utilização (g/l).
- σ : Constante de Stefan-Boltzman (coeficiente de radiação do corpo negro).
- ρ : Densidade do material (g.mm⁻³).
- π : Valor da constante PI (igual a 3,1416).

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Os processos industriais a chama (oxi-corte, conformação, desempenho, etc.) ou soldagem (TIG, MIG, eletrodo revestido e outros) são operações comumente usadas, na fabricação e/ou reparo de uma grande variedade de estruturas metálicas, equipamentos, maquinarias, navios, veículos especiais, e outros, devido à excelente qualidade dos produtos obtidos através daqueles processos. Entretanto, a sua utilização trouxe alguns problemas, dentre os quais se destacam as tensões e distorções residuais, ocasionadas pela distribuição não uniforme das temperaturas que se desenvolvem num corpo metálico aquecido por fontes de calor.

Outros efeitos prejudiciais devido ao calor podem ser mencionados, tais como: o comportamento frágil, agravado pelas tensões residuais associadas a cargas externas, a diminuição da carga crítica de flambagem, devido ao desenvolvimento de tensões residuais de compressão, especialmente em estruturas compostas de chapas finas, as fraturas por fadiga, a diminuição da resistência à corrosão, etc.

Inicialmente muitos desses problemas de difícil explicação ou solução, manifestados nas primeiras estruturas de aço-carbono soldadas, foram estudados por meios experimentais na tentativa de solucioná-los e assim, produzir estruturas confiáveis e seguras.

No entanto, tais experiências suscitarão posteriormente dúvidas quanto ao: que fazer quando técnicas convencionais de um determinado processo a chama ou soldagem fossem efetivadas em materiais ferrosos que diferem do aço-carbono (aço temperado revenido, aço inox e outros) ou em materiais não ferro

so (alumínio, titânio, etc.), assim como o que fazer quando no vos processos necessitassem ser executados (solda laser, cor te com plasma, feixe de elétrons e outros)?.

Em épocas recentes, os esforços realizados na solução dos complexos fenômenos ligados às novas técnicas de operação com chama ou soldagem em corpos metálicos, fundamentam-se ba sicamente, numa combinação entre os levantamentos experimenta is, embora muitas vezes limitados, e às técnicas numéricas de análise em computadores. Com isto, conseguiu-se um controle mais efetivo dos parâmetros envolvidos no desenvolvimento não uniforme da distribuição de temperaturas e, conseqüentemente, minimizaram-se os efeitos detrimenta is ocasionados.

1.1 - OBJETIVOS DO TRABALHO

A pesquisa dá grande ênfase à importância das técnicas de análise numérica capazes de prever, com a maior precisão possível, o desenvolvimento do gradiente de temperatura num corpo metálico, retangular e de espessura constante finita, submetido à ação de algum processo industrial a chama ou soldagem, prevendo e minimizando assim, as transfor mações metalúrgicas e físicas experimentadas por ele.

Neste contexto, o presente trabalho objetiva:

1. Apresentar uma reformulação da solução ana lítica do problema de fluxo de calor através de um corpo metálico (ferroso ou não), aquecido por uma fonte de calor finita e tridimensional, resultante dos processos industriais a chama ou soldagem.
2. Levar em consideração, na solução deste problema, a dependência das propriedades térmicas dos materiais com a temperatura e a quantidade de calor transfe ri da ao meio circundante, pelos fenômenos de convecção e radiação das superfícies (superior e inferior) do corpo metálico aquecido.

3. Comparar os resultados desse novo desenvolvimento com outras formas de avaliação de fenômeno e cotejar esses mesmos resultados com alguns levantamentos experimentais já existentes para o caso do aço.
4. Obter resultados experimentais sistemáticos, valendo-se de duas ligas de alumínio (ANS. H35.1-1969, liga 1050 e 5052) empregadas na indústria naval e utilizando o processo TIG (Tungsten Inert Gas).
5. Comparar os resultados experimentais obtidos com resultados numéricos conseguidos com o novo programa desenvolvido.

1.2 - LIMITAÇÕES DO TRABALHO

No trabalho que se pretende executar, a imposição de limitações torna-se praticamente inevitável. Porém, é importante salientar que tais imposições têm a finalidade de tornar o estudo mais direto e objetivo, sem com isso restringir a pesquisa em si.

As limitações aqui impostas são:

1. Os materiais utilizados no presente trabalho são duas ligas de alumínio empregadas na indústria naval, identificadas como liga 1050 (alumínio com pureza 99,5%) e liga 5052 (alumínio magnésio), apresentadas na forma de chapas grossas, laminadas a quente. Dessas ligas são bem conhecidas as propriedades físicas e mecânicas, o que facilita um estudo das transformações que o material sofrerá durante os ciclos de aquecimento e resfriamento. As especificações, bem como as suas propriedades características, são apresentadas no Capítulo 3.

2. Como o presente trabalho limita-se ao estudo da distribuição de temperaturas num corpo metálico retangular e de espessura constante, não serão estudados os efeitos da fonte de calor na estrutura cristalina do material de base e de enchimento, embora sejam reconhecidamente importantes no estudo das propriedades do material.
3. A fonte de calor a ser utilizada nos ensaios, será fornecida por um equipamento TIG, pois ele é capaz de fornecer uma fonte de calor finita, concentrada e tri-dimensional com características estáveis de operação.
4. Será considerada uma só fonte de calor e um único passe de aquecimento para processar a chapa. Embora este processo não seja tão comum na prática, é preferível simplificar o problema e chegar a conclusões mais claras e precisas, do que atacar uma pesquisa ambiciosa, com o risco de se obterem resultados nebulosos e de interpretação duvidosa.

CAPÍTULO 2

TRATAMENTO ANALÍTICO DO FLUXO DE CALOR DURANTE O PROCESSO DE SOLDAGEM OU OPERAÇÕES INDUSTRIAIS COM CHAMA

A equação diferencial em derivadas parciais que governa o fluxo de calor e as condições de contorno que a acompanham são altamente não lineares. Assim sendo, todas as tentativas feitas para solucionar o problema de condução de calor nos processos de soldagem ou operações com chama (processos que utilizam como fonte de calor a chama proveniente de um maçarico, como por exemplo, oxi-corte, conformação à chama, desempenho, etc.), antes do advento do computador, foram de natureza simplesmente analítica, introduzindo-se diversas hipóteses simplificadoras. No entanto, a partir da década de 60, muitos investigadores vêm usando computadores de grande capacidade para solucionar, numericamente e com maior precisão, as distribuições de temperaturas durante os processos mencionados.

Este capítulo apresentará uma nova abordagem ao problema de fluxo de calor, o qual pode não se configurar tão precisa, em relação a alguma outra solução atualmente em desenvolvimento (solução por elementos finitos), mas facilitará observar e compreender os fenômenos envolvidos.

2.1 - VARIAÇÃO DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS DOS MATERIAIS

Observando as tabelas de condutibilidade térmica, calor específico e densidade, verifica-se que todas estas grandezas são altamente dependentes da temperatura. Desta maneira, admitir estas propriedades como constantes, é conduzir a uma solução viciada do problema, especialmente nas regiões próximas à fonte de calor, onde o material é submetido às maiores temperaturas. É desejável, portanto, predizer com a maior precisão possível, a região onde ocorrem as altas temperaturas, já que será ela a mais diretamente afetada pelos fenômenos térmicos. Esses efeitos podem

ser traduzidos em termos, por exemplo, da extensão da zona plastificada, que traz como conseqüências o surgimento de tensões e distorções residuais. Deve-se ter cuidado em não tomar sob as mesmas leis de variação as dependências com a temperatura:

- a) Do produto da densidade pelo calor específico " ρc ".
- b) Da condutibilidade térmica " k ". |1|

2.2 - MODELAGEM DA FONTE DE CALOR

A maioria dos investigadores concorda que talvez a parte mais crítica, para a análise térmica durante os processos de operação com chama ou soldagem, é a quantidade de calor, por unidade de tempo, que é fornecida a uma seção do material a ser estudado. O valor dessa grandeza varia de acordo com os processos, como será visto nos exemplos a seguir apresentados.

- a) processo de operação com chama

$$Q = \eta_{AC} \cdot \frac{Q_{est}}{MOL_{AC}} \cdot V_{AC} \cdot m_{AC} \quad (2.1)$$

onde

m_{AC} = Massa específica do gás combustível à temperatura de utilização.

V_{AC} = vazão do gás combustível.

MOL_{AC} = molécula grama do gás combustível.

Q_{est} = calor resultante da combustão do gás combustível, por molécula grama de gás, segundo a equação estequiométrica.

η_{AC} = rendimento térmico do processo de conformação.

A equação (2.1) representa o calor que é transferido a um corpo na unidade de tempo, função da vazão de gás, pela queima do gás combustível, utilizado num processo de operação com chama.

Avaliar o rendimento térmico da chama é uma tarefa muito difícil, devido aos inúmeros fatores envolvidos no proces

so, tais como a dimensão do corpo para o qual o calor é transferido, pureza do oxigênio, tipo de gás combustível, proporção da mistura gasosa, geometria e dimensões do bico do maçarico, temperatura do meio ambiente, etc.

No gráfico (2.1) e na tabela (2.1), encontram-se alguns valores de rendimento térmico da chama propostos por Rykalin [9] e sua equipe.

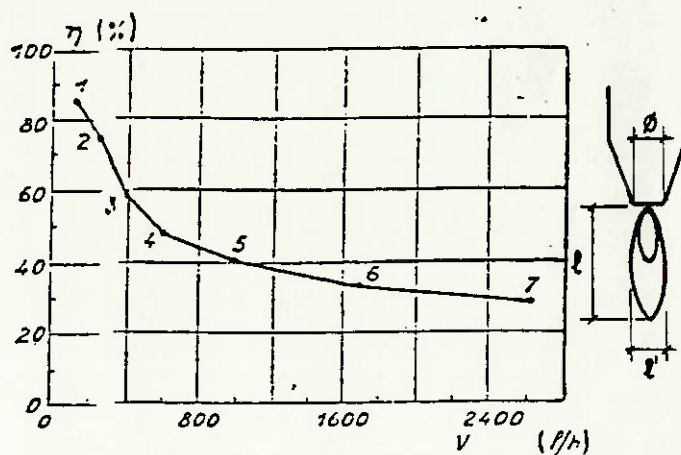
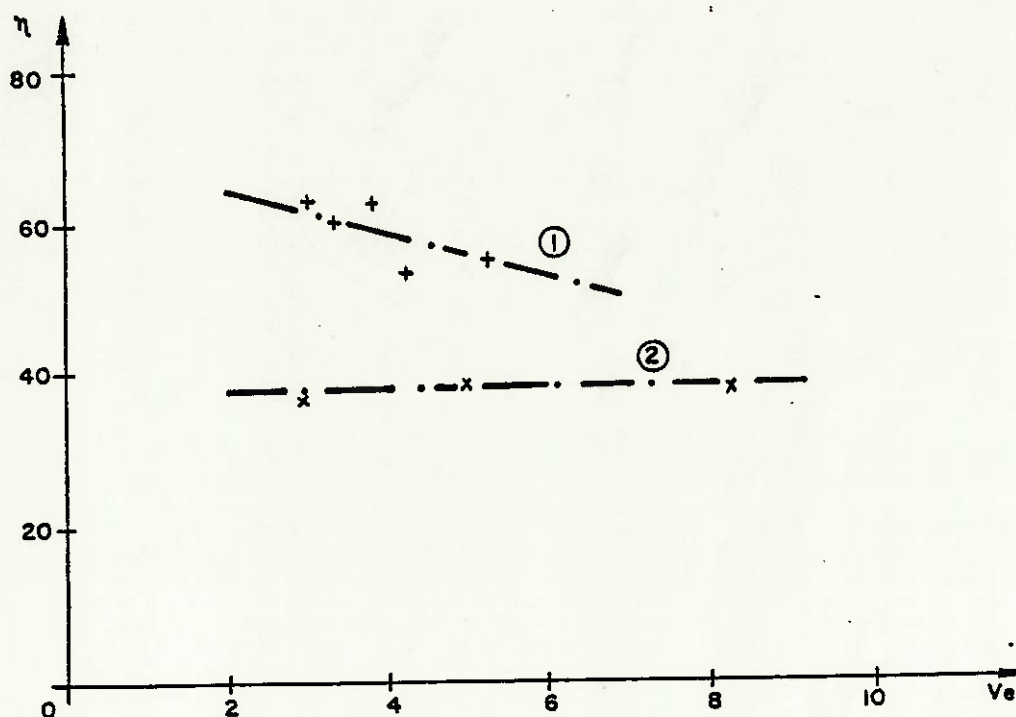


GRÁFICO 2.1 - Rendimento térmico de uma chama em função da vazão, proposto por Rykalin [9]

TABELA 2.1 - Rendimento térmico de uma chama de gás, proposto por Rykalin [9]

Número do bico	1	2	3	4	5	6	7
Diâmetro de saída do bico (mm)	1.0	1.3	1.6	2.0	2.5	3.0	3.5
Vazão (l/h)	150	250	400	600	1000	1700	2600
Comprimento da chama (mm)	9	10	11	12	14	16	17
Rendimento térmico da chama	0.72	0.68	0.51	0.44	0.36	0.30	0.25

No gráfico (2.2), apresentam-se alguns valores do rendimento da chama, propostos por Taniguchi [7].



η = eficiência (%)

V_e = velocidade da fonte (mm/s)

1. = vazão de 1000 l/h

2. = vazão de 2500 l/h

GRÁFICO 2.2 - Variação do rendimento térmico de transmissão em função da velocidade da fonte de calor, proposta por Taniguchi [7]

b) Processo de soldagem a arco elétrico

$$Q = \eta_s \cdot V \cdot I \quad (2.2)$$

onde

V = voltagem do arco.

I = corrente do arco.

η_s = eficiência do arco.

Esta equação representa a quantidade de calor transferida a um corpo metálico, por unidade de tempo, pelo arco elétrico de soldagem.

A eficiência do arco " η_s ", é altamente dependente do processo de soldagem, penetração, formação de gases protetores e vários outros fatores, que dificultam sua determinação. Christensen e sua equipe realizaram medições experimentais extensivas, utilizando um calorímetro (medição do aumento da temperatura da água, após imersão de um corpo de prova metálico recém soldado) [2], e encontraram faixas aproximadas de eficiências de arco para diversos processos de soldagem. Na tabela 2.2 tem-se um resumo dos valores propostos por Christensen. Incluem-se, na mesma tabela, os valores propostos por Rykalin e os de Tsai [2].

De idêntica importância, à magnitude da quantidade de calor total transferida num intervalo de tempo ao material, é a sua distribuição. Rykalin e outros trabalhos de investigação [2], [9], propõem que a forma mais real seria considerar uma distribuição radial gausseana (ver figuras 2.1 e 2.2), que poderia ser expressa pela equação (2.3).

$$q(r) = q_0 \cdot e^{-Cr^2} \quad (2.3)$$

onde

q_0 = máxima intensidade da fonte ao centro da área de calor (ver figura 2.3).

r = distância radial desde o centro da área de calor.

C = coeficiente de concentração da intensidade de calor.

TABELA 2.2 - Valores da eficiência do arco para diferentes processos de soldagem [2]

	CHRISTENSEN	RYKALIN	TSAI
GMAW	-	0.65-0.85	-
Aço doce	0.66-0.70	-	0.80-0.90
Alumínio	0.70-0.85	-	-
SAW	0.90-0.99	0.90-0.99	0.85-0.98
SMAW	-	-	-
Aço doce	0.66-0.85	0.65-0.85	0.55-0.90
ca			
GTAW	-	-	-
Aço doce	0.22-0.48	0.20-0.50	-
ca			
Aço doce	0.36-0.46	0.45-0.75	-
cc			
Alumínio	0.21-0.43	0.20-0.50	-
ca			

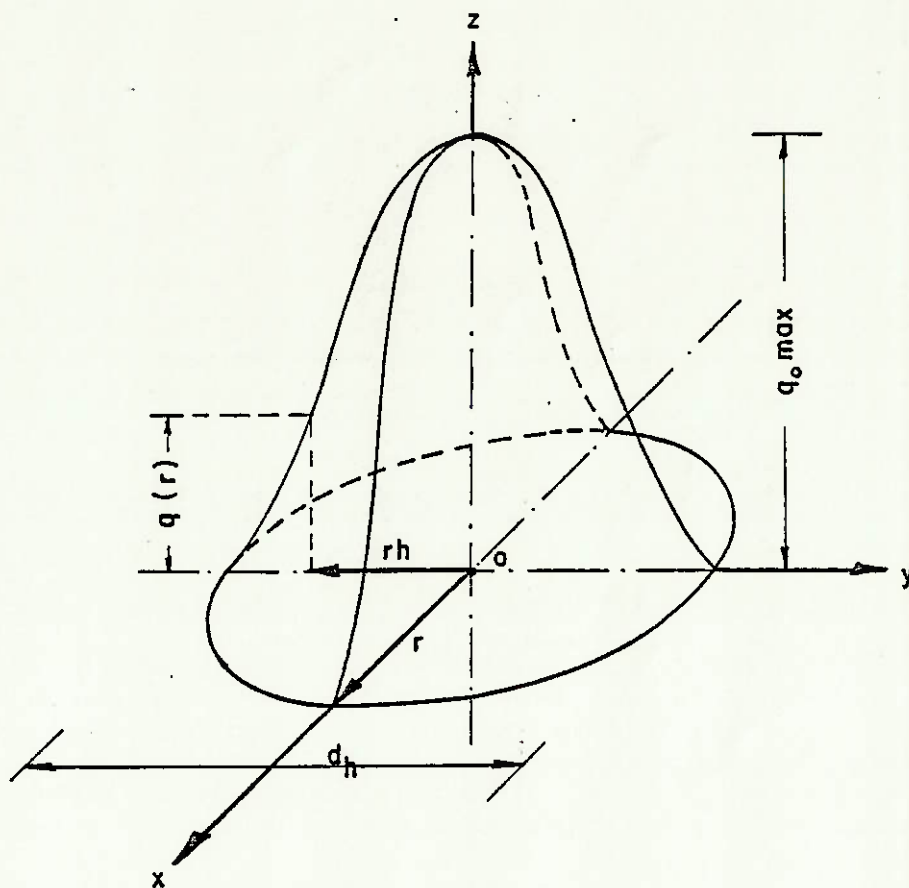


FIGURA 2.1 - Distribuição da intensidade da fonte de calor, proposta por Rykalin [9]

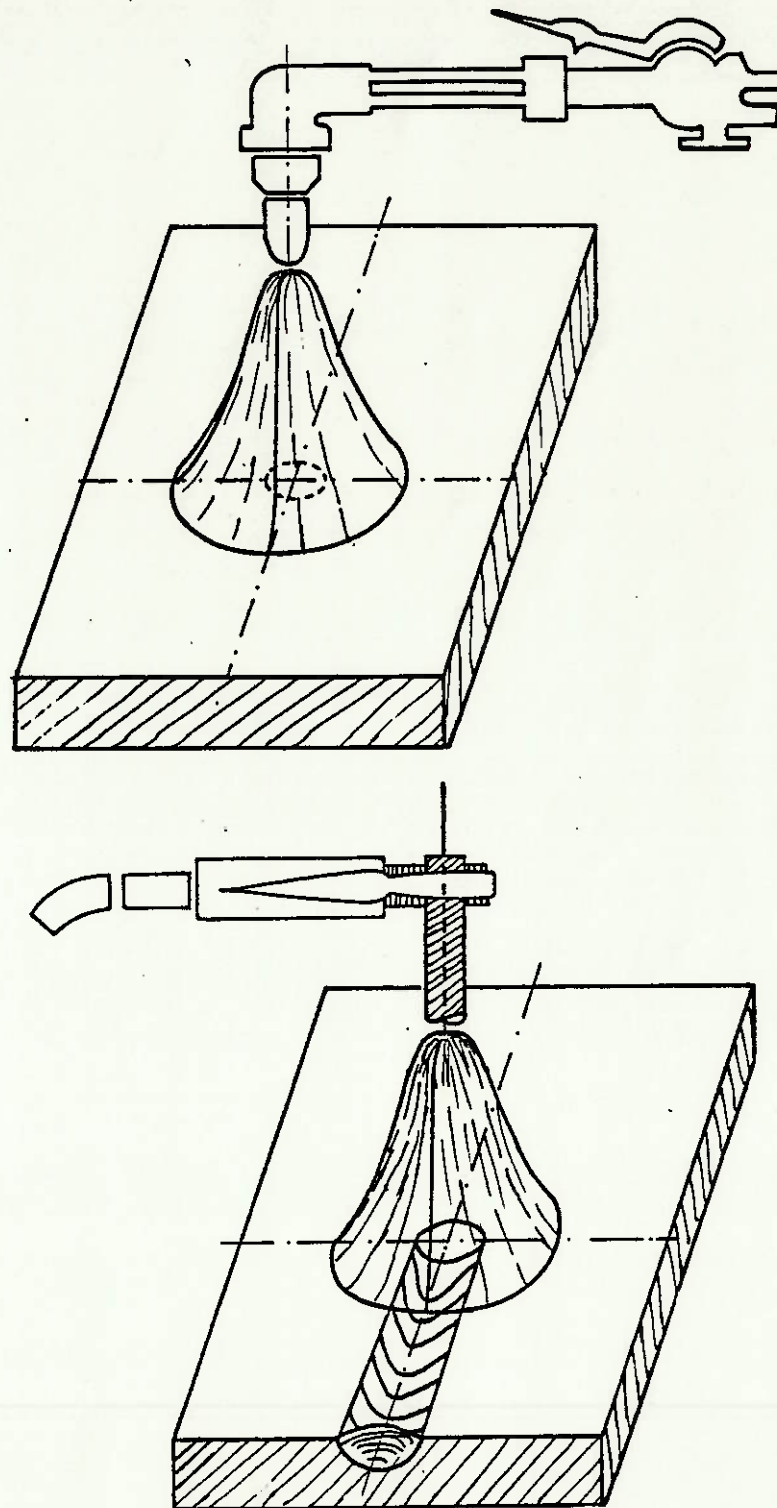


FIGURA 2.2 - Representação esquemática da distribuição da intensidade de calor, transferida a um corpo por uma fonte de calor

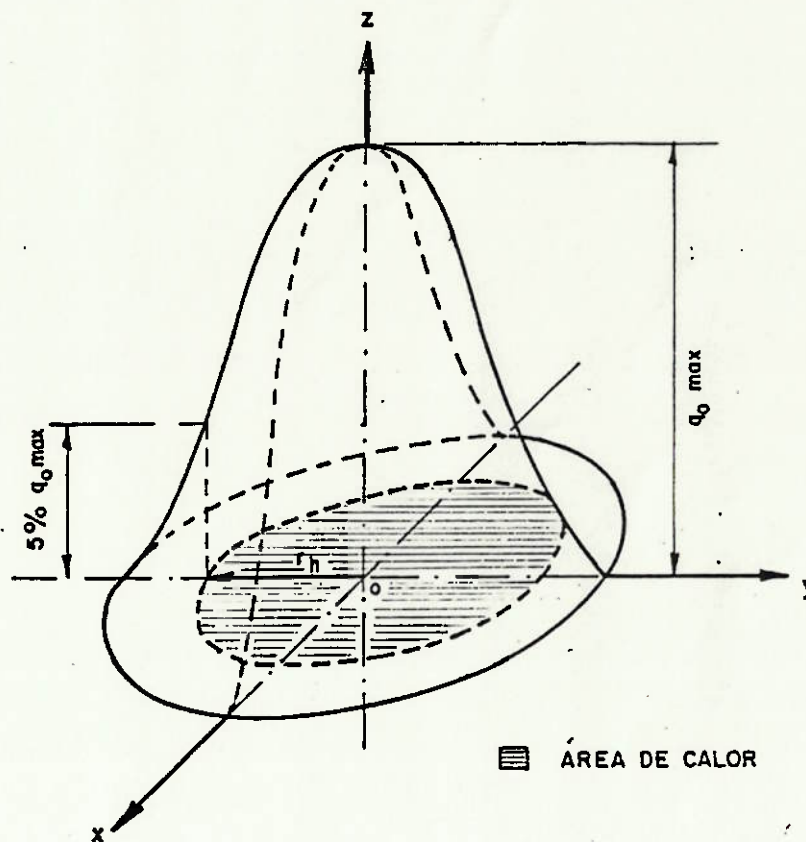


FIGURA 2.3 - Representação esquemática da área de calor [2]

A distância " r_h ", pode ser definida para fins práticos de cálculo, como a distância na qual a intensidade na distribuição de calor da fonte " $q(r)$ " cai para 5% de seu valor máximo " q_0 ", conforme visto na mesma figura (2.3). Assim:

$$q(r_h) = q_0 \cdot e^{-Cr_h^2} = 0.05 q_0$$

e portanto,

$$Cr_h^2 = 3.0$$

Assim, o raio convencional da área de calor é inversamente proporcional à raiz quadrada do coeficiente de concentração

"C". Logo, quanto maior for "C", maior será a concentração da intensidade de calor da fonte e menor será o raio " r_h ", da área de calor.

Se a potência total absorvida pelo material "Q" for conhecida, a função distribuição da equação (2.3), pode ser integrada, resultando

$$Q = \int_0^{\infty} q(r) \cdot 2\pi r \cdot dr$$

ou

$$Q = \pi q_0 / C \quad (2.5)$$

Pode-se então calcular a máxima intensidade de calor no centro da área de calor, ou seja,

$$q_0 = \frac{CQ}{\pi} \quad (2.6)$$

onde "Q" é obtido pelas equações (2.1) e (2.2).

Dados experimentais sobre faixas de valores do coeficiente de concentração de intensidade "C", para diversos processos de soldagem, são mostrados na tabela (2.3) [2].

Na tabela (2.4), mostram-se valores experimentais de coeficientes de concentração da intensidade da fonte "C", calculados por Rykalin [9], para processos com chama.

Todas as equações anteriores são válidas para processos estacionários. Mas durante os processos com chama ou soldagem, a fonte é móvel e inclinada em relação à obra. Esta condição levou Tsai [2] a propor a seguinte formulação em lugar da equação (2.3), para a distribuição da intensidade de calor da fonte:

$$q(r, \xi) = q_0 \cdot e^{-Cr^2 - \lambda v \xi} \quad (2.7)$$

onde

$$2\lambda = 1/\kappa.$$

$$\kappa = \text{difusividade térmica do material.}$$

$$v = \text{velocidade de avanço do arco ou maçarico.}$$

$$\xi = x - v \cdot t, \text{ coordenadas móvel na direção do eixo "x".}$$

TABELA 2.3 - Valores experimentais do coeficiente de concentração da intensidade de calor "C", proposto por Rykalin e Nikolaev para processos de soldagem |1|

PROCESSO DE SOLDA	C (cm^{-2})	POLARIDADE	CORRENTE
GMAW	1.26-1.32	ac	550-1100A
SAW	1.00-2.50	ac	550-1200A
SMAW	1.26-1.32	ac	550-1100A
GTAW, aço	6.00-14.00	dcsp	40-200A
Eletrodo de Carbono	1.00-3.50	dcsp	95-2500A

TABELA 2.4 - Valores experimentais do coeficiente de concentração da intensidade de calor "C", propostos por Rykalin para processos de operação à chama [9]

Número do bico	1	2	3	4	5	6	7	8
Diâmetro de saída do bico (mm)	0.75	1.00	1.30	1.60	2.00	2.50	3.00	3.50
Vazão (l/h).	-	250	250	400	600	1000	1700	2900
Comprimento da chama (mm)	-	9	10	11	12	14	16	17
Coeficiente de concentração "C" (cm ⁻²)	0.68	0.39	0.35	0.31	0.28	0.23	0.20	0.17

(x,y,z) = sistema de coordenadas cartesianas fixas.

t = tempo.

os outros símbolos já foram definidos.

Reescrevendo a equação (2.7) em termos de um sistema de coordenadas cilíndricas móveis tem-se:

$$q(r,\psi) = q_0 \cdot e^{-Cr^2 - \lambda v r \cos\psi} \quad (2.8)$$

onde $\xi = r \cdot \cos\psi$.

A expressão (2.8), representa a distorção da distribuição da intensidade de calor na fonte, devido à inclinação do arco elétrico ou maçarico. A maior intensidade de calor transferido ao corpo localiza-se no ponto,

$$\xi = - \frac{\lambda v}{2C} \quad (2.9)$$

isto é, atrás ou adiante do centro da área de calor da fonte, dependendo de sua inclinação, e terá o valor: (ver figura(2.4))

$$q_{\max} = q_0 \cdot e^{\frac{(\lambda v)^2}{4C}} \quad (2.10)$$

Logicamente " q_{\max} ", será maior que o valor da intensidade de no centro da área de calor " q_0 ".

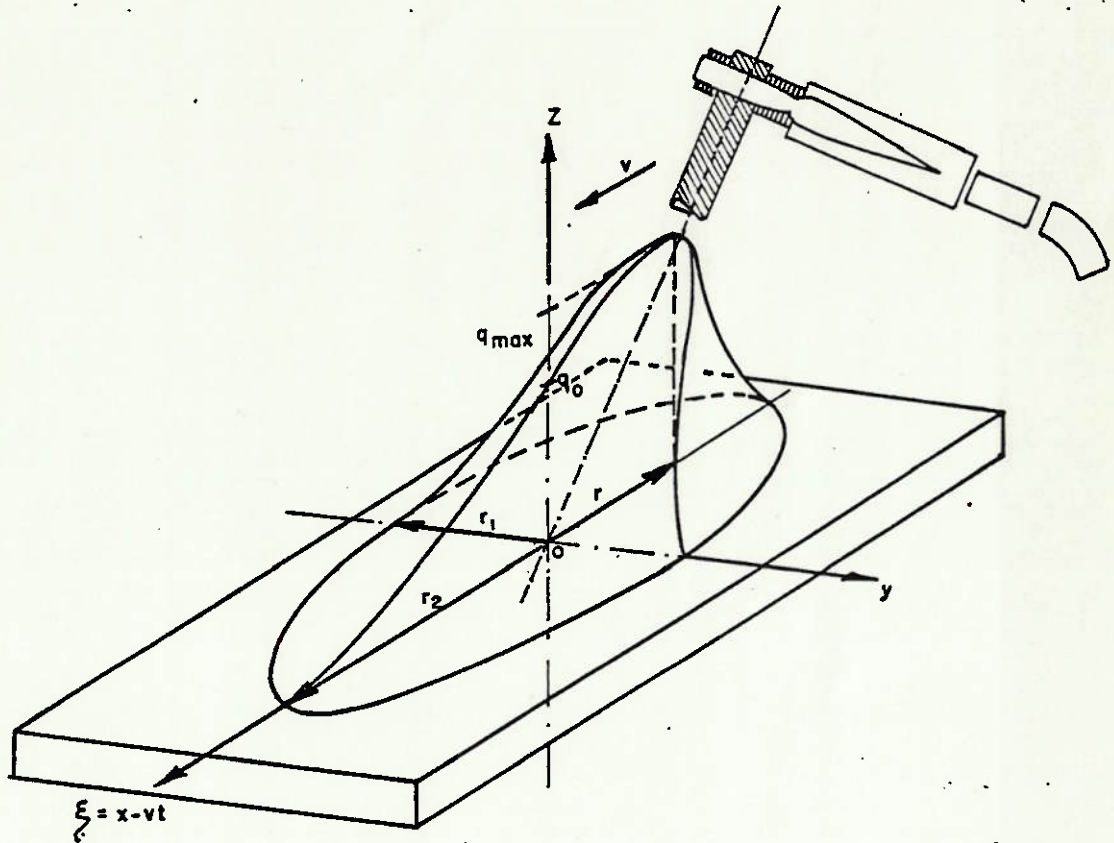


FIGURA 2.4 - Distorção da distribuição da intensidade de calor [9]

O valor " q_0 ", pode ser calculado usando o calor total, por unidade de tempo, transferido ao corpo, da mesma forma como foi efetuada na equação (2.5).

$$Q = 2q_0 \int_0^{r_h} \int_0^{\pi} e^{-Cr^2 - \lambda v r \cos \psi} r dr d\psi \quad (2.11)$$

2.3 - HIPÓTESES UTILIZADAS NA MODELAGEM DO PROBLEMA DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

No desenvolvimento de um modelo matemático, para estimar a distribuição de temperaturas e velocidades de esfriamento durante os processos de operação com chama ou soldagem, é necessário estabelecer certas hipóteses para conciliar os fenômenos físicos às limitações matemáticas. As hipóteses que serão admitidas neste estudo são as seguintes:

1. Estado quase-estacionário (estado no qual a distribuição de temperaturas é estacionária em relação a um observador localizado num sistema de coordenadas que se movimenta com a fonte de fornecimento de calor).
2. O calor será fornecido ao corpo por uma fonte finita, tri-dimensional, inclinada e que tem uma velocidade constante (ver figura (2.4)).
3. A condutibilidade térmica do material será considerada uma função linear da temperatura.
4. A difusividade térmica do material será considerada constante.
5. As perdas de calor nos contornos do corpo, por radiação e convecção, serão consideradas e levadas em conta, no balanço energético.
6. Transformações de fase e efeito Joule serão desprezados.
7. Para levar em conta o pré-aquecimento do corpo, como acontece no caso de soldagem de aços de alta resistência, considera-se que a temperatura inicial do material " θ_0 ", será diferente da temperatura do ambiente " θ_e ".
8. O corpo a ser soldado ou processado com chama terá comprimento infinito, largura e espessura finitas.

2.4 - EQUAÇÃO QUE GOVERNA O FLUXO DE CALOR NOS PROCESSOS DE SOLDAGEM E OPERAÇÕES INDUSTRIAIS COM CHAMA

Aplicando as condições fundamentais de transferência de calor através de um corpo:

- Existe um gradiente de temperaturas entre dois pontos, através dos quais se processa a transferência de calor.
- O fluxo de calor é sempre no sentido da temperatura mais alta para a mais baixa.

obtém-se, para um elemento infinitesimal de corpo em estudo, a equação fundamental do fluxo de calor expressa pela equação, (ver figura 2.5)).

$$\frac{dQ}{dt} = -kA_i \frac{\partial \theta}{\partial u_i} \quad (2.12)$$

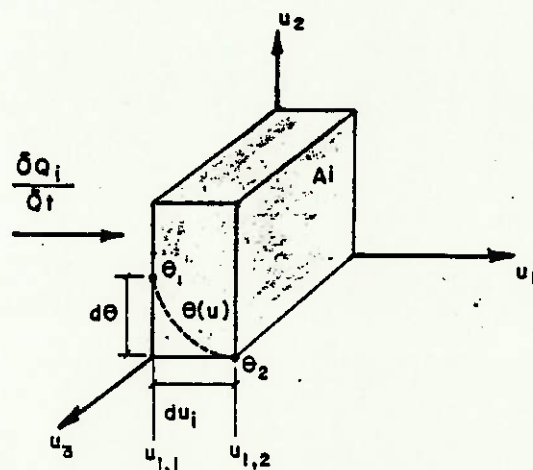


FIGURA 2.5 - Condução linear de calor

Considerando um elemento infinitesimal de volume do corpo em estudo (ver figura (2.6)), e fazendo um balanço de energia, chega-se à equação que governa o fluxo de calor através de um volume elementar de corpo condutor:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) &= \\ = \rho c \frac{\partial \theta}{\partial t} - W_i & \end{aligned} \quad (2.13)$$

onde

$$W_i = \text{fonte}$$

Fazendo

$$T = \theta - \theta_0 \quad (2.14)$$

onde θ_0 = temperatura inicial do corpo;

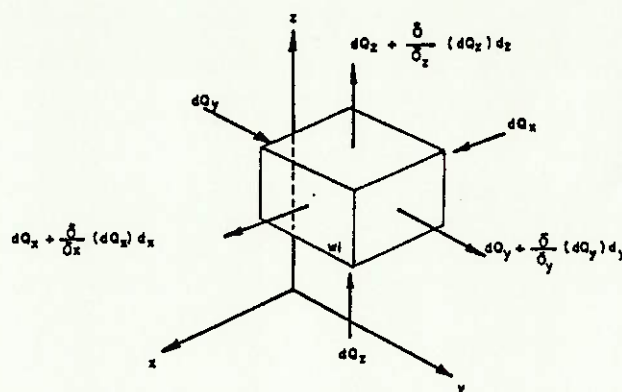


FIGURA 2.6 - Condução de calor através de um elemento infinitesimal de volume

además, usando a transformação de Kirchhoff's [2], e definindo uma nova variável "u", como sendo

$$u = \frac{1}{k_0} \int_0^T k(T) dT \quad (2.15)$$

onde

$$k(T) = k_0(1+\gamma T): \quad (2.16)$$

k_0 = valor da condutibilidade térmica para $T=0^\circ\text{C}$,

γ = coeficiente de variação da condutibilidade,

$k(T)$ = função que descreve a dependência da condutibilidade térmica com a temperatura (por hipótese, considera-se dependência linear);

notando que,

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{k}{k_0} \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.17)$$

a equação (2.13) pode ser reescrita do seguinte modo:

$$\nabla^2 u = \frac{1}{\kappa} \cdot \frac{\partial u}{\partial t} - \frac{1}{k_0} \cdot W_i \quad (2.18)$$

onde $\kappa = k/\rho c$ é a difusividade térmica (suposta constante);

Finalmente, efetuando-se algumas manipulações matemáticas [1] com as equações (2.15) e (2.16), chega-se ao resultado:

$$\theta = \theta_0 + \frac{1}{\gamma} (\sqrt{1+2\gamma u} - 1) \quad (2.19)$$

A equação (2.18), refere-se a um sistema de coordenadas cartesianas (x,y,z) estacionárias, mas nos processos industriais com chama ou soldagem, a fonte de calor está em movimento (ver figura (2.7)). Será necessário, então, definir um sistema de coordenadas móveis, acompanhando a fonte de calor. A transformação utilizada será:

$$\xi = x - v t$$

$$y = y$$

$$z = z$$

onde

v = velocidade.

t = tempo.

(x,y,z) = sistema de coordenadas cartesianas.

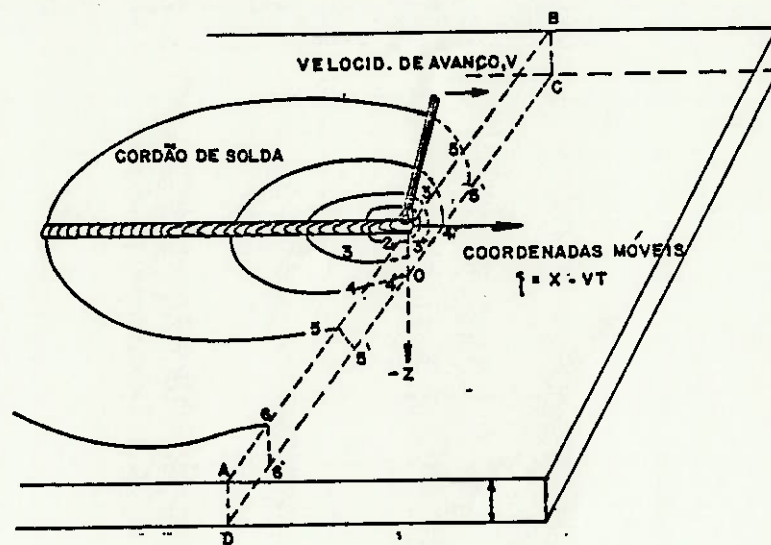


FIGURA 2.7 - Representação esquemática de distribuição de temperaturas numa chapa sendo soldada

Notando que,

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial u}{\partial \xi} \cdot \frac{\partial \xi}{\partial x} = \frac{\partial u}{\partial \xi}$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} \Big|_{SS} = \frac{\partial u}{\partial \xi} \cdot \frac{\partial \xi}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial t} \Big|_{MS} = -v \cdot \frac{\partial u}{\partial \xi} + \frac{\partial u}{\partial t} \Big|_{MS}$$

onde

SS = refere-se ao sistema estacionário.

MS = refere-se ao sistema móvel.

A equação (2.18) pode ser reescrita na forma

$$\frac{\partial^2 u}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = -2\lambda v \frac{\partial u}{\partial \xi} + 2\lambda \frac{\partial u}{\partial t} \Big|_{MS} - \frac{1}{k_0} W_i \quad (2.20)$$

onde $2\lambda = 1/k$.

Como a solução procurada é para um sistema quase-estacionário, a variação temporal do fenômeno de transferência de calor pode ser desprezada. Além disso, se for considerado que o corpo não gera calor internamente (efeito Joule e mudanças de

fase desprezadas, por hipótese), a equação (2.20) torna-se:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + 2\lambda v \frac{\partial u}{\partial \xi} = 0 \quad (2.21)$$

Caso a temperatura inicial " θ_o ", devido a processos de pré-aquecimento do corpo ou outros processos similares, seja diferente a do ambiente " θ_e ", esta condição será levada em conta através de uma nova variável

$$\hat{u} = u + (\theta_o - \theta_e) \quad (2.22)$$

onde

θ_o = temperatura inicial do corpo.

θ_e = temperatura ambiente.

Esta última equação será válida, desde que " \hat{u} ", satisfaça as condições da equação (2.15), e tenha a mesma variação com as temperaturas. Assim, a equação (2.21) pode ser reescrita como:

$$\frac{\partial^2 \hat{u}}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 \hat{u}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \hat{u}}{\partial z^2} + 2\lambda v \frac{\partial \hat{u}}{\partial \xi} = 0 \quad (2.23)$$

Para levar em consideração a distribuição assimétrica das temperaturas ao redor da fonte móvel de calor, é proposta a utilização de uma função exponencial do tipo

$$\hat{u} = e^{-\lambda v \xi} \cdot \phi(\xi, y, z) + (\theta_o - \theta_e) \quad (2.24)$$

Derivando esta equação, manipulando-a matematicamente |1|, e substituindo as expressões encontradas na equação (2.23), obtém-se:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} - (\lambda v)^2 \cdot \phi = 0 \quad (2.25)$$

Em coordenadas cilíndricas (r, ψ, z), as equações (2.24) e (2.25) podem ser reescritas nas formas

$$\bar{u} = e^{-\lambda v \xi} \cdot \phi(r, z) + (\theta_o - \theta_e) \quad (2.26)$$

$$e \quad \frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} - (\lambda v)^2 \cdot \phi = 0 \quad (2.27)$$

onde

$$r^2 = \xi^2 + y^2$$

$$\xi = r \cdot \cos \psi$$

A derivada da função "φ", em relação ao ângulo "ψ", é igual a zero, devido à forma simétrica da equação (2.25). Logo, a equação (2.27) é a equação diferencial que regerá o problema e será resolvida a seguir.

2.5 - CONDIÇÕES DE CONTORNO DO PROBLEMA

Deixando a área de calor (ver figura (2.3)) na superfície superior do corpo (ver figura (2.8)), $z=H$, vê-se que a solução da equação (2.27) pode ser dividida em duas partes:

a) Uma para a parte interna do círculo ($r < r_h$), que se chamará solução interna " $\phi^i(r, z)$ ".

b) E outra para a parte externa do círculo ($r > r_h$), que se denominará solução externa " $\phi^o(r, z)$ ",

Devendo existir uma solução comum na sua interface, onde ($r=r_h$).

Portanto, as condições de contorno para o problema assim dividido serão as seguintes:

Para $r < r_h$

$$k(\theta^i) \cdot \frac{\partial \theta^i}{\partial z} - h_2 \cdot (\theta^i - \theta_e) = 0 \quad ; \quad p/z=0 \quad (2.28a)$$

$$-k(\theta^i) \cdot \frac{\partial \theta^i}{\partial z} + q_o \cdot e^{-Cr^2 - \lambda v \xi} - h_1 \cdot (\theta^i - \theta_e) = 0 \quad ; \quad p/z=H \quad (2.28b)$$

$$\frac{\partial \theta^i}{\partial r} = 0 \quad ; \quad p/r=0 \quad (2.28c)$$

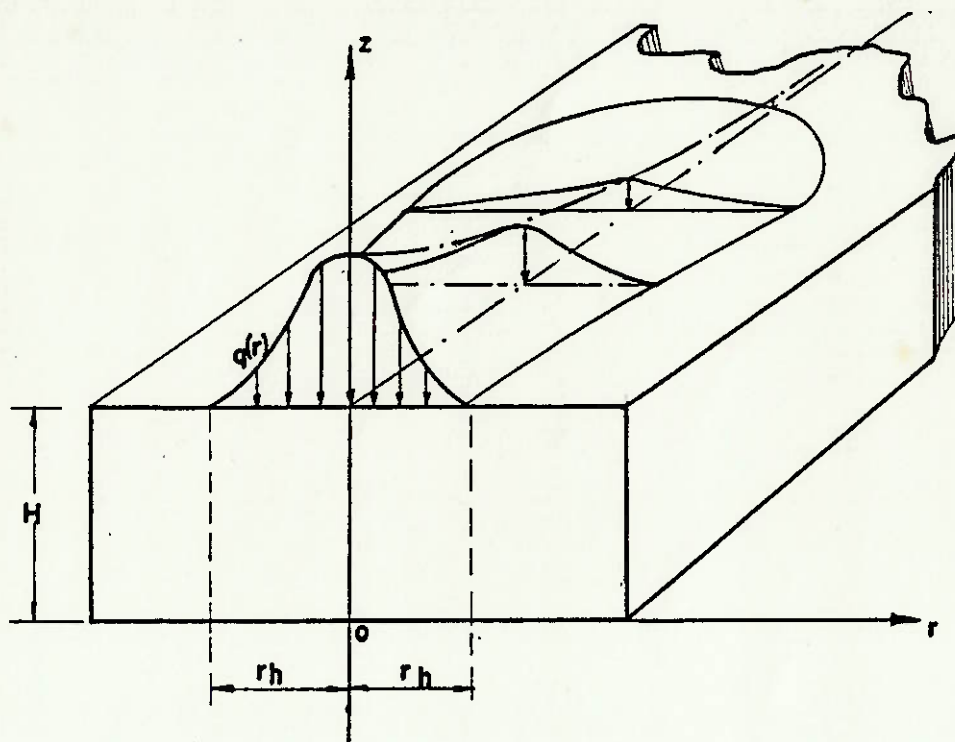


FIGURA 2.8 - Representação geométrica para visualização das condições de contorno do problema de transferência de calor

Para $r > r_h$

$$k(\theta^o) \cdot \frac{\partial \theta^o}{\partial z} - \hat{h}_2 \cdot (\theta^o - \theta_e) = 0 ; \quad p/z=0 \quad (2.28d)$$

$$-k(\theta^o) \cdot \frac{\partial \theta^o}{\partial z} - \hat{h}_1 \cdot (\theta^o - \theta_e) = 0 ; \quad p/z=H \quad (2.28e)$$

$$\theta^o \rightarrow \theta_o ; \quad p/r \rightarrow \infty \quad (2.28f)$$

Para $r = r_h$

$$\theta^i = \theta^o \quad (2.28g)$$

$$\frac{\partial \theta^i}{\partial r} = \frac{\partial \theta^o}{\partial r} \quad (2.28h)$$

onde

\hat{h}_1 = coeficiente de transferência na superfície superior do corpo ($z=H$).

\hat{h}_2 = coeficiente de transferência na superfície inferior do corpo ($z=0$).

Estes dois coeficientes avaliam a quantidade de calor transferida ao meio circundante, nas superfícies superior e inferior, ocasionadas pelos fenômenos de convecção e radiação. Eles são altamente dependentes das temperaturas do ambiente e do corpo, assim como de diversos outros fatores destacando-se entre eles: a velocidade da fonte, o peso específico do material, a pressão atmosférica, as dimensões do corpo, etc. Os coeficientes serão definidos da seguinte forma:

$$\hat{h} = h_c + \sigma \cdot \epsilon \cdot A_f \cdot (\theta^2 + \theta_e^2) \cdot (\theta + \theta_e) \quad (2.29)$$

onde

h_c = coeficiente de película.

σ = constante de Stefan-Boltzman (coeficientes de radiação do corpo negro).

A_f = fator de forma.

ϵ = emissividade da superfície.

θ_e = temperatura do ambiente.

θ = temperatura da superfície do corpo.

O primeiro passo para a linearização das condições de contorno será fazer com que estes dois coeficientes de transferência de calor sejam constantes e iguais a algum valor médio da distribuição total de temperaturas [1]. Estes valores médios, denominar-se-ão " h_1 " e " h_2 " [2], [19].

O segundo passo será transformar as condições de contorno fazendo uso das equações (2.14), (2.15), (2.22), (2.24), para que elas dependam da função " ϕ ", e, depois, linearizá-las. Um exemplo deste procedimento pode ser encontrado na referência [2].

Como resultado, chega-se às seguintes formas de expressar as condições de contorno

Para $r < r_h$

$$\frac{\partial \phi^i}{\partial z} = \frac{h_2}{k_0} \cdot \phi^i \quad ; \quad p/z=0 \quad (2.30a)$$

$$\frac{\partial \phi^i}{\partial z} = \frac{q_0}{k_0} \cdot e^{-Cr^2} - \frac{h_1}{k_0} \cdot \phi^i \quad ; \quad p/z=H \quad (2.30b)$$

$$\frac{\partial \phi^i}{\partial r} = 0 \quad ; \quad p/r=0 \quad (2.30c)$$

Para $r > r_h$

$$\frac{\partial \phi^o}{\partial z} = \frac{h_2}{k_0} \cdot \phi^o \quad ; \quad p/z=0 \quad (2.30d)$$

$$\frac{\partial \phi^o}{\partial z} = - \frac{h_1}{k_0} \cdot \phi^o \quad ; \quad p/z=H \quad (2.30e)$$

$$\phi^o \rightarrow 0 \quad ; \quad p/r \rightarrow \infty \quad (2.30f)$$

Para $r=r_h$

$$\phi^o = \phi^i \quad (2.30g)$$

$$\frac{\partial \phi^o}{\partial r} = \frac{\partial \phi^i}{\partial r} \quad (2.30h)$$

2.6 - DESENVOLVIMENTO DA SOLUÇÃO DO PROBLEMA EM DERIVADAS PARCIAIS

O tratamento do problema em derivadas parciais será conduzido através da divisão idealizada do corpo, submetido a uma fonte de calor, em duas regiões, como foi dito na seção 2.5. Uma região denominada interna ($r < r_h$), onde a solução da equação

(2.27) traduzirá a distribuição de temperaturas nas proximidades da fonte de calor e outra zona, denominada externa ($r > r_h$), onde a solução da equação (2.27) descreverá o fluxo de calor nas regiões afastadas da fonte. Em vista do exposto, deverá existir uma interface ($r = r_h$), onde ambas soluções devem se igualar, assim como suas respectivas derivadas.

Para solucionar a equação diferencial (2.27), utilizar-se-á o método da separação de variáveis [3], fazendo

$$\phi(r, z) = R(r) \cdot Z(z) \quad (2.31)$$

Derivando e substituindo na equação (2.27), tem-se:

$$\frac{1}{R(r)} \cdot \left[R''(r) + \frac{1}{r} \cdot R'(r) \right] - (\lambda v)^2 = \pm \omega^2 \quad (2.32)$$

$$- \frac{1}{Z(z)} \cdot Z''(z) = \pm \omega^2 \quad (2.33)$$

onde o sinal (\pm) será determinado a partir das condições de contorno do problema.

2.6.1 Solução Externa ($r > r_h$)

Para a parte externa da área de calor (ver figura(2.3)), pode-se equacionar o problema da seguinte forma:

a) Equação diferencial:

$$R''(r) + \frac{1}{r} \cdot R'(r) - [\omega^2 + (\lambda v)^2] \cdot R(r) = 0 \quad (2.34)$$

$$Z''(z) + \omega^2 \cdot Z(z) = 0 \quad (2.35)$$

b) Condições de contorno:

$$Z'(0) - \frac{h_2}{k_0} \cdot Z(0) = 0 \quad (2.36a)$$

$$Z^0'(H) + \frac{h_1}{k_0} \cdot Z^0(H) = 0 \quad (2.36b)$$

$$R^0(r) \rightarrow 0 \text{ as } r \rightarrow \infty \quad (2.36c)$$

Nota-se que, na equação (2.35), foi selecionado $(+\omega^2)$, de tal forma que, a função trigonométrica fosse função característica ortogonal na direção "z". Se $(-\omega^2)$ fosse tomado, o resultado seria uma função hiperbólica que não é ortogonal.

Fazendo

$$\zeta^2 = \omega^2 + (\lambda v)^2 \quad (2.37)$$

as soluções gerais das equações (2.34) e (2.35) serão:

$$R^0(r) = A_1 \cdot I_0(\zeta \cdot r) + A_2 \cdot K_0(\zeta \cdot r) \quad (2.38)$$

$$Z^0(z) = B_1 \cdot \sin(\omega \cdot z) + B_2 \cdot \cos(\omega \cdot z) \quad (2.39)$$

onde

A_1, A_2, B_1, B_2 = são constantes arbitrárias.

$I_0(x)$ e $K_0(x)$ = são as funções de Bessel modificadas de primeira e segunda espécie, respectivamente, e de ordem zero.

Aplicando a condição de contorno expressa na equação (2.36c), encontra-se:

$$A_1 = 0$$

Ademais, usando as condições de contorno das equações (2.36a) e (2.36b), a equação (2.39) resultará em:

$$(k_0 \cdot \omega) \cdot B_1 - h_2 \cdot B_2 = 0 \quad (2.40)$$

e

$$\left[\frac{h_1}{k_0} \cdot \sin(\omega H) + \omega \cdot \cos(\omega H) \right] \cdot B_1 +$$

$$+ \left[\frac{h_1}{k_0} \cdot \cos(\omega H) - \omega \cdot \sin(\omega H) \right] \cdot B_2 = 0 \quad (2.41)$$

respectivamente.

Para haver uma solução não trivial para B_1 e B_2 , precisa-se anular o determinante principal do sistema formado pelas equações (2.40) e (2.41), fornecendo uma equação de valores característicos ω_n , com $n=0,1,2,3 \dots$.

$$(k_0^2 \cdot \omega_n^2 - h_1 \cdot h_2) \cdot \tan(\omega_n H) = k_0 \cdot \omega_n \cdot (h_1 + h_2) \quad (2.42)$$

Para o caso de condições adiabáticas ($h_1=h_2=0$), os valores característicos serão dados por:

$$\omega_n = \frac{n\pi}{H} \quad ; \quad \text{com } n=0,1,2,3,\dots \quad (2.43)$$

Em ambas as equações (2.42) e (2.43), o autovalor $\omega_0 = 0$, aparece como sendo um valor que satisfaz às equações mencionadas; para verificar se este valor característico influirá ou não na solução de um ou ambos os casos, usar-se-á o fluxo, através de uma superfície cilíndrica (ver figura (2.9)) com raio $r > r_h$.

Observando a figura (2.9), tem-se:

$$Q(r) = 2 \int_0^H \int_0^\pi -k \cdot \frac{\partial \theta}{\partial r} \cdot r \cdot d\psi \cdot dz$$

e efetuando as substituições adequadas, tem-se:

$$Q(r) = -2 \cdot k_0 \int_0^H \int_0^\pi e^{-\lambda v r \cdot \cos \psi} \cdot R^0'(r) \cdot$$

$$\cdot Z^0(z) \cdot r \cdot d\psi \cdot dz \quad (2.44)$$

ou

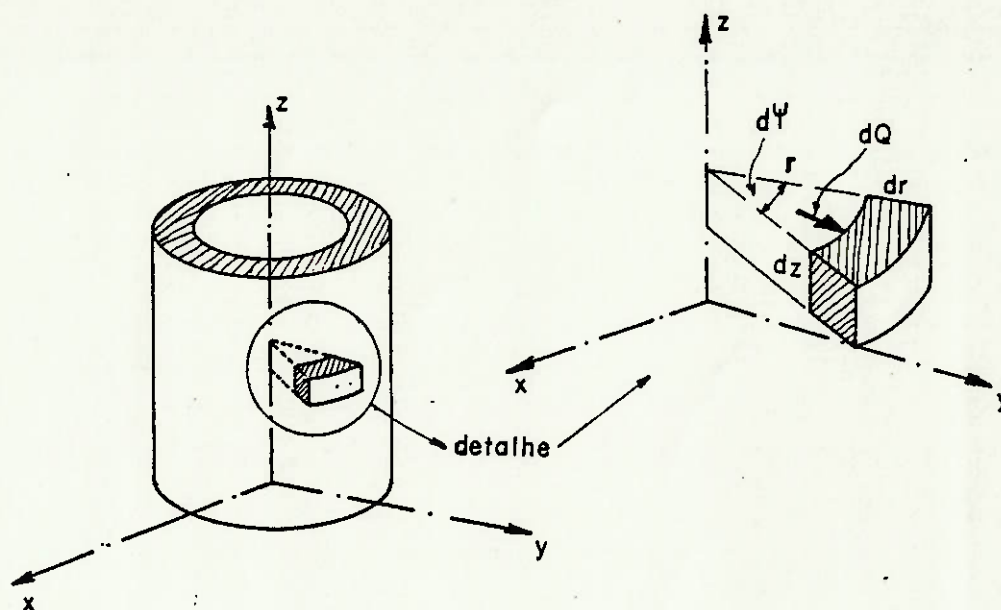


FIGURA 2.9 - Representação do fluxo de calor através de uma superfície elementar de cilindro

$$Q(r) = -2 \cdot k_0 \cdot r \cdot R^{(0)'}(r) \cdot I \cdot P \quad (2.45)$$

onde,

$$I = \int_0^H Z^{(0)}(z) \cdot dz \quad (2.46)$$

e

$$P = \int_0^\pi e^{-\lambda v r \cdot \cos \psi} \cdot d\psi \quad (2.47)$$

A integral "P" é obtida sem maiores dificuldades. Assim, as atenções serão focalizadas na integral "I", que integrada por partes, resultará:

$$I = \frac{1}{k_0 \omega^2} \cdot |h_2 \cdot B_2 + h_1 \cdot B_1 \cdot \sin(\omega H) + h_1 \cdot B_2 \cdot \cos(\omega H)|$$

que, com algumas manipulações algébricas, obter-se-á:

$$I = B_1 \cdot H \cdot \frac{1 - \cos(\omega H)}{\omega H} + B_2 \cdot H \cdot \frac{\sin(\omega H)}{\omega H} \quad (2.48)$$

Para o caso de condições não adiabáticas, a constante B_2 pode ser expressa a partir da equação (2.40), como

$$B_2 = \frac{k_o \omega}{h_2} \cdot B_1$$

logo a equação (2.48) torna-se:

$$I = B_1 \cdot H \cdot \left[\frac{1 - \cos(\omega H)}{\omega H} + \frac{k_o \cdot \omega}{h_2} \cdot \frac{\sin(\omega H)}{\omega H} \right] \quad (2.49)$$

Assim, "I=0", quando " $\omega_o=0$ ", para " B_1 " finito. Portanto, o valor característicos " $\omega_o=0$ " e suas funções características associadas não contribuem para a transferência de calor; logo, podem ser desprezados [1]. Conseqüentemente, podem se escrever as funções características a partir das equações (2.39) e (2.40), da seguinte maneira:

$$\frac{h_2}{k_o \cdot \omega_n} \cdot \sin(\omega_n z) + \cos(\omega_n z) ; \text{ com } n=1,2,3,\dots$$

Em face do exposto, a solução denominada externa pode ser expressa através da seguinte equação:

$$\phi^o(r,z) = \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cdot K_o(\zeta_n r) \cdot \left[\frac{h_2}{k_o \cdot \omega_n} \cdot \sin(\omega_n z) + \cos(\omega_n z) \right] \quad (2.50)$$

onde, $C_n = A_{2n} \cdot B_{2n}$; com $n=1,2,3,\dots$

Para o caso de condições adiabáticas, $h_1=h_2=0$, obtém-se da equação (2.40),

$$B_1 = 0$$

e a equação (2.48) torna-se:

$$I = B_2 H \cdot \frac{\sin(\omega H)}{\omega H} \quad (2.51)$$

Quando " $\omega_0 = 0$ ", a integral "I" (equação (2.51)) se reduzirá a

$$I = B_2 \cdot H$$

que é finita e distinta de zero, sendo então necessário incluir o valor característico zero na solução. Os valores característicos agora são dados por:

$$\cos(n\pi z/H) \quad ; \quad \text{com } n=0,1,2,3,\dots$$

A solução denominada externa será então expressa na forma:

$$\phi^0(r,z) = C_0 \cdot K_0(\lambda v r) + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cdot K_0(\zeta_n \cdot r) \cdot \cos\left(\frac{n\pi z}{H}\right) \quad (2.52)$$

com

$$C_n = A_{2n} \cdot B_{2n} \quad ; \quad \text{para } n=1,2,3,\dots$$

Para avaliar a constante " C_0 ", a equação (2.45) será aplicada para " $r=r_h$ "; já que neste caso não se tem perdas de calor na superfície. Logo,

$$Q(r_h) = Q$$

Assim, após algumas transformações algébricas, chega-se a:

$$C_0 = \frac{Q}{2 \cdot k_0 \cdot \lambda v \cdot r_h \cdot H \cdot K_1(\lambda v r_h) \cdot P} \quad (2.53)$$

onde

Q = potência total absorvida pelo corpo.

$K_1(x)$ = função modificada de Bessel de segunda espécie e ordem um.

P = integral calculada pela equação (2.47).

2.6.2 Solução Interna ($r < r_h$)

No domínio interno da área de calor, nota-se que existem duas condições de contorno homogêneas e duas não homogêneas (em $r=r_h$ e $z=H$), tornando o método da separação de variáveis inaplicável. O fato de ser um problema linear permite a aplicação do princípio de superposição, tornando possível a divisão da solução, denominada interna, em duas partes (ver figura (2.10)):

$$\phi^i(r,z) = \phi_I^i(r,z) + \phi_{II}^i(r,z) \quad (2.54)$$

tendo, portanto cada parte, apenas uma condição de contorno não homogênea.

2.6.2.1 Primeira parte da solução interna ($\phi_I^i(r,z)$)

Das equações (2.32) e (2.33), a constante " $-\omega^2$ " foi escolhida, a fim de se ter funções de Bessel como funções características em "r". Logo, as equações que regem o problema serão:

$$R_I^{i''}(r) + \frac{1}{r} \cdot R_I^{i'}(r) + \delta^2 \cdot R_I^i(r) = 0 \quad (2.55)$$

e

$$Z_I^{i''}(z) - \chi^2 \cdot Z_I^i(z) = 0 \quad (2.56)$$

onde

$\chi = \omega$, das equações (2.32) e (2.33).

$$\delta^2 = \chi^2 - (\lambda v)^2 \quad (2.57)$$

As condições de contorno podem ser expressas a partir das equações (2.30a), (2.30b), (2.30c) e com o auxílio da figura (2.10). Assim,

$$R_I^{i'}(0) = 0 \quad (2.58a)$$

$$R_I^i(r_h) = 0 \quad (2.58b)$$

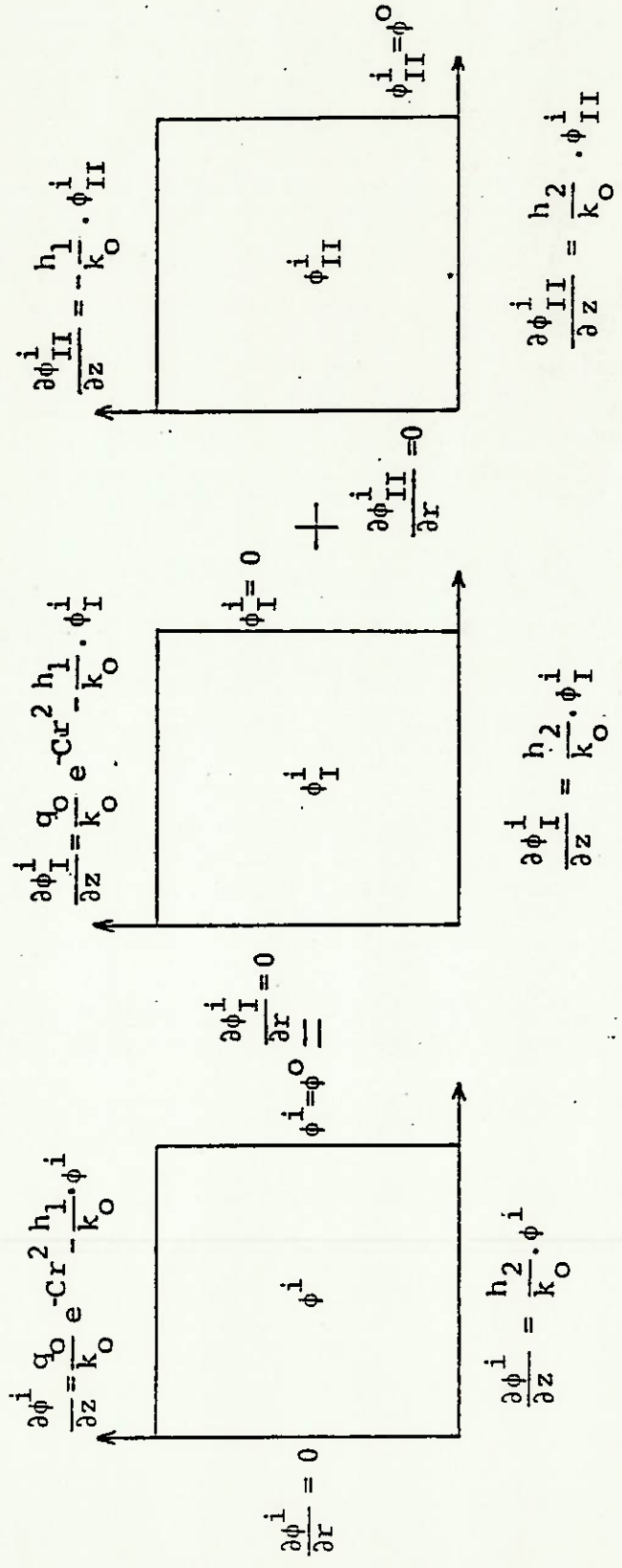


FIGURA 2.10 - Representação esquemática da superposição adotada na solução interna

$$Z_I^i(0) - \frac{h_2}{k_0} \cdot Z_I^i(0) = 0 \quad (2.58c)$$

O problema em derivadas parciais apresentado acima, terá a seguinte solução:

$$R_I^i(r) = A_1^* \cdot J_0(\delta_n r) + A_2^* \cdot Y_0(\delta_n r) \quad (2.59)$$

$$Z_I^i(r) = B_1^* \cdot \sinh(\chi_n z) + B_2^* \cdot \cosh(\chi_n z) \quad (2.60)$$

onde:

$A_1^*, A_2^*, B_1^*, B_2^*$ = constantes arbitrárias.

$J_0(x)$ e $Y_0(x)$ = funções de Bessel de primeira e segunda espécie, respectivamente, e ordem zero.

Derivando a equação (2.59) e aplicando a condição de contorno da equação (2.58a), obtém-se:

$$A_2^* = 0$$

Além disso, utilizando a condição expressa em (2.58b) na equação (2.59), tem-se:

$$J_0(\delta_n \cdot r_h) = 0 \quad ; \text{ com } n=1,2,3,\dots \quad (2.61)$$

isto é, os valores característicos (autovalores) " δ_n ", podem ser encontrados a partir das raízes de " $J_0(x)$ ". Finalmente, aplicando a condição expressa em (2.58c) na equação (2.60), resulta:

$$B_1^* = \frac{h_2}{\chi \cdot k_0} \cdot B_2^* \quad (2.62)$$

Com isto, a primeira parte da solução interna tomará a forma

$$\phi_I^i(r, z) = \sum_{n=1}^{\infty} D_n \cdot J_0(\delta_n r) \cdot \left[\frac{h_2}{\chi_n \cdot k_0} \cdot \sinh(\chi_n z) + \cosh(\chi_n z) \right] \quad (2.63)$$

Para se encontrar o valor constante "D_n", aplica-se a condição observada na figura (2.10):

$$\frac{\partial \phi_I^i(r, H)}{\partial z} = \frac{q_0}{k_0} \cdot e^{-Cr^2} - \frac{h_1}{k_0} \cdot \phi_I^i(r, H) \quad (2.64)$$

Derivando a equação (2.63) e substituindo-a na equação (2.64) resulta:

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^{\infty} D_n \cdot J_0(\delta_n r) \cdot \chi_n \cdot \left[\frac{h_2}{\chi_n \cdot k_0} \cdot \cosh(\chi_n H) + \sinh(\chi_n H) \right] &= \\ = \frac{q_0}{k_0} \cdot e^{-Cr^2} - \frac{h_1}{k_0} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} D_n \cdot J_0(\delta_n r) \cdot & \\ \cdot \left[\frac{h_2}{\chi_n \cdot k_0} \cdot \sinh(\chi_n H) + \cosh(\chi_n H) \right] & \end{aligned} \quad (2.65)$$

Multiplicando ambos os membros da equação (2.65) por

$$r \cdot J_0(\delta_m r)$$

integrando-os entre os valores limites "zero" e "r_h", e utilizando as propriedades de ortogonalidade das funções de Bessel [1]:

$$\int_0^{r_h} r \cdot J_0(\delta_n r) \cdot J_0(\delta_m r) dr = 0 ; \text{ se } \delta_m \neq \delta_n$$

$$\int_0^{r_h} r \cdot J_0(\delta_n r) \cdot J_0(\delta_m r) dr = \frac{r_h^2}{2} \cdot J_1^2(\delta_n r_h); \text{ se } \delta_m = \delta_n$$

onde $J_1(x)$ é a função de Bessel de primeira espécie e ordem um, encontra-se o valor da constante " D_n ", que tomará a seguinte forma:

$$D_n = \frac{2 \cdot q_0 K_n}{k_0 J_1^2(\delta_n r_h) \cdot \left[\left(\frac{h_1 + h_2}{k_0} \right) \cdot \cosh(\chi_n H) + \left(\chi_n + \frac{h_1 h_2}{\chi_n \cdot k_0^2} \right) \cdot \sinh(\chi_n H) \right]} \quad (2.66)$$

onde

$$K_n = \int_0^1 x \cdot e^{-C \cdot r_h^2 \cdot x^2} \cdot J_0(\delta_n \cdot r_h \cdot x) \cdot dx \quad (2.67)$$

Portanto, a primeira parte da solução interna será:

$$\begin{aligned} \phi_I^i(r, z) &= \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \cdot q_0 \cdot K_n \cdot J_0(\delta_n r) \cdot [h_2 \cdot \sinh(\chi_n z) + k_0 \cdot \chi_n \cdot \cosh(\chi_n z)]}{J_1^2(\delta_n r_h) \cdot [k_0 \chi_n \cdot (h_1 + h_2) \cdot \cosh(\chi_n H) + (k_0^2 \chi_n^2 + h_1 h_2) \cdot \sinh(\chi_n H)]} \quad (2.68) \end{aligned}$$

Para condições adiabáticas de contorno ($h_1 = h_2 = 0$), a equação (2.68) torna-se:

$$\phi_I^i(r, z) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2 \cdot q_0 K_n \cdot J_0(\delta_n r) \cdot \cosh(\chi_n z)}{k_0 \chi_n \cdot J_1^2(\delta_n r_h) \cdot \sinh(\chi_n H)} \quad (2.69)$$

2.6.2.2 Segunda parte da solução interna ($\phi_{II}^i(r, z)$)

Nota-se que as condições de contorno são similares às da solução externa, logo, a solução geral da segunda parte deverá ser similar às equações (2.38) e (2.39), isto é:

$$R_{II}^i(r) = \hat{A}_1 \cdot I_0(\bar{\zeta} \cdot r) + \hat{A}_2 \cdot K_0(\bar{\zeta} \cdot r) \quad (2.70)$$

$$Z_{II}^i(z) = \hat{B}_1 \cdot \sin(\bar{\omega} \cdot z) + \hat{B}_2 \cdot \cos(\bar{\omega} \cdot z) \quad (2.71)$$

onde:

$\hat{A}_1, \hat{A}_2, \hat{B}_1, \hat{B}_2 =$ constantes arbitrárias.

$$\bar{\zeta}^2 = \bar{\omega}^2 + (\lambda v)^2 \quad (2.72)$$

As condições de contorno podem ser obtidas a partir da figura (2.10):

$$R_{II}^{i'}(0) = 0 \quad (2.73a)$$

$$Z_{II}^{i'}(0) - \frac{h_2}{k_0} \cdot Z_{II}^i(0) = 0 \quad (2.73b)$$

$$Z_{II}^{i'}(H) + \frac{h_1}{k_0} \cdot Z_{II}^i(H) = 0 \quad (2.73c)$$

Aplicando a condição (2.73a), obtém-se:

$$\hat{A}_2 = 0$$

Usando as outras duas condições de contorno, e por uma aproximação similar à efetuada para a solução externa, chega-se às seguintes equações:

$$\hat{B}_1 = \frac{h_2}{\bar{\omega} \cdot k_0} \cdot \hat{B}_2 \quad (2.74)$$

e

$$\tan(\bar{\omega}_n \cdot H) = \frac{k_0^2 \cdot \bar{\omega}_n \cdot (h_1 + h_2)}{k_0^2 \cdot \bar{\omega}_n^2 - h_1 \cdot h_2} \quad ; \text{ com } n=1,2,3,\dots \quad (2.75)$$

Comparando estas últimas equações com as equações (2.41a) e (2.41b), conclue-se que:

$$\bar{\zeta}_n = \delta_n \quad ; \quad \text{com } n = 1, 2, 3, \dots \quad (2.76)$$

$$\bar{\omega}_n = \omega_n$$

Portanto, a segunda parte da solução interna pode ser escrita

$$\phi_{II}^i(r, z) = \sum_{n=1}^{\infty} E_n \cdot I_0(\zeta_n r) \cdot \left[\frac{h_2}{\omega_n \cdot k_0} \cdot \sin(\omega_n z) + \cos(\omega_n z) \right] \quad (2.77)$$

Para condições de contorno adiabáticas ($h_1 = h_2 = 0$), tem-se:

$$\begin{aligned} \phi_{II}^i(r, z) = & E_0 \cdot I_0(\lambda r) + \\ & + \sum_{n=1}^{\infty} E_n \cdot I_0(\zeta_n r) \cdot \cos\left(\frac{n\pi z}{H}\right) \end{aligned} \quad (2.78)$$

2.6.3 Condições de compatibilidade entre as soluções interna e externa ($r=r_h$)

A primeira condição a ser satisfeita será a igualdade das soluções externa e interna, ou seja (ver figura 2.10)),

$$\phi^o(r_h, z) = \phi_{II}^i(r_h, z) \quad (2.79)$$

Usando as equações (2.50) e (2.77) e igualando-as, tem-se:

$$\begin{aligned} & \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cdot K_0(\zeta_n r_h) \cdot \left[\frac{h_2}{\omega_n \cdot k_0} \cdot \sin(\omega_n z) + \cos(\omega_n z) \right] = \\ & = \sum_{n=1}^{\infty} E_n I_0(\zeta_n r_h) \cdot \left[\frac{h_2}{\omega_n \cdot k_0} \cdot \sin(\omega_n z) + \cos(\omega_n z) \right] \end{aligned} \quad (2.80)$$

Concluindo-se que,

$$E_n = \frac{K_0(\zeta_n r_h)}{I_0(\zeta_n r_h)} \cdot C_n \quad ; \quad \text{com } n=1,2,3,\dots \quad (2.81)$$

Trabalhando com as equações (2.54), (2.68) e (2.77), pode-se conhecer a solução interna completa

$$\begin{aligned} \phi^i(r,z) = & \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{2 \cdot q_0 \cdot K_n J_0(\delta_n r) \cdot [h_2 \cdot \sinh(\chi_n z) + k_0 \cdot \chi_n \cdot \cosh(\chi_n z)]}{J_1^2(\delta_n r_h) \cdot [k_0 \chi_n (h_1 + h_2) \cdot \cosh(\chi_n H) + (k_0^2 \chi_n^2 h_1 h_2) \cdot \sinh(\chi_n H)]} + \right. \\ & \left. + C_n K_0(\zeta_n r_h) \cdot \frac{I_0(\zeta_n r)}{I_0(\zeta_n r_h)} \cdot \left[\frac{h_2}{\omega_n \cdot k_0} \cdot \sin(\omega_n z) + \cos(\omega_n z) \right] \right] \end{aligned} \quad (2.82)$$

Para o caso de condições adiabáticas ($h_1 = h_2 = 0$), uma solução interna pode ser escrita similarmente

$$\begin{aligned} \phi_i(r,z) = & \frac{Q}{2 \cdot k_0 \cdot \lambda v \cdot r_h \cdot H \cdot P} \cdot \frac{K_0(\lambda v r_h)}{K_1(\lambda v r_h)} \cdot \frac{I_0(\lambda v r)}{I_0(\lambda v r_h)} + \\ & + \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{2 \cdot q_0 \cdot K_n J_0(\delta_n r) \cdot \cosh(\chi_n z)}{k_0 \cdot \chi_n \cdot J_1^2(\delta_n r_h) \cdot \sinh(\chi_n H)} + C_n K_0(\zeta_n r_h) \cdot \frac{I_0(\zeta_n r)}{I_0(\zeta_n r_h)} \cdot \cos(\omega_n z) \right] \end{aligned} \quad (2.83)$$

A segunda condição na seção de interface será:

$$\frac{\partial \phi^0(r_h, z)}{\partial r} = \frac{\partial \phi^i(r_h, z)}{\partial r} \quad (2.84)$$

Derivando e igualando as equações (2.50) e (2.82) e aplicando as seguintes condições de ortogonalidade

$$\int_0^H \left[\frac{h_2}{\delta_n \cdot k_0} \cdot \sin(\omega_n z) + \cos(\omega_n z) \right] \cdot \left[\frac{h_2}{\omega_m \cdot k_0} + \sin(\omega_m z) + \cos(\omega_m z) \right] dz = 0 ; \text{ se } \omega_m \neq \omega_n$$

e

$$\int_0^H \left[\frac{h_2}{\omega_n \cdot k_0} \cdot \sin(\omega_n z) + \cos(\omega_n z) \right]^2 dz = \frac{H}{2} \left(1 + \frac{h_2^2}{\omega_n^2 \cdot k_0^2} \right) + \frac{1}{4\omega_n} \left(1 - \frac{h_2^2}{\omega_n^2 \cdot k_0^2} \right) \cdot \sin(2\omega_n H) + \frac{h_2}{\omega_n^2 \cdot k_0} \cdot \sin^2(\omega_n H)$$

$$\text{Se } \omega_m = \omega_n$$

encontram-se os valores das constantes "C_n"

$$C_n = \frac{1}{a_n} \cdot \sum_{m=1}^{\infty} \frac{2 \cdot q_0 \cdot K_m \delta_m \cdot [r_{mn} \cdot \tanh(\chi_m H) + s_{mn}]}{(\chi_m^2 + \omega_n^2) \cdot (J_1(\delta_m r_h)) \cdot [d_m + e_m \cdot \tanh(\chi_m H)]} \quad (2.85)$$

com n=1,2,3,...

onde:

$$a_n = b_n \cdot c_n \quad (2.86)$$

$$c_n = \frac{H}{2} \cdot \left(1 + \frac{h_2^2}{\omega_n^2 \cdot k_0^2} \right) + \frac{1}{4\omega_n} \cdot \left(1 - \frac{h_2^2}{\omega_n^2 \cdot k_0^2} \right) \cdot \sin(2\omega_n H) + \frac{h_2}{\omega_n^2 \cdot k_0} \cdot \sin^2(\omega_n H) \quad (2.87)$$

$$b_n = \zeta_n \cdot \left[K_1(\zeta_n r_h) + K_0(\zeta_n r_h) \cdot \frac{I_1(\zeta_n r_h)}{I_0(\zeta_n r_h)} \right] \quad (2.88)$$

$$d_m = k_o \cdot \chi_m \cdot (h_1 + h_2) \quad (2.89)$$

$$e_m = k_o^2 \cdot \chi_m^2 + h_1 \cdot h_2 \quad (2.90)$$

$$r_{mn} = h_2 \cdot \left(\omega_n + \frac{\chi_m^2}{\omega_n} \right) \cdot \sin(\omega_n H) + \left(k_o \chi_m^2 - \frac{h_2^2}{k_o} \right) \cdot \cos(\omega_n H) \quad (2.91)$$

$$s_{mn} = \chi_m \cdot \left(k_o \omega_n + \frac{h_2^2}{k_o \cdot \omega_n} \right) \cdot \sin(\omega_n H) \quad (2.92)$$

No caso de condições adiabáticas ($h_1=h_2=0$), as constantes " C_n " serão dadas pela equação:

$$C_n = (-1)^n \cdot \frac{4q_o}{k_o \cdot H \cdot b_n} \cdot \sum_{m=1}^{\infty} \frac{K_m \cdot \delta_m}{(\chi_m^2 + \omega_n^2) \cdot J_1(\delta_m r_h)} ; \text{ com } n=1,2,3,\dots \quad (2.93)$$

Finalmente, de todo o desenvolvimento efetuado, conclui-se que

- a) Se a condutibilidade térmica é considerada constante ($\gamma=0$), as distribuições de temperaturas num corpo serão calculadas mediante a equação:

$$\theta = \theta_o + e^{-\lambda v \xi} \cdot \phi(r, z) \quad (2.94)$$

b) Nos casos em que a condutibilidade térmica varie linearmente com a temperatura, as distribuições de temperaturas num corpo serão calculadas empregando a equação (2.19).

$$\theta = \theta_0 + \frac{1}{\gamma} \cdot (\sqrt{1+2\gamma \cdot e^{-\lambda v \xi} \cdot \phi(r,z)} - 1) \quad (2.95)$$

CAPÍTULO 3

CARACTERÍSTICAS GERAIS DAS LIGAS DE ALUMÍNIO E CONSEQÜÊNCIAS DAS VARIAÇÕES DE TEMPERATURA NAS SUAS PROPRIEDADES

O interesse principal deste trabalho, como foi referido, visa estimar através de técnicas numéricas a distribuição de temperaturas num corpo metálico de determinado formato e dimensões. Assim sendo, utilizar-se-ão chapas grossas de alumínio para a consecução de resultados experimentais sistemáticos, que possam conduzir a uma apreciação crítica e pormenorizada dessas técnicas.

Não se pretende considerar aqui os fenômenos metalúrgicos envolvidos nas operações industriais com chama ou soldadas das ligas de alumínio, embora todos os problemas metalúrgicos no processamento desse metal, tais como ligação, tratamento térmico, mudanças de fases não equilibradas, metalurgia física, etc., sejam encontrados durante as operações mencionadas.

Do ponto de vista prático, no entanto, é desejável conhecer resumidamente:

- 1) Que dificuldades e defeitos surgirão no alumínio e ligas durante as operações industriais a chama ou soldagem; e
- 2) Como o calor da fonte afetará o metal base.

Portanto, neste capítulo será mostrado sucintamente a especificação, os elementos adicionados, as conseqüências da adição e as características gerais do alumínio, assim como as propriedades físicas dependentes da temperatura e algumas características e propriedades gerais das ligas de alumínio (AA/ASTM 1050 e 5052) que serão utilizadas nos levantamentos experimentais.

3.1 - CARACTERÍSTICAS GERAIS DO ALUMÍNIO

O alumínio cristaliza-se no sistema cúbico de faces centradas. O parâmetro da rede cristalina à temperatura de 20°C é igual a 4,04 Å, sendo o raio atômico igual a 1,43 Å. Ele não possui modificações alotrópicas, mas verifica uma grande condutibilidade térmica e elétrica, além de um elevado calor latente de fusão.

A baixa densidade e o baixo ponto de fusão, constituem as mais notáveis características desse metal, destacando-se também a ductilidade, a maleabilidade e a trabalhabilidade, como também, seu caráter anti-faixa e anti-magnético.

As propriedades específicas do material são a elevada plasticidade e reduzida resistência mecânica. Nas tabelas 3.1 e 3.2 apresentam-se as características físicas e propriedades mecânicas fundamentais deste metal.

É um excelente refletor e radiador de energia, sendo maiores estas particularidades para longos comprimentos de onda (baixas frequências) do que para comprimentos menores (altas frequências).

Pela sua grande afinidade com o oxigênio, o alumínio sofre muito pouca corrosão quando exposto ao ar e em alguns outros meios, fenômeno que se explica pela formação, na superfície em contato, de uma película de óxido de alumínio (Al_2O_3) com espessura aproximada de 100 Å, que protege o metal contra a corrosão. Quanto mais puro for o alumínio e mais isento estiver de impurezas, mais elevada é a sua resistência à corrosão. Ele é pouco atacado pelos ácidos orgânicos mais resiste à ação dos ácidos inorgânicos quando esses forem de baixa concentração [26].

3.2 - IDENTIFICAÇÃO DAS LIGAS DE ALUMÍNIO

Não existe um padrão internacionalmente reconhecido de

TABELA 3.1 - PROPRIEDADES FÍSICAS FUNDAMENTAIS DO ALUMÍNIO |26||42|

PROPRIEDADES	VALOR	UNIDADES
Número atômico	13,0	-
Peso atômico	27,0	-
Valência	3,0	-
Massa específica (absoluta) a 20°C	2,7	g/cm ³
Temperatura de fusão	660,0	°C
Temperatura de ebulição	2327,0	°C
Diâmetro atômico	3,2	Å
Calor latente de fusão	94,0	Kcal.g ⁻¹
Calor específico a °C	2,2*10 ⁻⁴	Kcal.g ⁻¹ °C ⁻¹
Condutibilidade térmica a 25°C	5,6*10 ⁻⁴	Kcal.cm ⁻¹ .s ⁻¹ .°C ⁻¹
Coefficiente de dilatação linear a 25 °C	24,3*10 ⁻⁶	-
Resistividade elétrica a 20°C	2,7*10 ⁻⁶	Ω.cm

TABELA 3.2 - PROPRIEDADES MECÂNICAS DO ALUMÍNIO |12||25|

PROPRIEDADES	VALOR	UNIDADES
Resistência mecânica (tensão)	9,14	Kg/mm ²
Módulo de elasticidade (Young)	7031,0	Kg/mm ²
Módulo de rigidez (cisalhamento)	2637,0	Kg/mm ²
Módulo de resiliência	100/1	-
Resistência à fadiga (baseado em 500.000.000 de ciclos)	3,5	Kg/mm ²
Razão de Poisson (média)	0,33	-

identificação das ligas de alumínio [20], não obstante seja geralmente usada a designação da AA/ASTM (Aluminum Association/American Society for Testing Materials), consistindo de um sistema de quatro dígitos, onde o primeiro serve para identificar o grupo da liga (tabela 3.3).

No grupo dos alumínio puros (série lxxx), o segundo dígito indica os limites de impurezas, e os últimos dois dígitos apontam a percentagem mínima de alumínio na liga (tabela 3.4).

No grupo das ligas catalogadas pelo maior componente (séries 2xxx até 9xxx), o segundo dígito representa as modificações sofridas pela liga original e os dois últimos dígitos não têm um significado especial, a não ser para caracterizar as diferentes ligas do mesmo grupo (tabela 3.4).

As ligas experimentais identificam-se por uma série de números antecidos do prefixo "X" (por exemplo: liga X7005).

3.3 - FORMAÇÃO DAS LIGAS DE ALUMÍNIO

Como se viu anteriormente, o alumínio com 99,0% de pureza ou mais é um metal com resistência mecânica baixa, que poderia ser aumentada moderadamente por meio de trabalho a frio ("strain-hardening").

Entretanto muitas aplicações estruturais e industriais requerem uma maior resistência mecânica e dureza, motivo pelo qual vários outros elementos são adicionados, surgindo as chamadas ligas de alumínio, que se classificam em duas categorias: não tratáveis termicamente e tratáveis termicamente.

O magnésio (Mg), é o principal elemento de liga da série 5xxx. É um dos mais efetivos elementos de liga empregados no alumínio. Ele faz diminuir a densidade e aumentar a tenacidade e leveza da liga. As quantidades normais adicionadas são de 0,8% de Mg para cada 1,25% de Mn [26].

TABELA 3.3 - SISTEMA ADOTADO PELA AA/ASTM PARA DESIGNAR AS LIGAS DE ALUMÍNIO | 25 |

METAL	IDENTIFICAÇÃO
Alumínio 99,00% de pureza mínima ou mais	1xxx
Ligas de alumínio catalogadas pelo maior componente na liga:	
Cobre	2xxx
Manganês	3xxx
Silício	4xxx
Magnésio	5xxx
Magnésio e Silício	6xxx
Zinco	7xxx
Outros elementos	8xxx
Séries não usuais	9xxx

TABELA 3.4 - SIGNIFICADO DE CADA DÍGITO IDENTIFICADOR AA/ASTM | 25 |

	PRIMEIRO DÍGITO	SEGUNDO DÍGITO	TERCEIRO E QUARTO DÍGITOS
1050	Liga de alta pureza de alumínio (série 1xxx)	Sem controle de impurezas	99,5% de pureza mínima de alumínio
1100	Liga de alta pureza de alumínio (série 1xxx)	Com controle de uma impureza	99,0% de pureza mínima de alumínio
2017	Liga da série alumínio-cobre (série 2xxx)	Liga original	-
2117	Liga da série alumínio-cobre (série 2xxx)	Primeira modificação da liga 2017	-
5052	Liga da série alumínio-magnésio (série 5xxx)	Liga original	-

Com o propósito de aumentar a resistência à corrosão, de terminadas ligas são cobertas com uma camada de alumínio altamente puro (2,5 a 15% da espessura total).

A composição química das ligas de alumínio, bem como as principais conseqüências da adição dos vários elementos de liga, podem ser encontradas detalhadamente nas referências [13], [21] e [25].

3.4 - PROPRIEDADES E CARACTERÍSTICAS GERAIS DA LIGA 1050 E DA LIGA 5052

A liga de alumínio de alta pureza (1050) possui excelentes características de soldabilidade, boa formabilidade e boa resistência à corrosão. A resistência à tração e a alongação são um pouco menores na direção transversal do que na direção longitudinal de laminação. Aplica-se esta liga nas indústrias químicas, alimentícias, de refrigerantes e navais.

A liga de alumínio-magnésio (5052) tem boa resistência à corrosão, boa soldabilidade, alta resistência à fadiga e moderada resistência aos esforços de caráter estático. Tanto a resistência à tração como o limite de escoamento são aproximadamente as mesmas nas direções transversal e longitudinal. No entanto, a alongação é menor na direção transversal. Aplica-se esta liga nas indústrias naval e aeronáutica.

As diferentes identificações destas ligas estão expostas na tabela 3.5. As composições químicas aparecem na tabela 3.6. E as propriedades mecânicas estão apresentadas na tabela 3.7.

3.5 - VARIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DO ALUMÍNIO E DA LIGA ALUMÍNIO-MAGNÉSIO

Na previsão correta da distribuição de temperaturas num corpo metálico qualquer, nos estudos analíticos e numéricos,

TABELA 3.5 - CORRESPONDÊNCIA DE NORMAS ESTRANGEIRAS | 26 | 39 |

U.S.A AA/ASTM	U.R.S.S. GOST	ALEMANHA DIN	ITÁLIA UNI	FRANÇA NR ou AIR	INGLATERRA BS	BRASIL ALCAN	BRASIL ABNT-NBR 6834
1050	A5	A1 99,5	P-A1.P99,5	A5	1B	1S	1050
5052	AMr2	-	P-A1 Mg2,5	A-G2	N4	57S	5052

TABELA 3.6 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA | 39 |

AA/ASTM	Al	Cu	Fe	Mg	Mn	Si	Zn	Cr	OUTROS	
									CADA	TOTAL
1050	99,50	0,05	0,4	0,05	0,05	0,25	0,05	-	0,03	0,15
5052	-	0,10	0,40	2,2-2,8	0,10	0,25	0,10	0,35	0,05	0,15

TABELA 3.7 - PROPRIEDADES MECÂNICAS | 39 |

AA/ASTM	TÊMPERA	LIMITE DE RESISTÊNCIA (Kg. \cdot mm $^{-2}$)	LIMITE DE ESCOAMENTO (Kg. \cdot mm $^{-2}$)	ALONGAMENTO 500mm (%)	DUREZA BRINELL (500/10)	L.R. CIZALHAMENTO (Kg. \cdot mm $^{-2}$)	RESISTÊNCIA A FADIGA 500.10 ⁶ CICLOS
1050	0	9,8*(8,1)	(3,2)	(45,0)	(20,0)	(5,6)	(2,8)
	H14	10,5 (11,2)	(19,6)	(35,0)	(32,0)	(7,0)	(3,5)
	H18	13,4 (14,4)	(13,7)	(22,0)	(40,0)	(8,4)	(4,9)
	H24	- (11,2)	-	-	-	-	-
5052	0	31,6*(20,4)	(9,8)	25,0 (30,0)	(45,0)	(12,6)	(11,2)
	H34	33,0 (26,0)	(20,4)	(14,0)	(67,0)	(14,7)	(12,6)
	H38	38,7 (30,2)	(26,7)	(8,0)	(80,0)	(16,0)	(14,1)

Obs.: Os valores entre parênteses são típicos, correspondente a uma média de valores observados.

*Indica-se o valor máximo para garantir um completo recozimento.

especificamente na análise de transferência de calor é mister conhecer a dependência das propriedades físicas do material em questão, isto é, condutibilidade térmica (k), difusividade térmica (k); calor específico (c), densidade (ρ) e coeficiente de expansão térmica (α) com a temperatura. Durante os ciclos de soldagem e/ou operações industriais a chama, o material é submetido a variações de temperaturas variando entre a ambiental e a de fusão. É bem sabido que dentro dessa faixa de temperaturas as propriedades físicas do material apresentam alterações significativas.

Os gráficos 3.1 e 3.2, mostram a variação de condutibilidade térmica (k) com a temperatura para o alumínio e a liga alumínio-magnésio. O gráfico 3.3, apresenta a variação do calor específico (c) do alumínio com a temperatura. Os gráficos 3.4 e 3.5, exibem a variação do coeficiente de expansão térmica (α) com a temperatura para o alumínio e a liga alumínio-magnésio. O gráfico 3.6, apresenta a variação da difusividade térmica (k) do alumínio com a temperatura*.

A densidade (ρ) do alumínio e da liga alumínio-magnésio, podem ser obtidos através da equação:

$$\rho = \frac{k}{K c} \quad (3.1)$$

onde

- k = condutibilidade térmica
- K = difusividade térmica
- c = calor específico

*O número indicador da curva aponta:

- Método seguido para sua concepção.
- O ano em que a curva foi concebida.
- Faixas de temperaturas utilizadas.
- Porcentagem do erro reportado.
- Nome e designação do corpo de prova.
- Composição química da liga.
- Especificações e observações gerais.
- Tabela de pontos de cada curva.

Estes dados podem ser vistos nas referências [38], [43], [45], [46] [47].

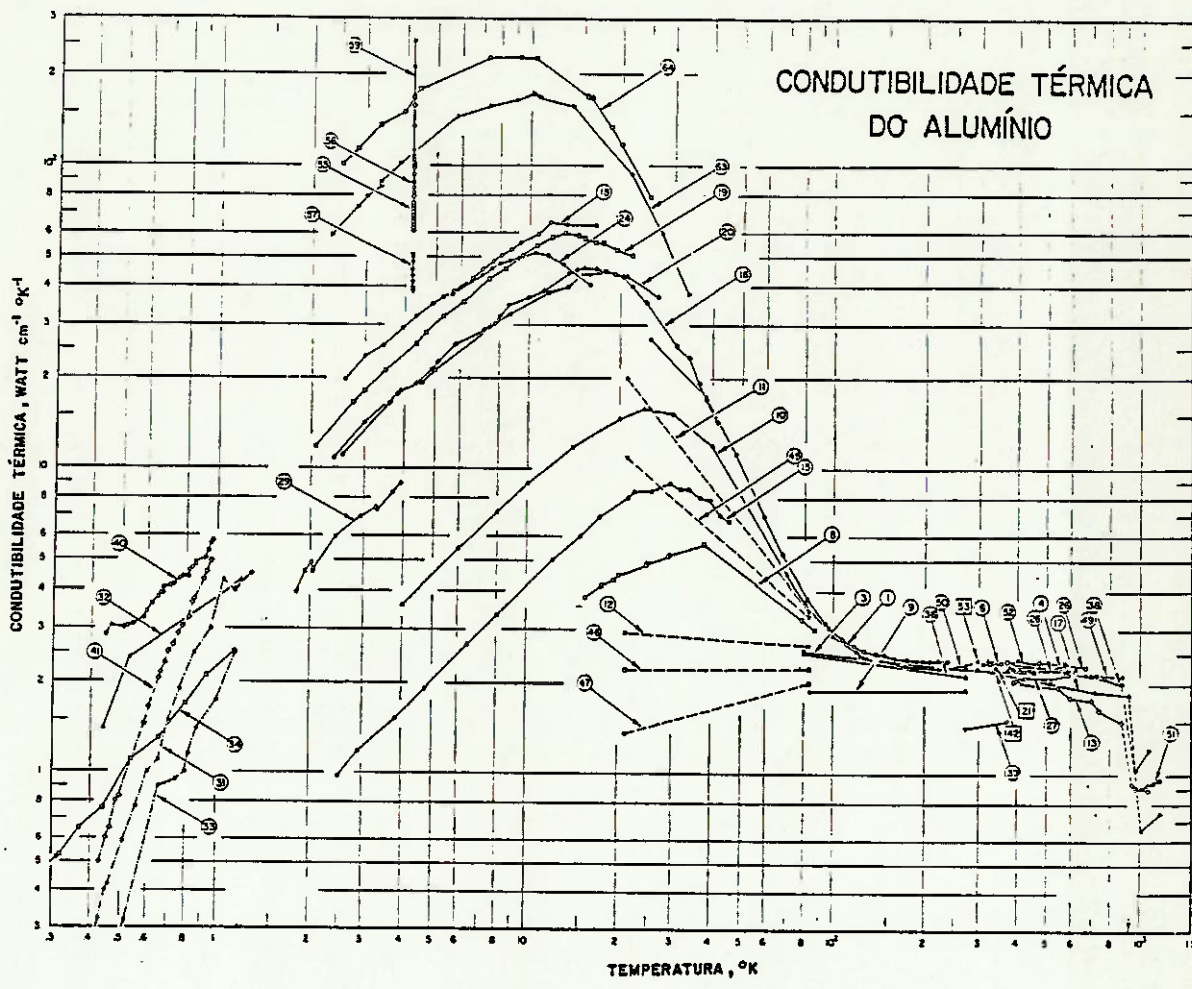


GRÁFICO 3.1

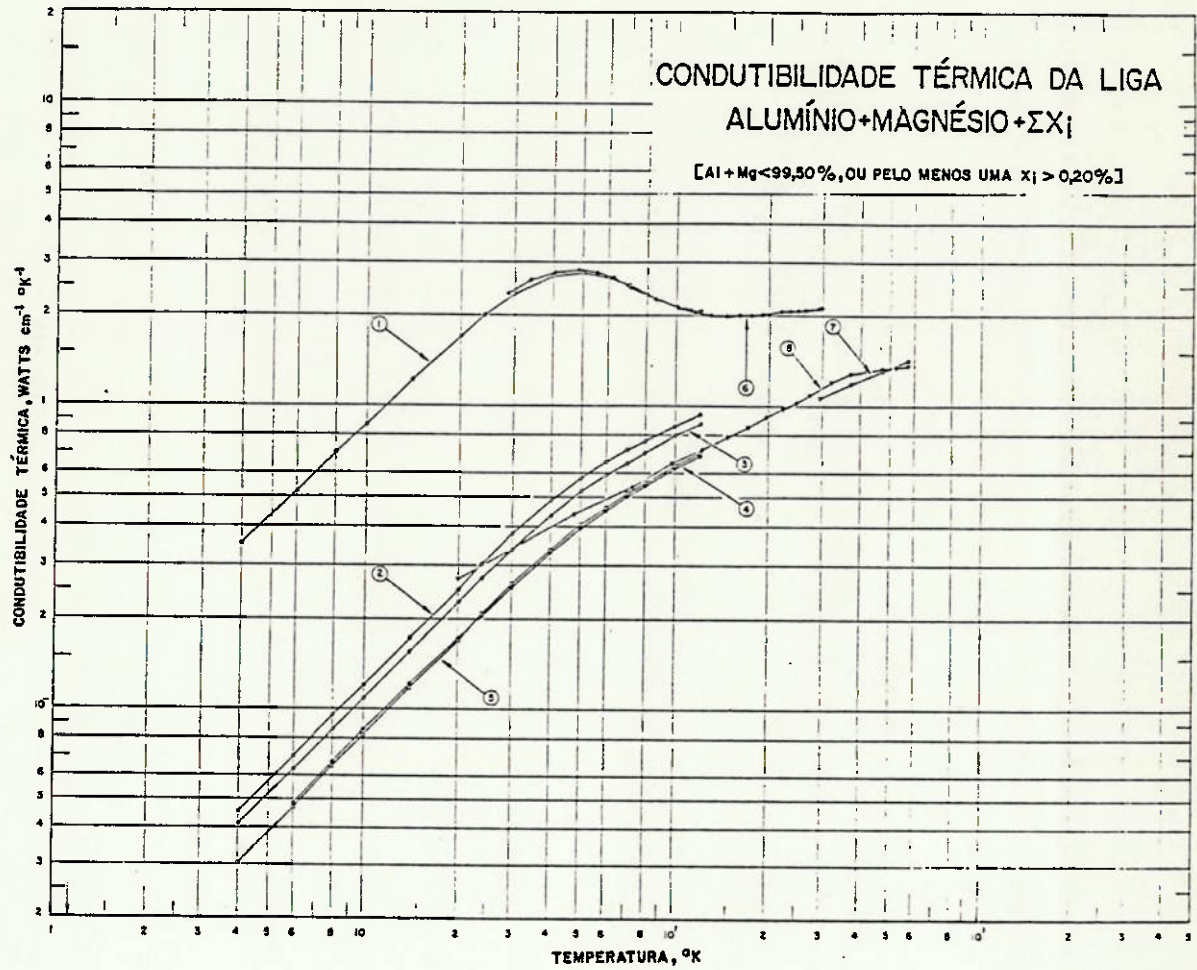


GRÁFICO 3.2

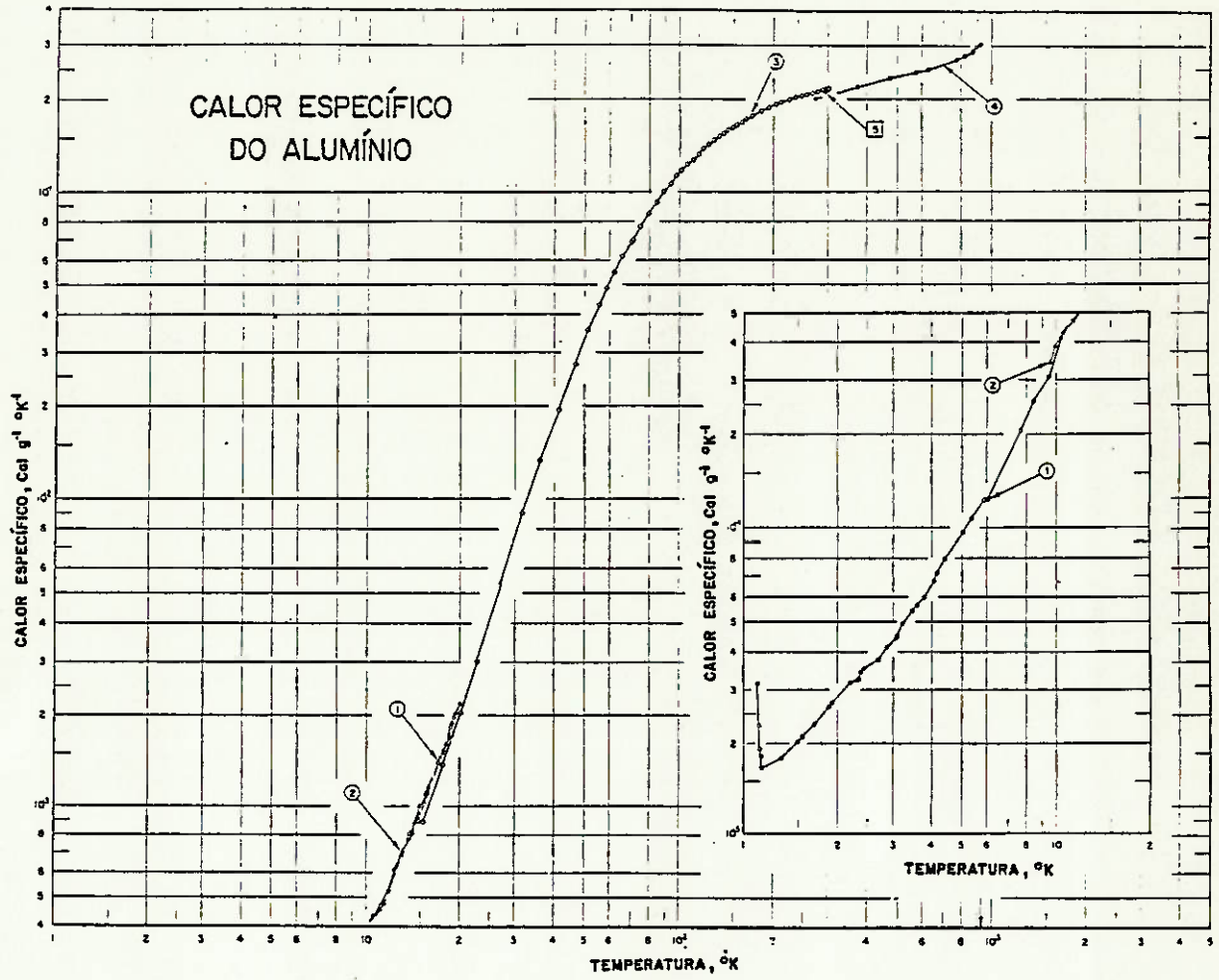


GRÁFICO 3.3

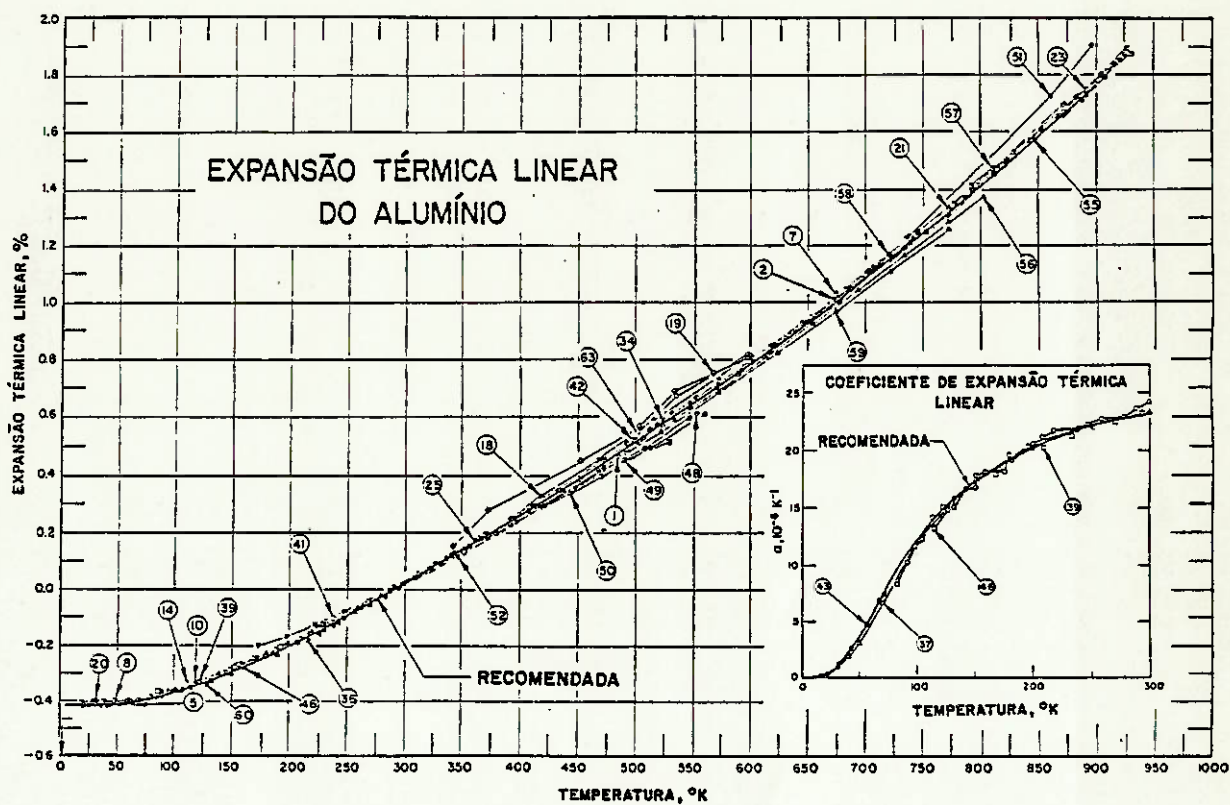


GRÁFICO 3.4

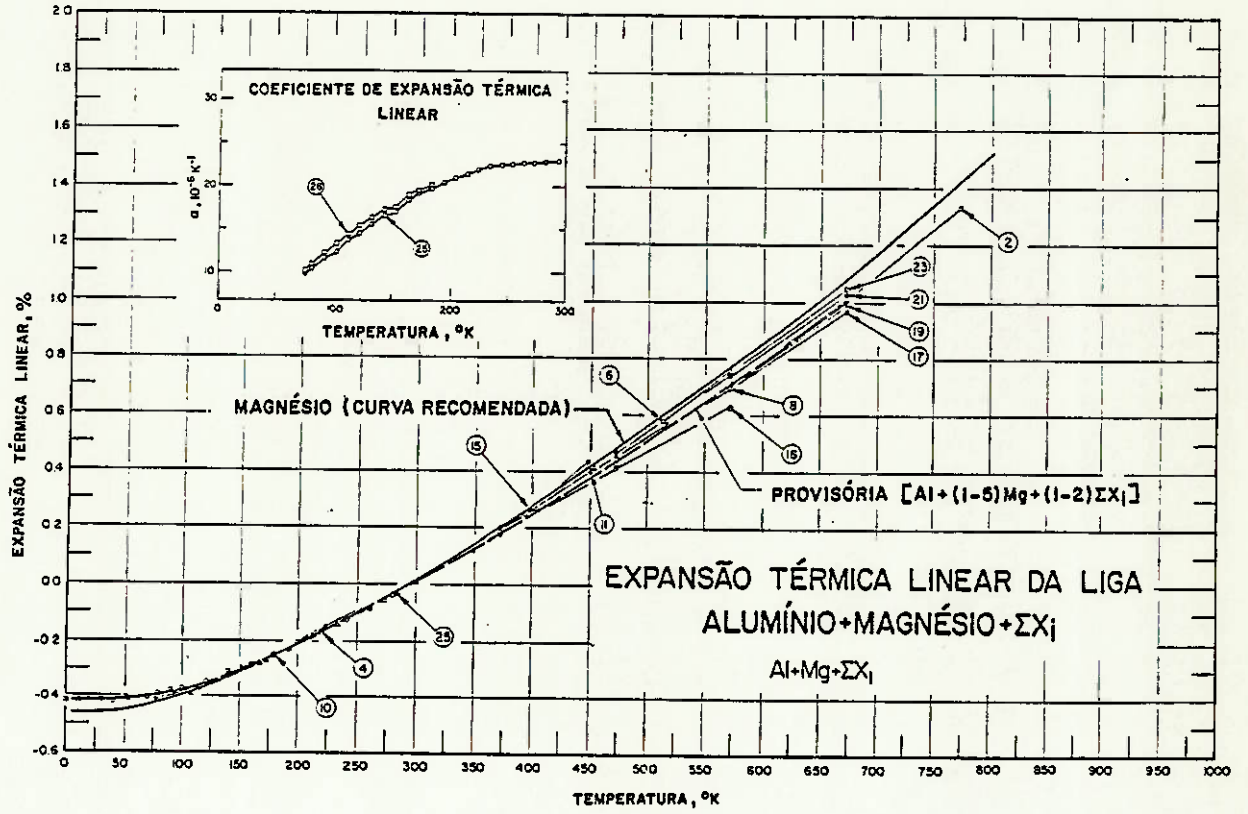


GRÁFICO 3.5

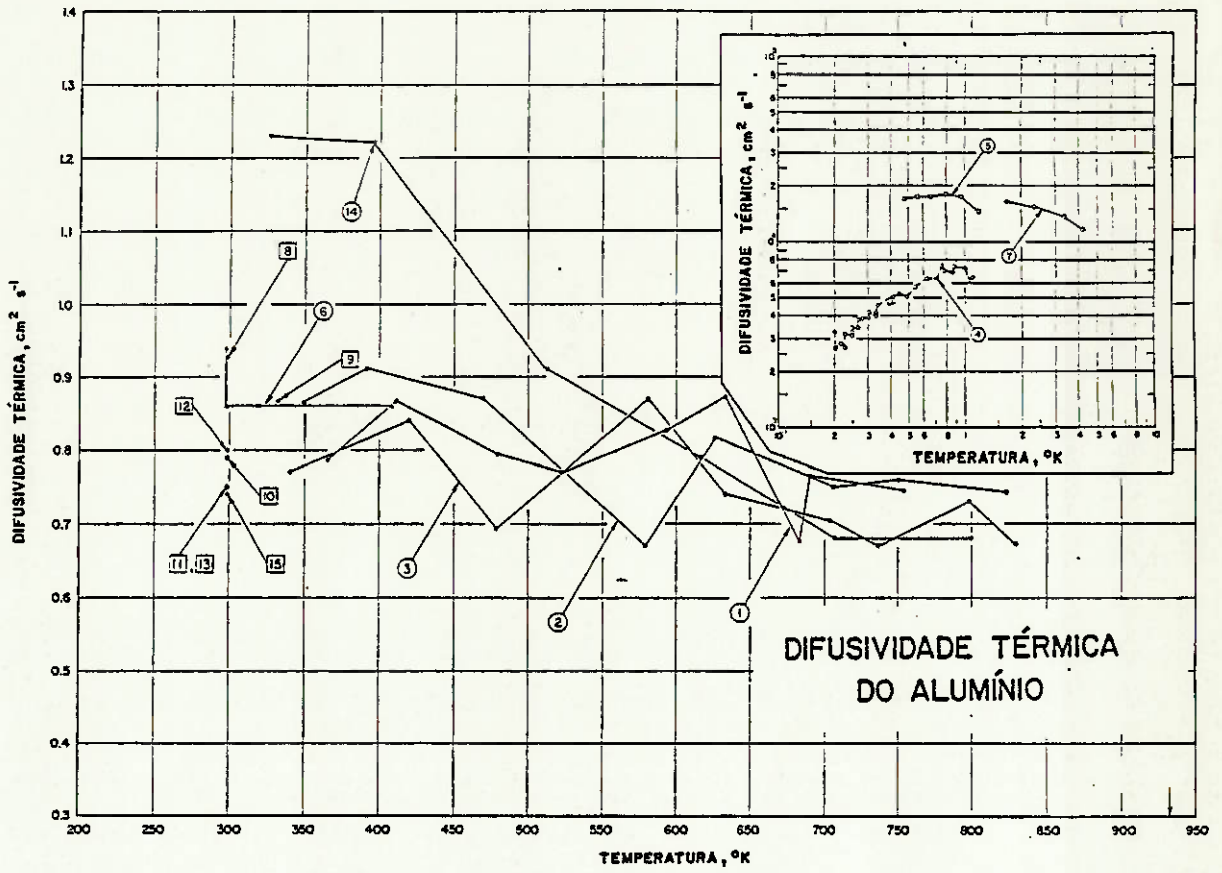


GRÁFICO 3.6

CAPÍTULO 4

DESENVOLVIMENTO DE UM PROGRAMA DE COMPUTADOR PARA ESTUDAR A CONDUÇÃO DE CALOR EM CORPOS METÁLICOS, PROCESSADOS POR FONTE MÓVEL

Baseado fundamentalmente na teoria exposta no capítulo 2, foi desenvolvido um programa de computador para calcular o fluxo de calor, através de um corpo condutor, quando processado industrialmente com chama ou submetido a processos de soldagem. Discutir-se-ão, também, alguns detalhes e comentários adicionais, referentes à implementação, no computador, da solução numérica.

O programa de computador denominado "DISTEMP" (Distribuição de Temperaturas), contém uma parte principal, onze subrotinas, duas funções e um "block data". Ele está escrito em FORTRAN IV, sendo processado com dupla precisão aritmética.

A listagem integral do programa de computador desenvolvido, bem como a lista de símbolos utilizados na programação, o manual de usuário e um problema-exemplo, são apresentados nos apêndices I, II e III, no final deste trabalho.

4.1 - PROGRAMA PRINCIPAL

Na figura 4.1, mostra-se um fluxograma ilustrando o programa principal e suas ligações com os vários subprogramas. Nesse quadro podem-se identificar as seguintes partes:

- a) Leitura de dados;
- b) Cálculo de algumas constantes;
- c) Cálculo dos autovalores;
- d) Cálculo dos coeficientes das séries soluções;
- e) Leitura da variável tempo;
- f) Cálculo das temperaturas;

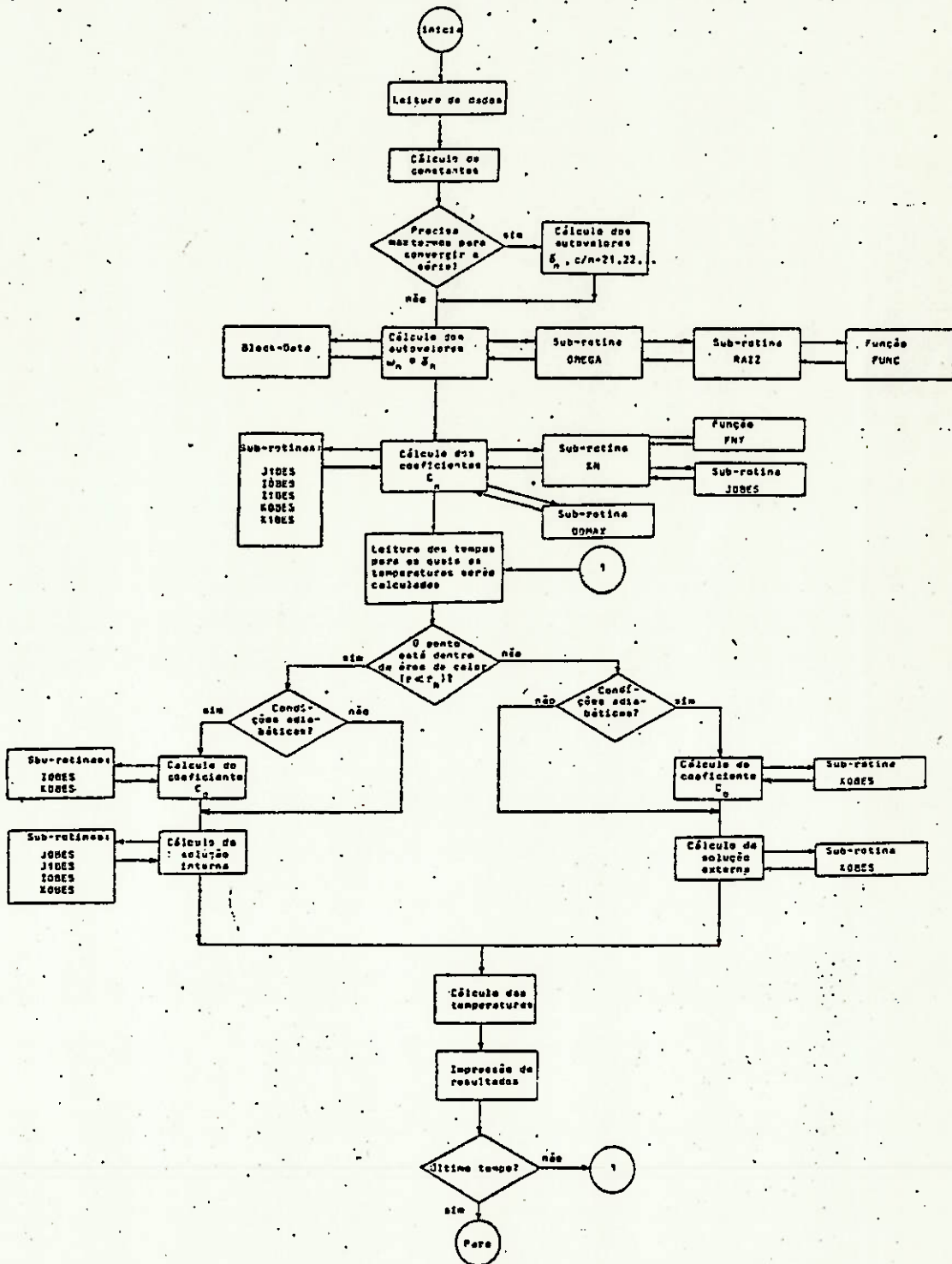


FIGURA 4.1 - DIAGRAMA DE BLOCOS

- g) Impressão de resultados; e
h) Representação gráfica.

4.2 - AVALIAÇÃO DA INTEGRAL "K_n"

Nas expressões que determinam a chamada solução interna, " $\phi^i(r,z)$ ", e a constante " C_n ", encontra-se a integral

$$K_n = \int_0^1 x \cdot e^{-Cr_h^2 x^2} \cdot J_0(\delta_n r_h x) \cdot dx \quad c/n=1,2,\dots \quad (4.1)$$

que pode ser calculada numericamente, sempre que não existir uma forma analítica de solução. Fazendo:

$$\begin{aligned} z_n &= \delta_n \cdot r_h \\ e: & \\ y &= z_n \cdot x \end{aligned} \quad (4.2)$$

a equação (4.1) é escrita como:

$$K_n = \frac{1}{z_n^2} \int_0^{z_n} f_n(y) \cdot dy \quad (4.3)$$

onde

$$f_n(y) = y \cdot \exp\left(-\frac{C}{\delta_n^2} \cdot y^2\right) \cdot J_0(y) \quad (4.4)$$

Equivalente à equação:

$$K_n = \frac{1}{z_n^2} \cdot \sum_{i=1}^n \left\{ \int_{z_{i-1}}^{z_i} f_n(y) \cdot dy \right\} \quad (4.5)$$

onde: $z_0 = 0$

Aplicando o método numérico da regra trapezoidal de integração, cada integral pode ser avaliada pela série

$$\int_{z_{i-1}}^{z_i} f_n(y) \cdot dy = \frac{h_i}{2} \cdot \{f_n[y_{(i-1).N+1}] + 2 \cdot \sum_{j=1}^{N-1} f_n[y_{(i-1).N+j+1}] + f_n[y_{i.N+1}]\} \quad (4.6)$$

onde

$$h_i = \frac{z_i - z_{i-1}}{N} \quad c/i=1,2,3,\dots,n$$

são os comprimentos dos "N" subintervalos iguais, que cada intervalo (z_{i-1}, z_i) , $c/i=1,2,3,\dots,n$, está dividido, e y_m , $c/m=1,2,3,\dots,nN+1$, são os valores dos parâmetros y . Deve-se observar que, por sua especial construção (ver figura 4.2),

$$y_{(i-1).N+1} = z_{i-1} \quad c/i=1,2,3,\dots,n+1$$

e

$$y_{(i-1).N+k+1} = z_{i-1} + k \cdot h_i \quad c/i=1,2,3,\dots,n$$

Os valores, " $z_n = \delta_n \cdot r_n$ ", são os valores das funções de Bessel de primeira espécie e ordem zero, isto é, " $J_0(x)$ ", que se verão na seção 4.5. Portanto, a função $f_n(y)$ anula-se nos pontos limites dos intervalos; bem como no ponto zero. A equação (4.6) pode ser reescrita como:

$$\int_{z_{i-1}}^{z_i} f_n(y) \cdot dy = h_i \cdot \sum_{j=1}^{N-1} f_n[y_{(i-1).N+j+1}] \quad (4.7)$$

Substituindo este valor na equação (4.5), tem-se:

$$K_n = \frac{1}{z_n^2} \cdot \sum_{i=1}^n \{h_i \cdot \sum_{j=1}^{N-1} f_n[y_{(i-1).N+j+1}]\} \quad (4.8)$$

Esta última expressão é avaliada, numericamente, na sub-rotina "KN" e na função "FNY", com cada intervalo $(z_{i-1},$

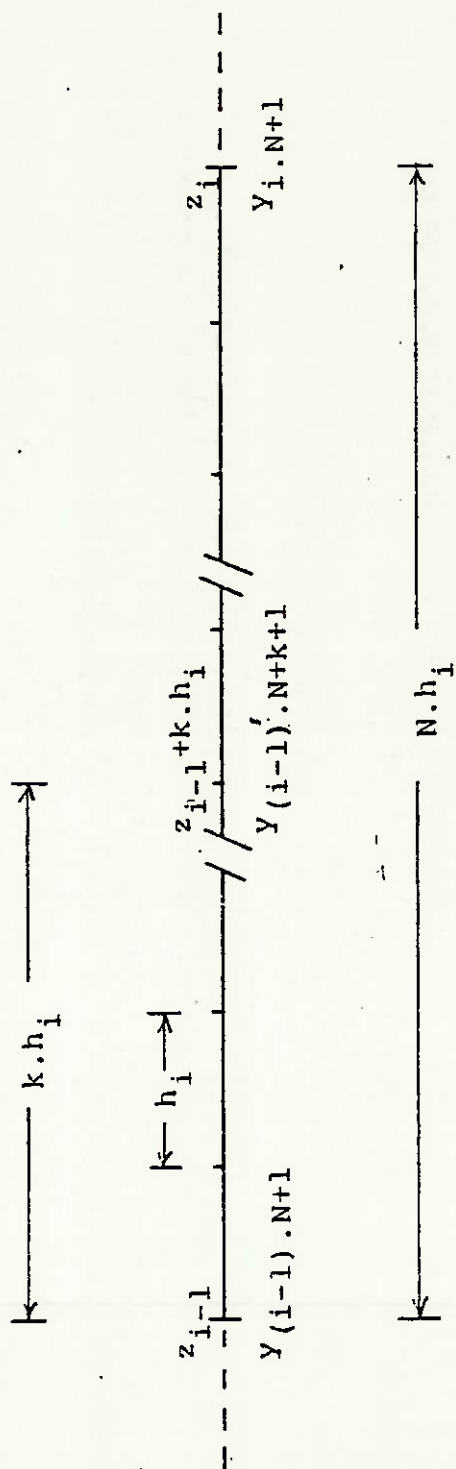


FIGURA 4.2 - INTERVALO REPRESENTATIVO USADO NA INTEGRAÇÃO NUMÉRICAS

z_1) dividido em dez subintervalos. Assim temos, $N=10$.

4.3 - SOLUÇÃO DA EQUAÇÃO TRANSCENDENTAL

Os valores característicos (autovalores) " w_n ", da solução externa " $\phi^0(r,z)$ ", são obtidos calculando as raízes da equação

$$(k_0 \cdot w_n^2 - h_1 \cdot h_2) \cdot \tan(w_n H) = k_0 \cdot w_n \cdot (h_1 + h_2) \quad (4.9)$$

$$c/n=1,2,3,\dots,$$

Chamando

$$\begin{aligned} \lambda_n &= w_n \cdot H \\ A &= (k_0/H)^2 \\ B &= h_1 \cdot h_2 \\ C &= k_0 \cdot (h_1 + h_2)/H \end{aligned} \quad (4.10)$$

e substituindo estes valores na equação (4.9), tem-se:

$$(A \cdot \lambda_n^2 - B) \cdot \tan(\lambda_n) = C \cdot \lambda_n \quad c/n=1,2,\dots, \quad (4.11)$$

Todas as constantes são positivas e "B" e "C" podem ter valor zero, somente sob hipótese de condições adiabáticas ($h_1 = h_2 = 0$).

Considerando a função

$$f(\lambda_n) = (A \cdot \lambda_n^2 - B) \cdot \tan(\lambda_n) - C \cdot \lambda_n \quad c/n=1,2,\dots, \quad (4.12)$$

observa-se que as raízes dela são

$$(B/A)^{1/2}$$

e

$$m \pi \quad c/m=0,1,2,3,\dots,$$

onde a primeira raiz será

$$(i-1) \cdot \frac{\pi}{2} < \left(\frac{B}{A} \right)^{1/2} < i \cdot \frac{\pi}{2} \quad c/i=1,2,\dots, \quad (4.13)$$

Com esta observação e através de uma investigação analítica das propriedades da equação (4.12) $|2|$, pode-se dizer que as raízes da equação

$$g(\lambda_n) = f(\lambda_n) - C \cdot \lambda_n \quad c/n=1,2,\dots, \quad (4.14)$$

dependem do valor de "i". Assim:

1) Se o valor "i" é ímpar, $g(\lambda_n)$ tem:

a) $(i-1)/2$ número de raízes $\lambda_n < (i-1)\pi/2$, uma em cada um dos intervalos

$$\left(\frac{(j-2)\pi}{2}, \frac{(j-1)\pi}{2} \right) \quad c/j=3,5,7,\dots,i$$

b) Uma raiz no intervalo

$$\left(\frac{(i-1)\pi}{2}, \frac{i\pi}{2} \right)$$

c) E as restantes raízes $\lambda_n < i\pi/2$, uma em cada um dos intervalos

$$\left(\frac{i\pi}{2} + (2j-1) \frac{\pi}{2}, \frac{i\pi}{2} + j\pi \right) \quad c/j=1,2,3,\dots,$$

2) Se o valor "i" é par, $g(\lambda_n)$ tem:

a) $(i/2-1)$ número de raízes $\lambda_n < (i-1)\pi/2$, uma em cada um dos intervalos

$$\left(\frac{(j-3)\pi}{2}, \frac{(j-2)\pi}{2} \right) \quad c/j=4,6,8,\dots,i$$

b) Uma raiz no intervalo

$$\left(\frac{(i-1)\pi}{2}, \frac{i\pi}{2} \right)$$

c) E as raízes restantes, $\lambda_n > i\pi/2$ uma em cada um dos intervalos

$$\left(\frac{i\pi}{2} + (j-1)\pi, \frac{i\pi}{2} + (2j-1)\frac{\pi}{2} \right) \quad c/j=1,2,3,\dots$$

Estas raízes são calculadas usando o chamado método do intervalo médio [1].

No programa de computador, os cálculos necessários para a determinação dos valores característicos " w_n ", são efetuados pelas sub-rotinas "OMEGA", "RAIZ" e a função "FUNC".

4.4 - CÁLCULO DA INTENSIDADE DE CALOR NO CENTRO DA ÁREA DE CALOR

A intensidade de calor no centro da área de calor " q_0 " (figura 2.3), é calculada a partir da equação (2.11) da seção 2.2.

$$Q = 2 \cdot q_0 \cdot \int_0^{r_h} \int_0^\pi \exp(-C \cdot r^2 - \lambda v \cdot r \cdot \cos \psi) \cdot r \cdot d\psi \cdot dr \quad (4.15)$$

onde:

a) Se for processo industrial com chama:

$$Q = \eta_{AC} \cdot \frac{Q_{est}}{MOL_{AC}} \cdot V_{AC} \cdot \gamma_{AC} \quad (4.16)$$

b) Se o processo for soldagem:

$$Q = \eta_s \cdot V \cdot I \quad (4.17)$$

Depois de alguma manipulação matemática e usando, novamente, a regra de integração trapezoidal, chega-se à seguinte equação:

$$Q = q_0 \cdot \frac{r_h}{N} \cdot \left[2 \cdot \sum_{n=2}^{N-1} r_n \cdot \exp(-C \cdot r_n^2) \cdot g(r_n) + r_h \cdot \exp(-C \cdot r_h^2) \cdot g(r_h) \right] \quad (4.18)$$

onde

$$g(r) = \frac{\pi}{2M} \cdot \left[e^{-\lambda v r} + e^{\lambda v r} + 2 \cdot \sum_{m=2}^{M-1} e^{-\lambda v r \cdot \cos \psi_m} \right]$$

$$\psi_m = (m-1) \cdot \frac{\pi}{M}, \quad m=1,2,3,\dots,M$$

$$r_n = (n-1) \cdot \frac{r_h}{N}, \quad n=1,2,3,\dots,N$$

e "M", "N" são os números de subintervalos em que os intervalos $(0, \pi)$ e $(0, r_h)$ foram divididos.

O cálculo numérico, correspondente à avaliação da intensidade de calor, no centro da área de calor, encontra-se na sub-rotina "QOMAX".

4.5 - CÁLCULO DAS FUNÇÕES DE BESSEL

As funções de Bessel e as funções modificadas de Bessel, aparecem em várias equações da solução proposta, e elas têm sido avaliadas, usando uma conhecida aproximação polinomial, [14] nas sub-rotinas: "JOBES($J_0(x)$)", "J1BES($J_1(x)$)", "IOBES($I_0(x)$)", "I1BES($I_1(x)$)", "KOBES($K_0(x)$)" e "K1BES($K_1(x)$)". A função de Bessel, que cada sub-rotina calcula, vem entre parêntesis.

Os valores característicos (autovalores) " δ_n ", da primeira parte da solução interna " $\phi_I^i(r,z)$ " (equação (2.36)), são

calculados da condição de anulação de " $J_0(x)$ ". Os primeiros vinte valores nulos podem ser encontrados em qualquer manual de matemática [16] e são dados ao programa através do "block data". No caso em que mais de vinte raízes sejam requeridas, isto é, se a série-solução precisar mais de vinte termos para convergir, o programa encontra os " m^o " valores nulos requeridos ($m > 20$), usando a expansão seguinte:

$$x_m \sim \frac{\pi}{4}(4m-1) + \frac{1}{2\pi(4m-1)} - \frac{1}{6\pi^3(4m-1)^3} + \frac{3779}{15\pi^5(4m-1)^5} - \dots \quad (4.19)$$

com uma aproximação, no mínimo, de cinco casas depois da vírgula.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS NUMÉRICOS

Uma vez estabelecidas as equações que prevêem a distribuição de temperaturas num corpo metálico, com dimensões e formato definidos, e elaborado o programa de computador para esse fim (programa DISTEMP), será agora possível efetuar alguns processamentos numéricos com o objetivo de detectar possíveis problemas ou restrições computacionais e conduzir análises comparativas entre os levantamentos experimentais (expostos no capítulo 6), e os resultados numéricos fornecidos por um outro programa desenvolvido com o mesmo propósito (programa TEMPER).

5.1 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE COEFICIENTES UTILIZADOS NAS SÉRIES SOLUÇÕES

Examinando as séries soluções desenvolvidas no capítulo 2 desta dissertação, percebe-se que os resultados numéricos obtidos são bastante sensíveis às variações dos parâmetros eficiência térmica do processo (η), coeficiente de concentração da fonte de calor (C), coeficiente de variação da condutibilidade térmica do material (γ) e coeficientes de transferência de calor ao meio circundante pelos fenômenos de convecção e radiação (h_1 e h_2). Por isto, torna-se necessária uma análise de sensibilidade, com a finalidade de aferir essas variações e conseqüentemente arbitrar valores que estes parâmetros possam assumir durante as análises numéricas posteriores.

Duas análises de sensibilidade serão apresentadas para uma melhor visualização das alterações que cada parâmetro provoca na distribuição teórica de temperaturas gerada pelo computador. A primeira servirá para analisar as mudanças na dis

tribuição a baixas temperaturas (gráficos 5.1 a 5.6) e a segunda para observar as modificações na distribuição a altas temperaturas (gráficos 5.7 a 5.12).*

As distribuições de temperaturas utilizadas como padrões de comparação serão duas distribuições experimentais já existentes, cujas características mais importantes estão detalhadas na tabela 5.1.

A superposição das diferentes distribuições teóricas de temperaturas à curva experimental padrão, dá uma clara visão das modificações e variações que cada parâmetro acima mencionado, ocasiona no comportamento e desenvolvimento dessas distribuições. A observação e exame de cada representação gráfica, ensejam tecer os seguintes comentários:

1. Maiores eficiências térmicas do processo, originam maiores valores de temperaturas teóricas.
2. Pequenos coeficientes de concentração de calor da fonte, fornecem maiores temperaturas teóricas e a ocorrência da máxima temperatura se dá em um tempo maior. Para um valor maior que $\frac{1}{2}$ deste coeficiente, a distribuição teórica é pouco sensível ao valor de "C".
3. A inclusão do coeficiente de variação da condutibilidade térmica do material, somente afeta as regiões de mais altas temperaturas na distribuição teórica (picos). Um valor positivo deste coeficiente faz diminuir o valor teórico das temperaturas nas regiões mais quentes, enquanto que um valor negativo do coeficiente faz aumentar o valor máximo teórico nessas regiões.

* Entenda-se por distribuição a baixas temperaturas, aquelas em que a temperatura máxima calculada não excede 200°C e por distribuição a altas temperaturas, aquelas em que a máxima temperatura calculada ultrapassa 200°C.

TABELA 5.1 - PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DAS DISTRIBUIÇÕES EXPERIMENTAIS UTILIZADAS COMO PADRÕES DE COMPARAÇÃO DURANTE AS ANÁLISES DE SENSIBILIDADE

ITEM	PARA DISTRIBUIÇÕES A BAIIXAS TEMPERATURAS	PARA DISTRIBUIÇÕES A ALTAS TEMPERATURAS	UNIDADES
Identificação da liga (AA/ASTM)	1050	5052	-
Processo de solda usado	DCRP-TIG	DCSP-TIG	-
Espessura da chapa	6,0	6,5	mm
Tensão do arco	25,0	14,0	volt
Corrente do arco	20,0	140,0	ampère
Velocidade de avanço do arco	3,713	7,692	mm.s ⁻¹
Temperatura inicial da chapa	7,0	25,0	°C
Temperatura ambiental	28,0	23,0	°C
Coordenadas cartesianas do ponto estudado	x=0,0 y=28,0 z=6,0	x=50,0 y=0,0 z=5,5	mm

4. Os coeficientes de transferência de calor ao meio circundante pelos fenômenos de convecção e radiação, provocam um forte impacto na distribuição geral de temperaturas teóricas. Assim, mesmo pequenos valores destes coeficientes fazem com que o computador estime temperaturas muito baixas. Uma distribuição quase realística é calculada quando estes coeficientes são declarados nulos (condições adiabáticas).

Na tabela 5.2 estão mostradas as faixas de valores recomendadas para cada parâmetro estudado, extraídas desta análise.

TABELA 5.2 - FAIXAS DE VALORES RECOMENDADAS PARA OS COEFICIENTES UTILIZADOS NAS SÉRIES SOLUÇÕES, EXTRAÍDAS DA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

ITEM	VALOR	UNIDADES
Eficiência térmica do processo (η)	0,4- 0,6	-
Coefficiente de concentração da fonte de calor (C)	5,0-20,0	1/cm/cm
Coefficiente de transferência de calor ao meio circundante pelos fenômenos de convecção e radiação (h_1 e h_2)	0,0- $1,0 \times 10^{-5}$	cal/seg/mm/mm/°C

Obs.: O valor do coeficiente de variação da condutibilidade térmica do material (γ) para as ligas de alumínio a serem utilizadas nos levantamentos experimentais, foram obtidas de uma análise de regressão mostrada no apêndice IV, sendo os seus valores:

(1) Para a liga 1050, $\gamma = 0,299 \times 10^{-3}$

(2) Para a liga 5052, $\gamma = 0,912 \times 10^{-3}$

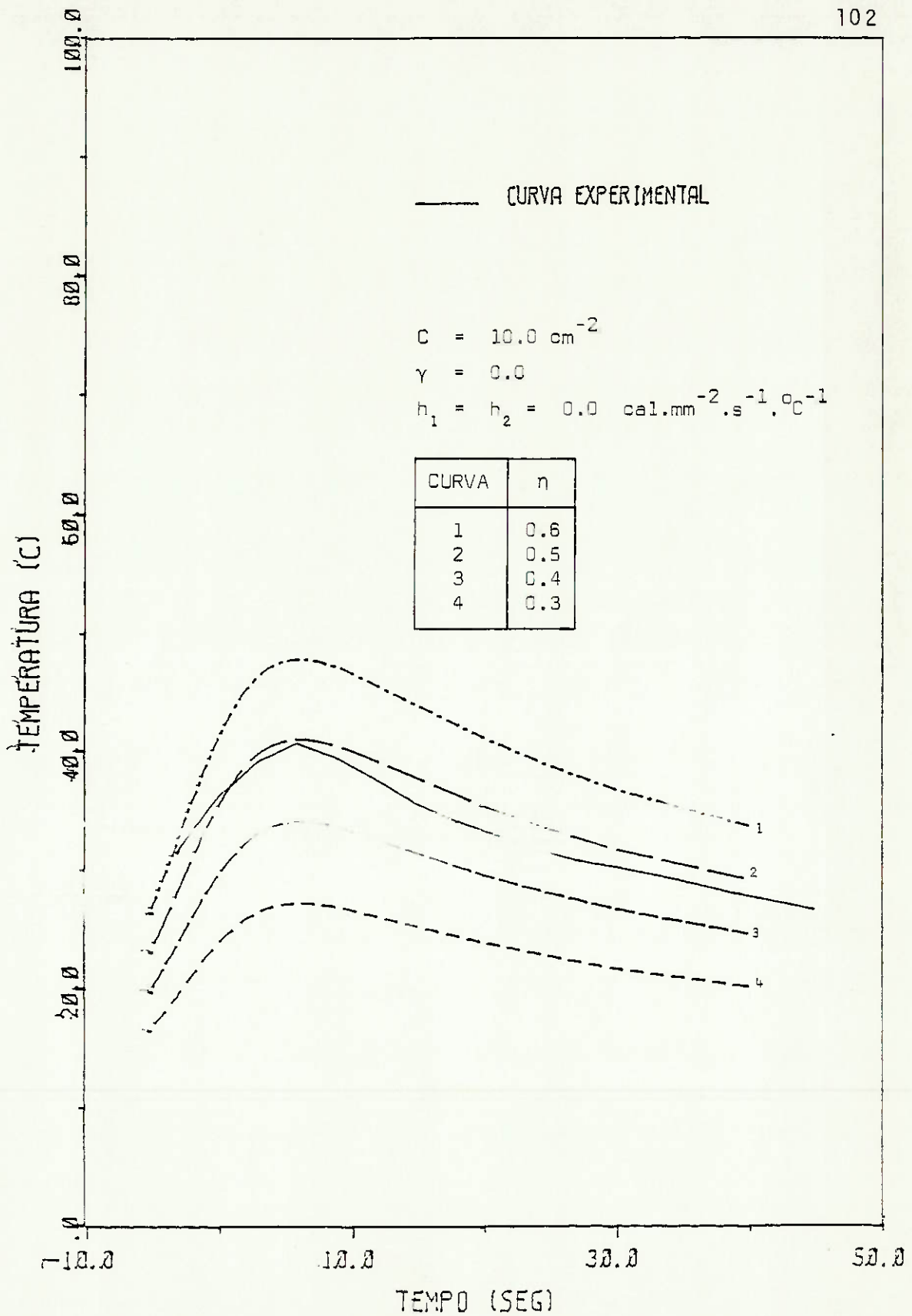


GRÁFICO 6.1-INFLUÊNCIA DO PARÂMETRO EFICIÊNCIA TÉRMICA DO PROCESSO NA DISTRIBUIÇÃO A BAIXAS TEMPERATURAS

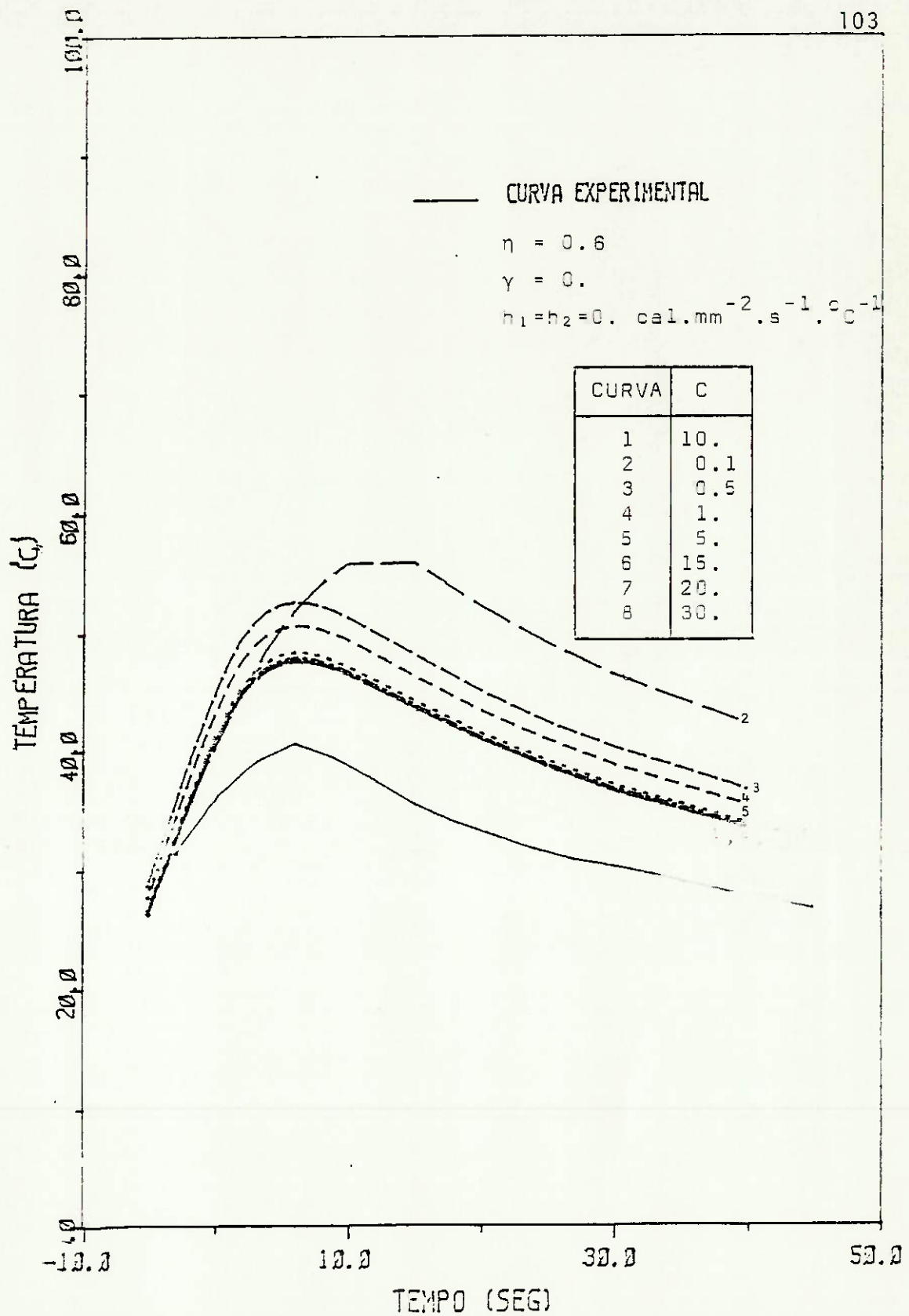


GRÁFICO 5.2—INFLUÊNCIA DO PARÂMETRO COEFICIENTE DE CONCENTRAÇÃO DA FOLHA DE CALOR, NA DISTRIBUIÇÃO A BAIAS TEMPERATURAS

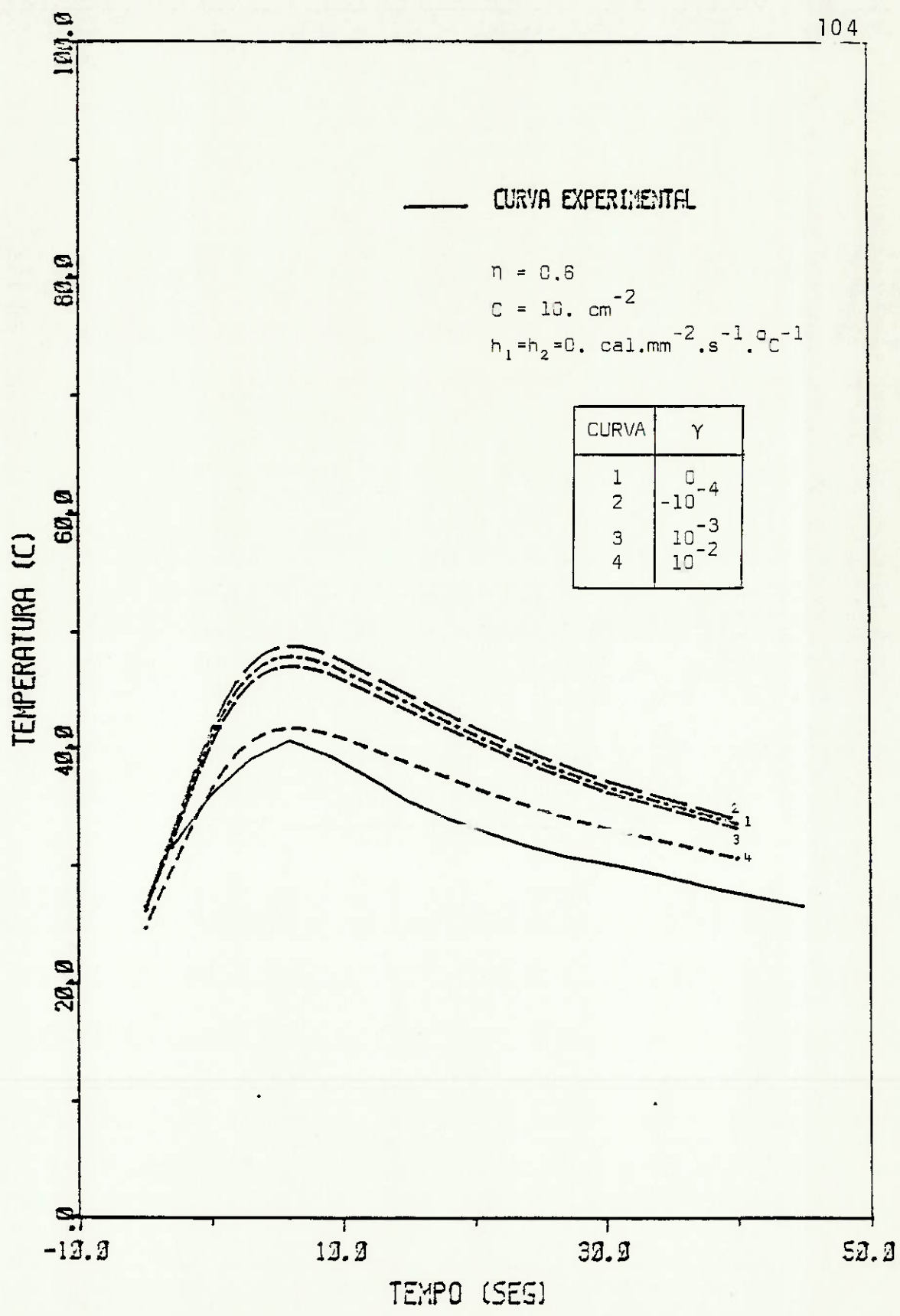


GRÁFICO 6.3-INFLUÊNCIA DO PARÂMETRO COEFICIENTES DE VARIAÇÃO DA CONDUTIBILIDADE TÉRMICA DO MATERIAL, NA DISTRIBUIÇÃO A BAI-
NAS TEMPERATURAS

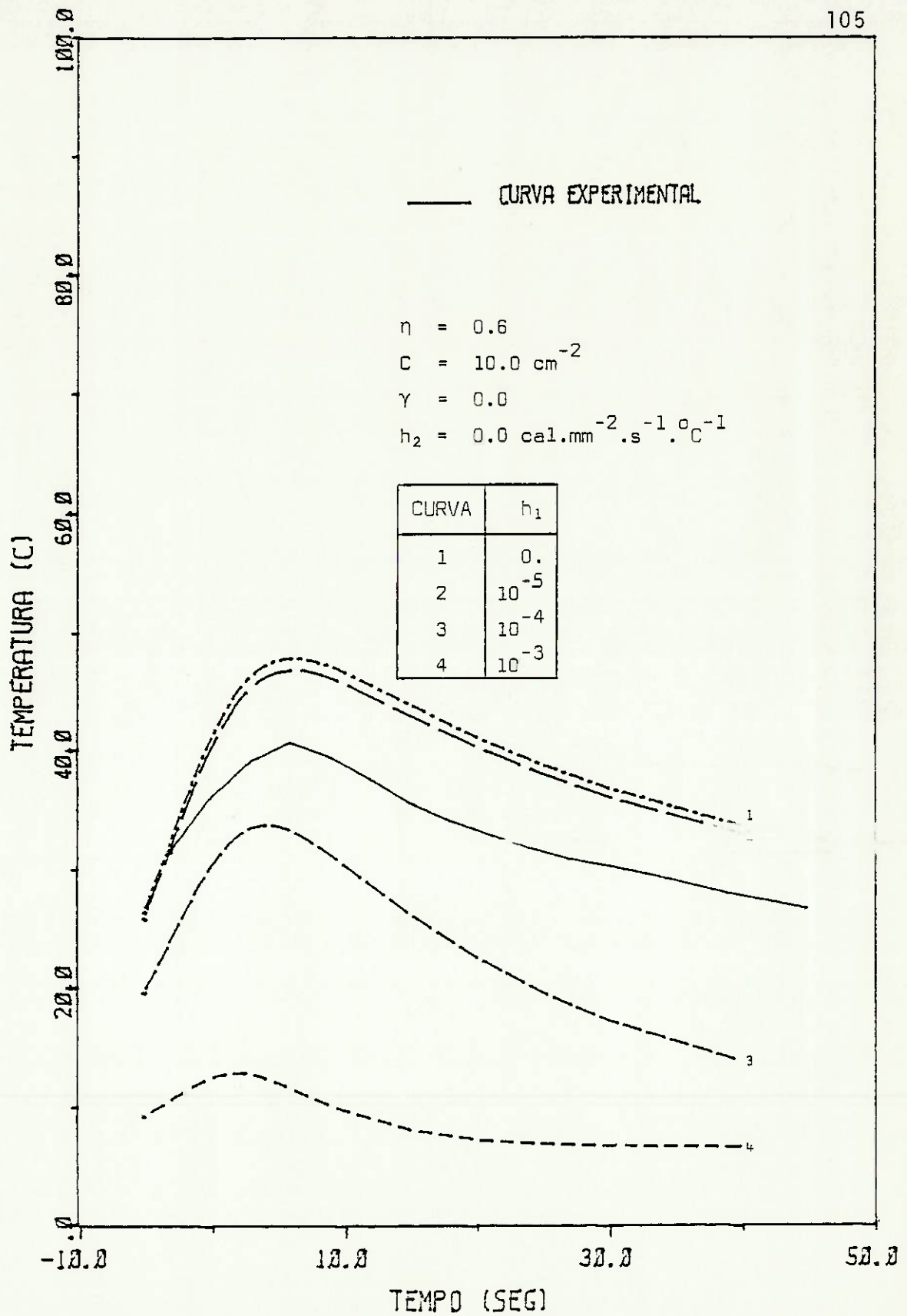


GRÁFICO 5.4—INFLUÊNCIA DO PARÂMETRO COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR DA SUPERFÍCIE SUPERIOR DO CORPO, NA DISTRIBUIÇÃO A BAIXAS TEMPERATURAS

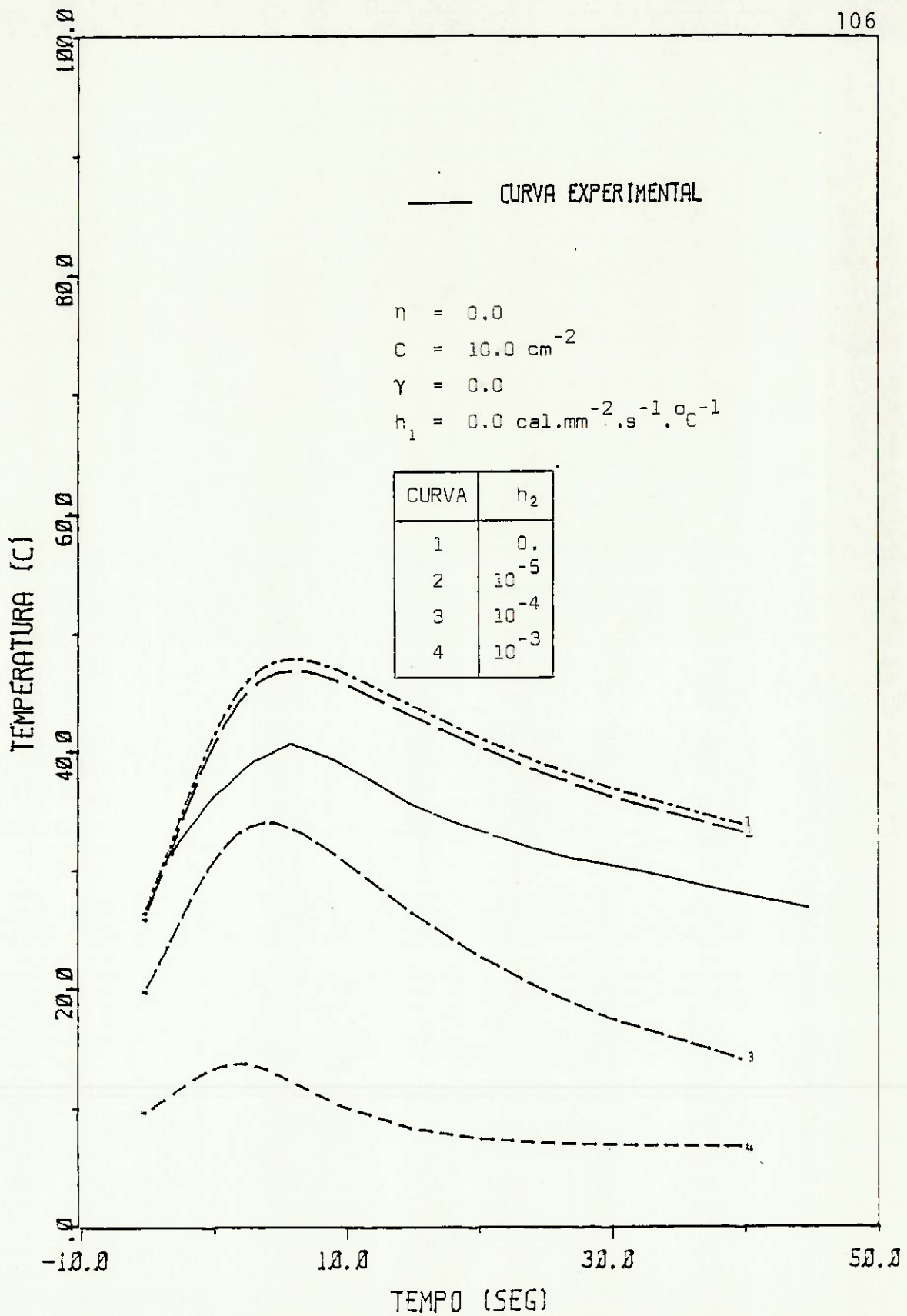


GRÁFICO 6.5-INFLUÊNCIA DO PARÂMETRO COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR DA SUPERFÍCIE INFERIOR DO CORPO, NA DISTRIBUIÇÃO A BAIXAS TEMPERATURAS

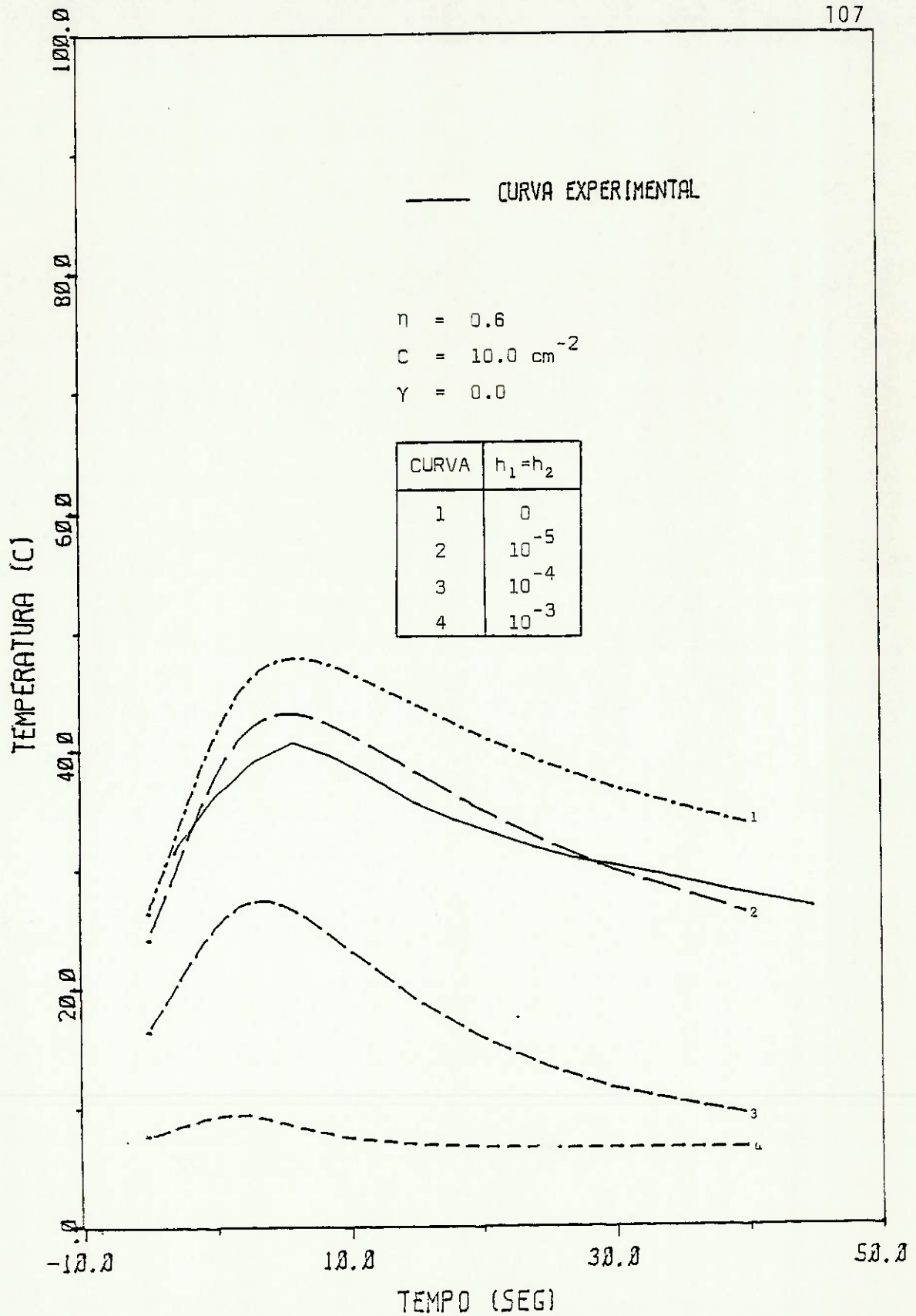


GRÁFICO 5.6—INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR DO CORPO, NA DISTRIBUIÇÃO A BAIXAS TEMPERATURAS

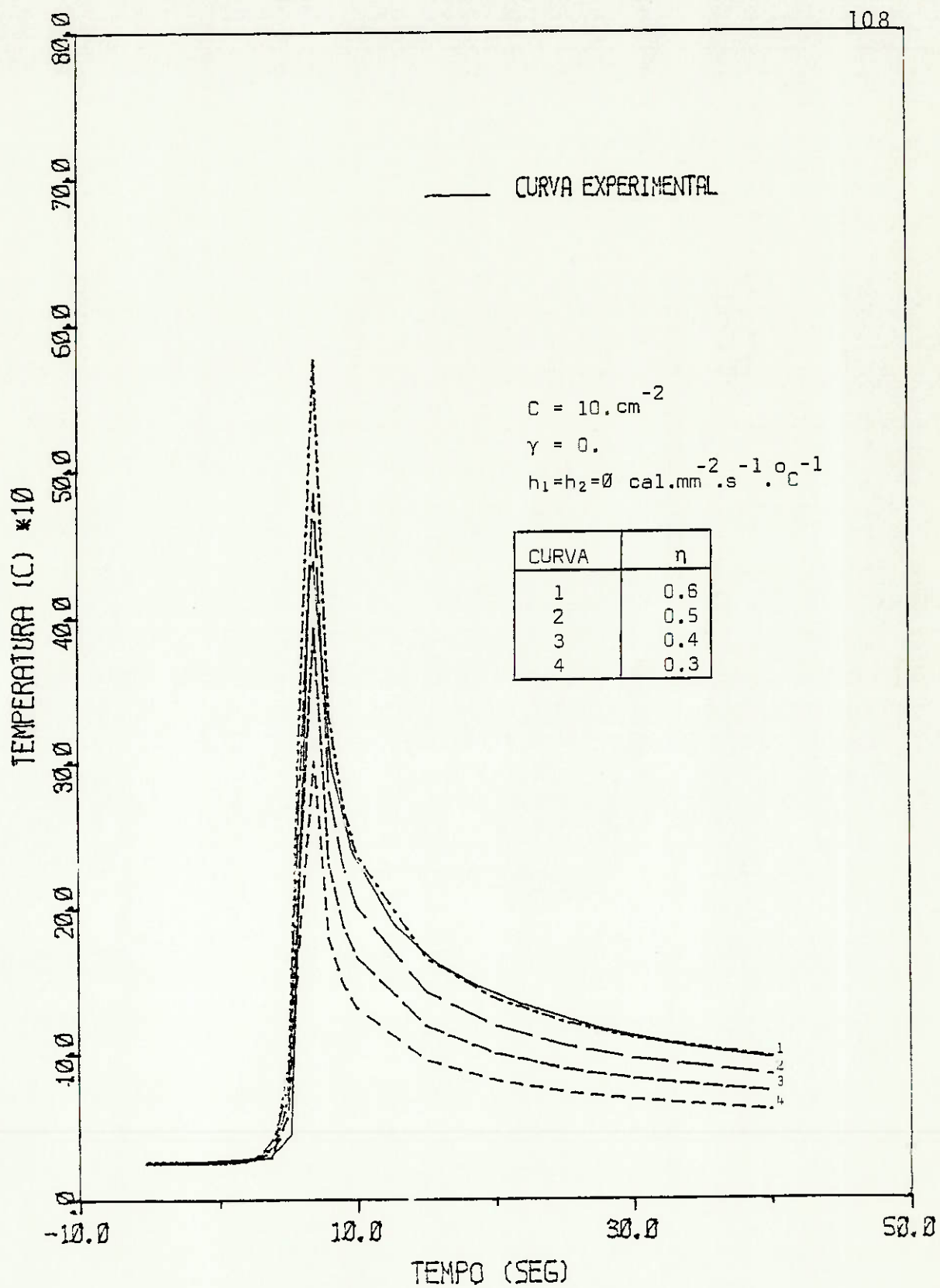


GRÁFICO 6.7 INFLUÊNCIA DO PARÂMETRO EFICIÊNCIA TÉRMICA DO PROCESSO NA DISTRIBUIÇÃO A ALTAS TEMPERATURAS

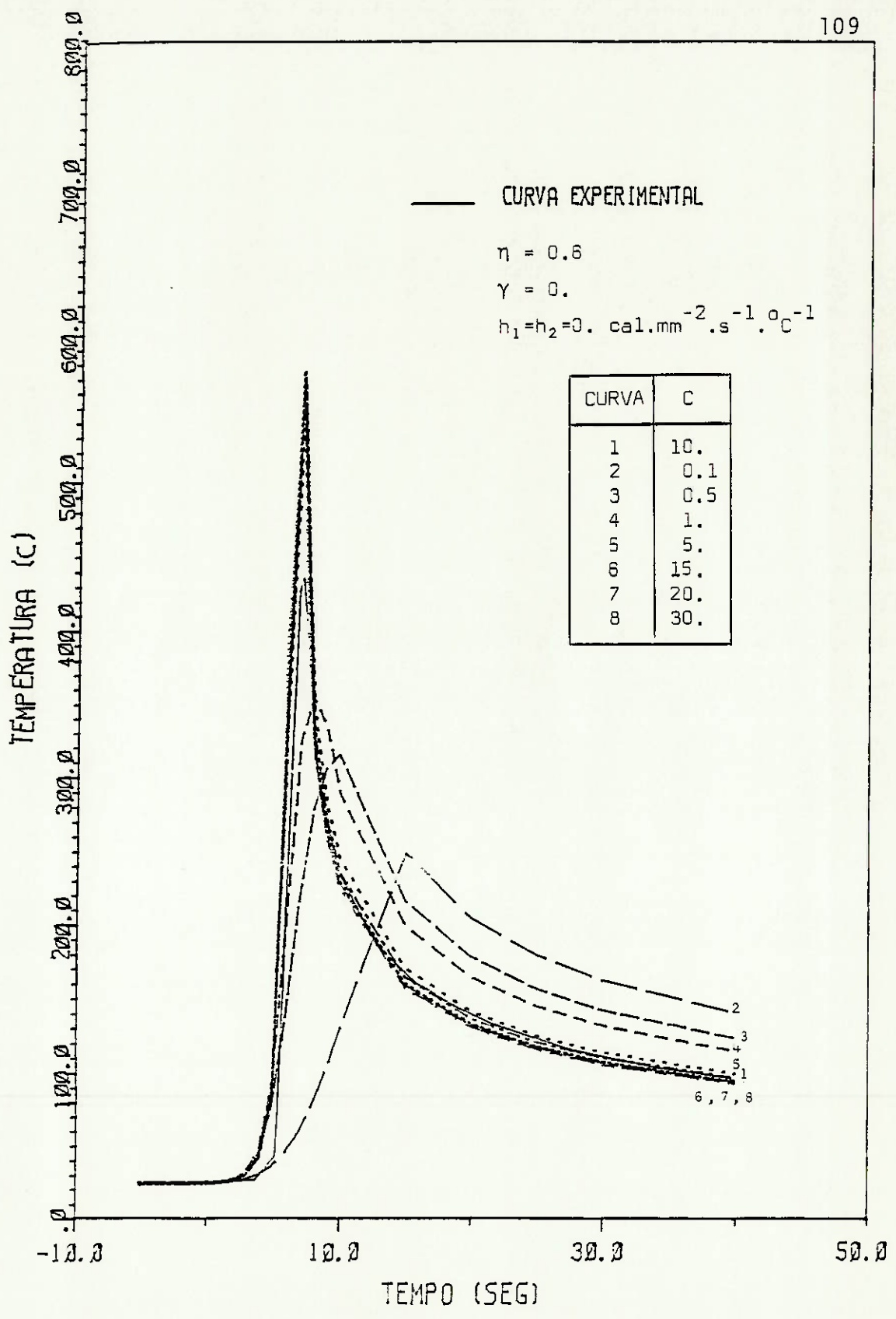


GRÁFICO 3.8-INFLUÊNCIA DO PARÂMETRO COEFICIENTE DE CONCENTRAÇÃO DA FONTE, NA DISTRIBUIÇÃO A ALTAS TEMPERATURAS

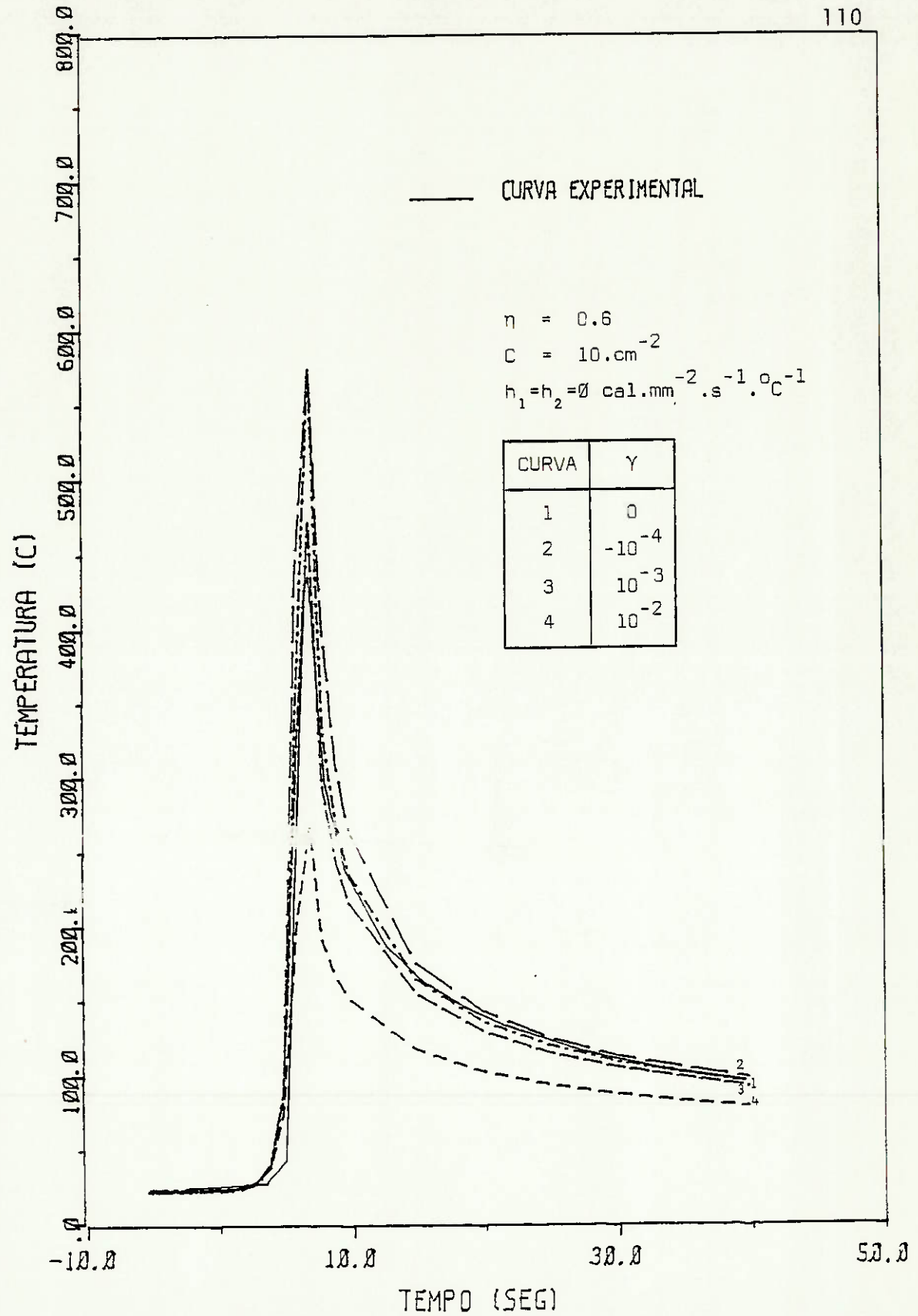


GRÁFICO 5.9-INFLUÊNCIA DO PARÂMETRO COEFICIENTE DE VARIAÇÃO DA CONDUTIBILIDADE TÉRMICA DO MATERIAL, NA DISTRIBUIÇÃO A ALTAS TEMPERATURAS

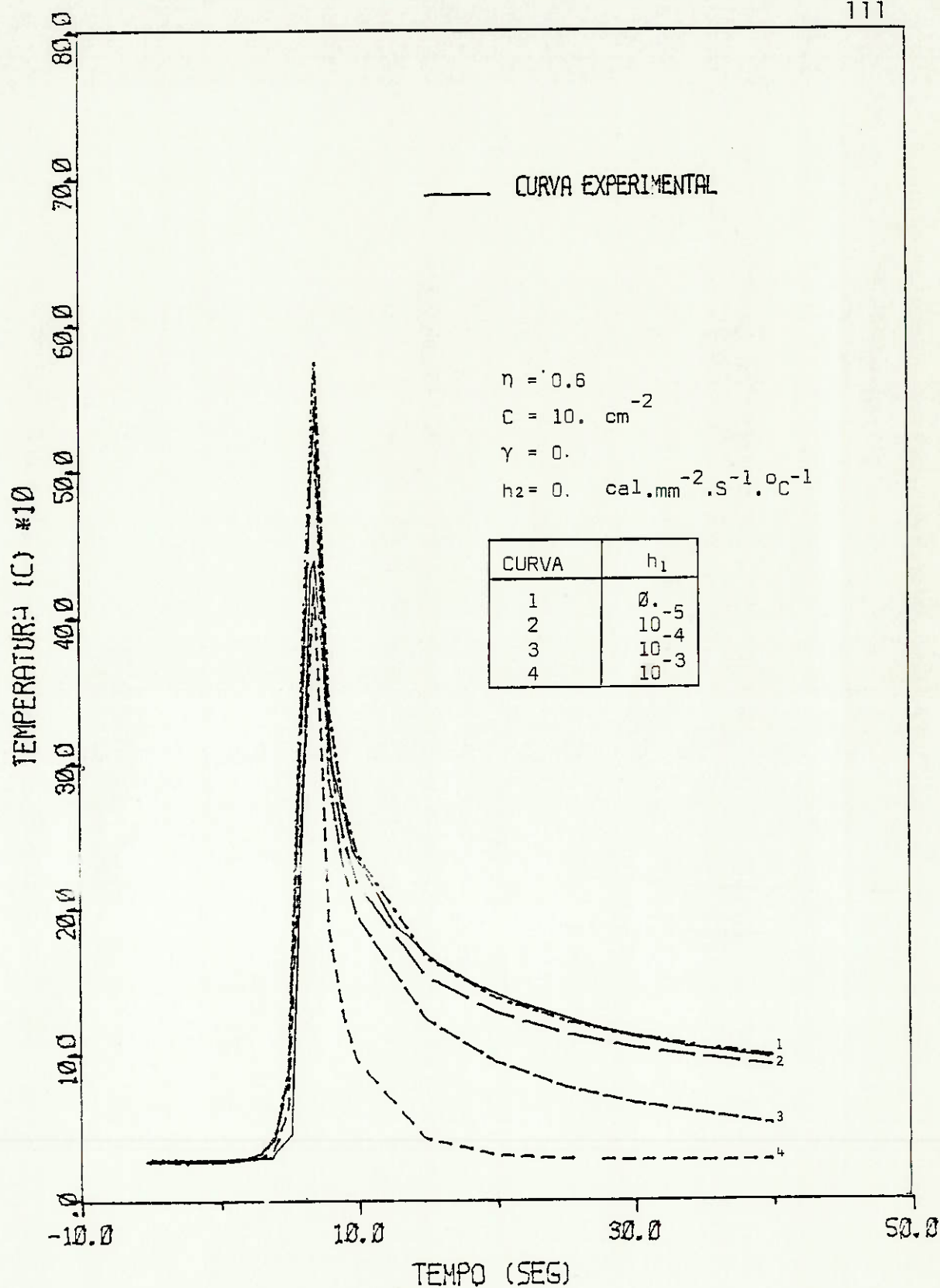


GRÁFICO 5.10- INFLUÊNCIA DO PARÂMETRO COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR DA SUPERFÍCIE SUPERIOR DO CORPO, NA DISTRIBUIÇÃO A ALTAS TEMPERATURAS

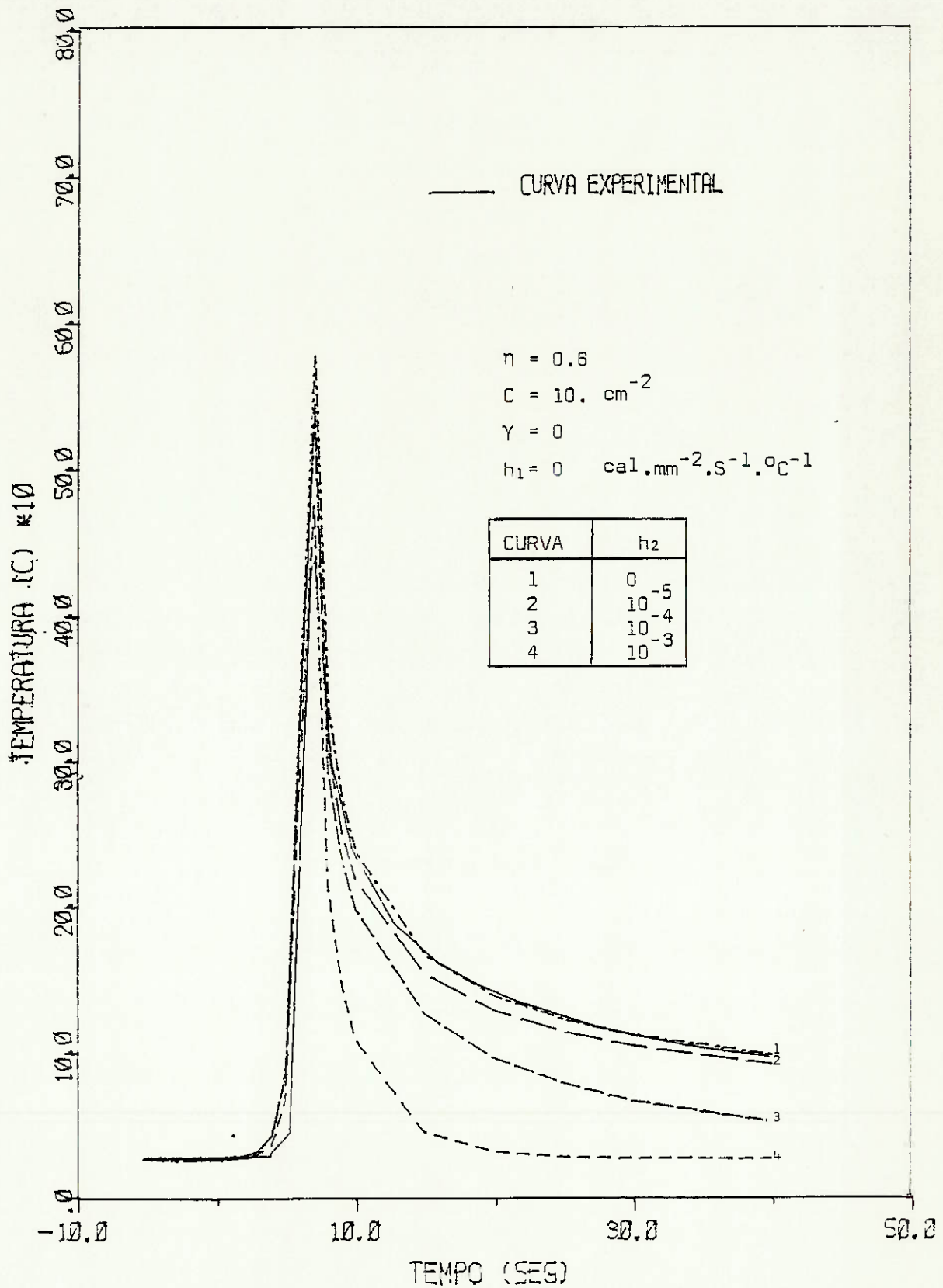


GRÁFICO 5.11-INFLUÊNCIA DO PARÂMETRO COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR DA SUPERFÍCIE INFERIOR DO CORPO, NA DISTRIBUIÇÃO A ALTAS TEMPERATURAS

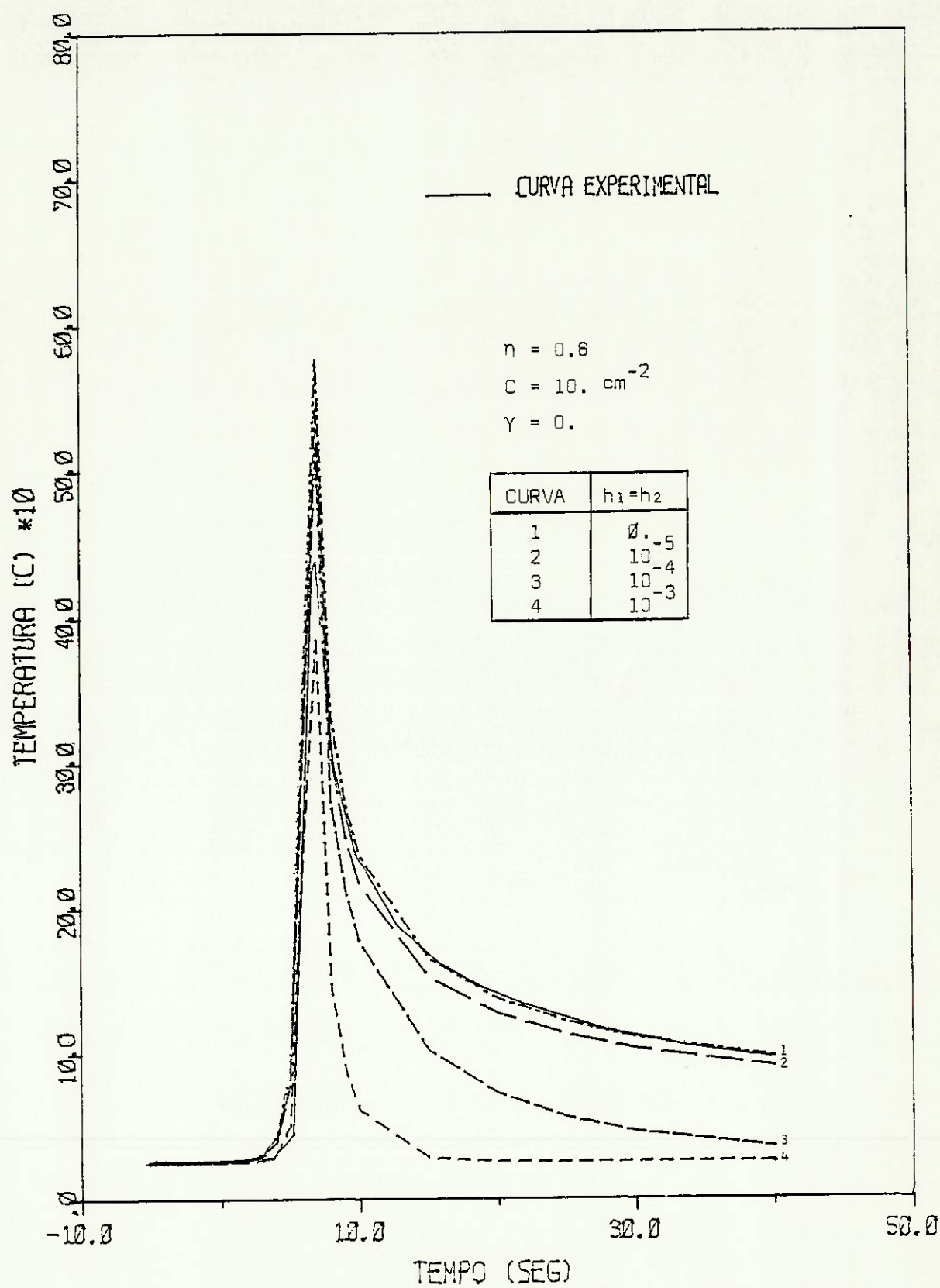


GRÁFICO 5.12 INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR DO CORPO NA DISTRIBUIÇÃO A ALTAS TEMPERATURAS

5.2 - ANÁLISE COMPARATIVA PRELIMINAR

Antes de realizar a análise numérica propriamente dita entre os resultados numéricos e os levantamentos experimentais, efetuar-se-á uma análise comparativa entre os resultados gerados através do programa (DISTEMP) desenvolvido no transcurso deste estudo e os resultados teóricos e experimentais transcritos do programa (TEMPER) [22], e assim detectar seus possíveis problemas computacionais.

O programa TEMPER foi desenvolvido em 1982, e teve como finalidade estimar as temperaturas de pico e velocidade de resfriamento em diversos pontos de uma solda. Esse programa está baseado na solução de ROSENTHAL [10] para uma fonte pontiforme, que se desloca com velocidade constante, sobre uma chapa de espessura finita e as outras dimensões infinitas.

Foram extraídos do programa TEMPER os seguintes itens:

1. Valores das variáveis de soldagem.
2. Valores das propriedades do material.
3. Resultados numéricos gerados pelo computador.

Na referência [22] foram transcritos os resultados experimentais que foram utilizados na análise comparativa do programa TEMPER.

Os resultados numéricos do programa TEMPER, foram obtidos somente para os pontos distantes 10 e 32mm, do centro da linha de soldagem e eles estão expostos nos gráficos 5.13 a 5.16, juntamente com diversos resultados numéricos calculados através do programa DISTEMP, utilizando os seguintes dados de entrada do programa TEMPER:

- 1) Variável de soldagem:
Processo de soldagem a arco submerso.
Voltagem = 30 volts.
Corrente = 470 ampères.
Velocidade da fonte = 9,04 mm/seg.

Temperatura inicial da chapa = 100°C .
Insumo de calor = 2707,0 cal/seg.
Eficiência térmica do processo = 79,994%.

2) Propriedades do material:

Material - aço.
Espessura da chapa = 28mm.
Difusividade térmica = 9,86mm.mm/seg.
Temperatura de fusão da chapa = 1.500°C .

A análise preliminar se dividiu em duas fase, sendo na primeira delas utilizadas as seguintes hipóteses:

1ª) A condutibilidade térmica do material permanece constante durante a soldagem, isto é, seu valor independe das variações de temperaturas do corpo ($\gamma=0$), tendo sido obtido da referência [22] $k_0 = 8,5 \times 10^{-3}$ (cal/mm/seg/ $^{\circ}\text{C}$).

2ª) As superfícies da chapa têm propriedades adiabáticas, isto é, não existe troca de calor entre o corpo e o meio ambiente ($h_1=h_2=0$).

Pode-se ver, com ajuda dos gráficos 5.13 e 5.14, que o programa DISTEMP proporcionou uma distribuição de temperaturas mais altas do que o programa TEMPER e superior também aos resultados experimentais, sendo mais acentuadas a diferença nos picos de temperatura. Isto é observado claramente no instante $t=3$ seg. no gráfico 5.13. Este fato deve-se ao baixo valor da condutibilidade térmica do material adotado para o aço (HY-80), considerado na referência [22], como também às condições adiabáticas admitidas para a superfície superior e inferior do corpo.

Na fase seguinte, foram realizadas simultaneamente duas corridas de computador com o programa DISTEMP. Considerou-se, na primeira corrida, as seguintes hipóteses:

1ª) Condições adiabáticas nas superfícies da chapa ($h_1=h_2=0$).

2ª) A condutibilidade térmica do material independe das

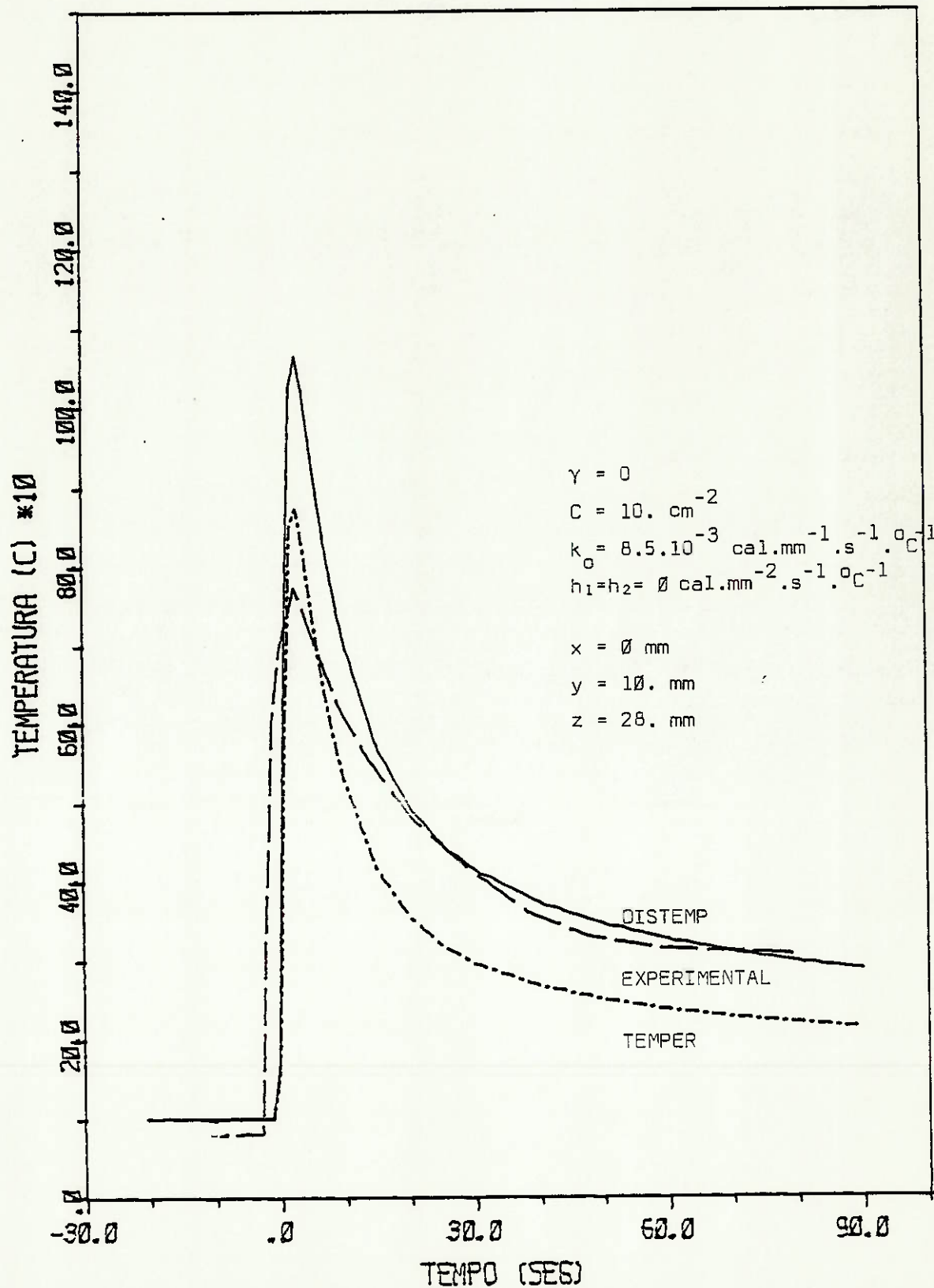


GRÁFICO 5.13-PRIMEIRA FASE DA ANÁLISE PRELIMINAR ENTRE OS RESULTADOS GERADOS ATRAVÉS DOS PROGRAMAS TEMPER E DISTEMP, PARA O PONTO DISTANTE 10mm DA LINHA DE SOLDAGEM

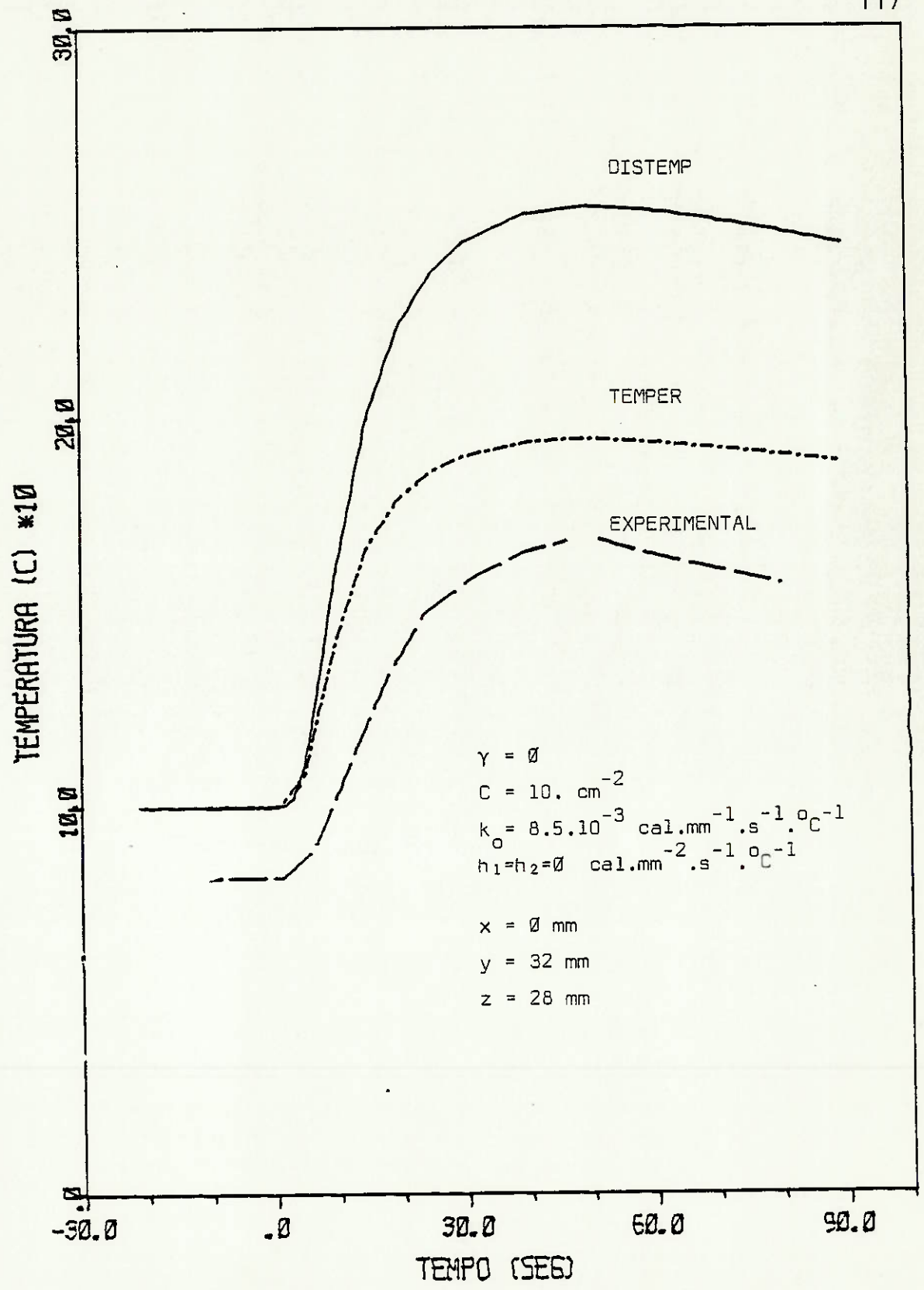


GRÁFICO 5.14-PRIMEIRA FASE DA ANÁLISE PRELIMINAR ENTRE OS RESULTADOS GERADOS ATRAVÉS DOS PROGRAMAS TEMPER E DISTEMP, PARA O PONTO DISTANTE 32mm DA LINHA DE SOLDAGEM

variações de temperaturas no corpo ($\gamma=0$), com o valor de $k_0 = 11,012 \times 10^{-3}$ (cal/mm/seg/ $^{\circ}$ C)*

Os resultados desta corrida estão expostos nos gráficos 5.15 e 5.16, pelas curvas identificadas com o número 1.

Na segunda corrida foram admitidas as seguintes hipóteses:

1^a) Condições adiabáticas nas superfícies de chapa ($h_1 = h_2 = 0$).

2^a) A condutibilidade térmica é dependente das variações de temperatura do corpo ($\gamma \neq 0$) e seu valor para $T=0^{\circ}$ C foi tomado igual a $k_0 = 11,012 \times 10^{-3}$ (cal/mm/seg/ $^{\circ}$ C).

Os resultados desta corrida estão expostos nos gráficos 5.15 e 5.16, pelas curvas identificadas com o número 2.

Para os pontos distantes da linha de soldagem, pode-se estabelecer que os resultados finais produzidos pelo programa DISTEMP não sofrerão alterações expressivas quer se considerem ou não a dependência da variável condutibilidade térmica do material com as variações de temperatura do corpo (vide gráfico 5.16). Por outro lado, para pontos próximos da linha de soldagem, pode-se dizer que o programa DISTEMP gera uma distribuição de temperaturas cuja aproximação com a curva dos levantamentos experimentais é satisfatório, se levarmos em conta a independência da variável condutibilidade térmica com as variações de temperatura do corpo ($\gamma=0$). O mesmo não ocorre quando se considera a dependência desta variável ($\gamma \neq 0$) nos instantes de maiores temperaturas (vide gráfico 5.15).

Este fenômeno deve-se à diminuição da condutibilidade térmica do material com o aumento da temperatura do corpo.

* O valor da condutibilidade térmica do material, nessa análise preliminar foi obtido de uma análise de regressão prévia, apresentada no apêndice IV.

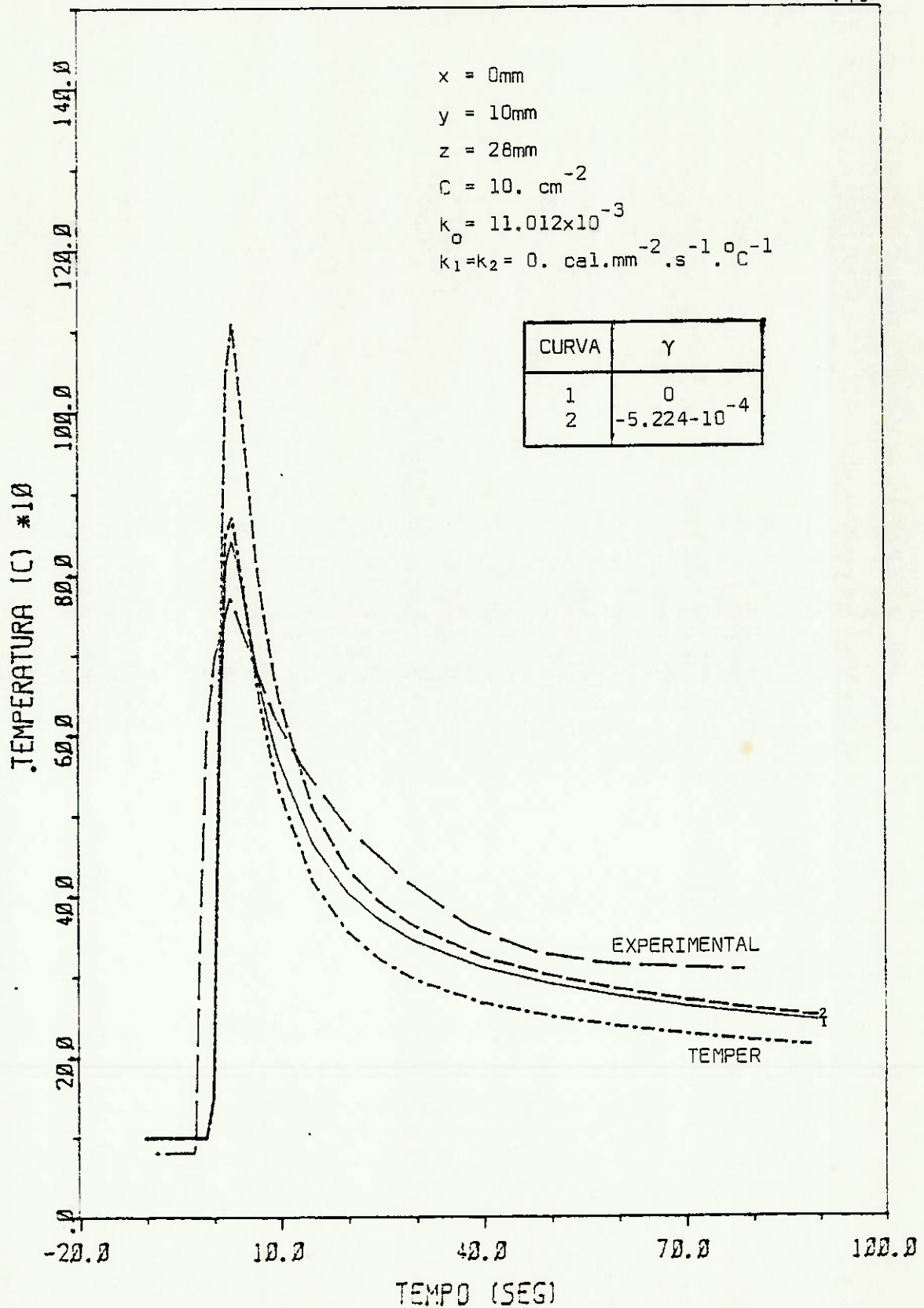


GRÁFICO 5.15-SEGUNDA FASE DA ANÁLISE PRELIMINAR ENTRE OS RESULTADOS GERADOS ATRAVÉS DOS PROGRAMAS TEMPER E DISTEMP, PARA O PONTO DISTANTE 10mm DA LINHA DE SOLDAGEM

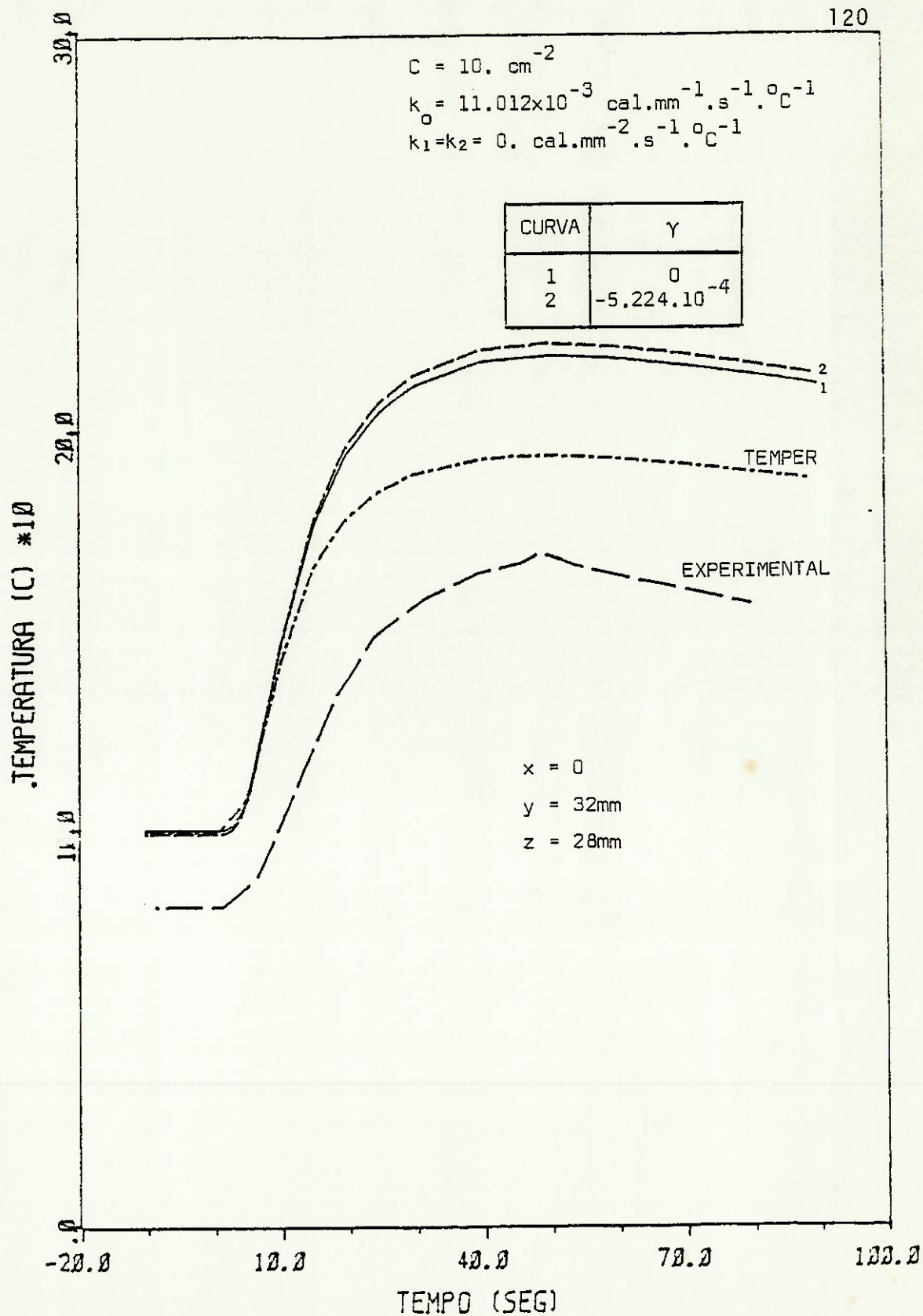


GRÁFICO 5.16-SEGUNDA FASE DA ANÁLISE PRELIMINAR ENTRE OS RESULTADOS GERADOS ATRAVÉS DOS PROGRAMAS TEMPER E DISTEMP, PARA O PONTO DISTANTE 32mm DA LINHA DE SOLDAGEM.

5.3 - SELEÇÃO DOS CASOS PARA CÁLCULO NUMÉRICO

Vinte e um casos foram selecionados para serem submetidos à análise pelo computador, sendo que os valores das variáveis de soldagem e os valores das propriedades dos materiais adotados para o cálculo numérico são apresentados nas tabelas 5.3 e 5.4. Como as corridas de computador antecederam os ensaios experimentais, todos os casos foram escolhidos observando as seguintes condições:

- 1^a) Os valores das variáveis de soldagem adotados devem ser adequados aos processos de arco elétrico com eletrodo de tungstênio e proteção de gás inerte, utilizando corrente contínua e polaridade direta*.
- 2^a) As variáveis de soldagem não devem atingir valores que simulem estados de fusão da linha de aquecimento do corpo.
- 3^a) A localização dos pontos onde as temperaturas teóricas serão estimadas, deve ser efetuada de tal maneira que o programa seja forçado a utilizar as formas de solução apresentadas.
- 4^a) As variações na velocidade da fonte devem produzir diferenças no insumo de calor fornecido ao corpo.

Os resultados numéricos obtidos serão utilizados para a posterior análise comparativa.

5.4 - APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS NUMÉRICOS

As figuras 5.1 a 5.21 mostram as distribuições teóricas de temperaturas geradas pelo programa DISTEMP. No capítulo 7, estas distribuições, juntamente com os resultados experimentais, permitirão avaliar as limitações e validade do método-solução aqui apresentado.

* No capítulo 6, seção 6.1, serão expostas as razões que levaram o autor a utilizar este processo de soldagem.

TABELA 5.3 - DADOS DE ENTRADA PARA O CÁLCULO NUMÉRICO DA LIGA ALUMÍNIO-MAGNÉSIO (1050)

VARIÁVEL	UNIDADES	SÍMBOLO	VALORES DE ENTRADA					
			USO 1	USO 2	USO 3	USO 4	USO 5	USO 6
CONDIÇÃO DE TEMPERATURA	$ALUM^{1,5} \cdot S^{1,5} \cdot O^{1,1}$	008	$4,744341 \cdot 10^{-2}$	$4,744341 \cdot 10^{-2}$	$4,744341 \cdot 10^{-2}$	$4,744341 \cdot 10^{-2}$	$4,744341 \cdot 10^{-2}$	$4,744341 \cdot 10^{-2}$
DIFUSIVIDADE TÉRMICA	$cm^2 \cdot s^{-1}$	ALPDA	54,092	54,092	54,092	54,092	54,092	54,092
VELOCIDADE DE FLUXO	cm/s	AV	14	14	14	14	14	14
CONDIÇÃO ELÉTRICA	PERÍODO	AI	140	140	140	140	140	140
VELOCIDADE DE AUMENTO DO FUSIL	$cm \cdot s^{-1}$	V	0	0	0	0	0	0
COEFICIENTE DE VISCOSIDADE	$cm \cdot mm^{-2} \cdot s^{-1} \cdot O^{1,1}$	G	0	0	0	0	0	0
COEFICIENTE DE TEMPERATURA DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR	$cm \cdot mm^{-2} \cdot s^{-1} \cdot O^{1,1}$	H1	0	0	0	0	0	0
COEFICIENTE DE TEMPERATURA DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR ADIFUSIVO	$cm \cdot mm^{-2} \cdot s^{-1} \cdot O^{1,1}$	H2	0	0	0	0	0	0
ESPESURA DA LIGA	mm	IM	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
EFICIÊNCIA TÉRMICA DO PROCESSO		ET	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
CONDIÇÃO DE TEMPERATURA DE FUSÃO	cm^3	GC0	10	10	10	10	10	10
TEMPERATURA DE FUSÃO DA LIGA	$^{\circ}C$	TL0	657	657	657	657	657	657
TEMPERATURA INICIAL DA LIGA	$^{\circ}C$	TI	17	17	17	17	17	17
TEMPERATURA DO RECIPIENTE	$^{\circ}C$	TR	24	24	24	24	24	24

TABELA 5.3 - CONTINUAÇÃO

VARIÁVEL	UNIDADES	SÍMBOLO	VALORES DE 1960-1965			
			1960	1961	1962	1963
PRODUTO BRUTO INTERIORE	$10^6 \text{ R\$ } \cdot \text{An}^{-1}$	PIB	4.744,3	4.744,3	4.744,3	4.744,3
POPULAÇÃO	POPUL. I	POP	94.692	94.692	94.692	94.692
ÁREA ÚTIL (HA)	HA	AJ	14	14	14	14
COMÉRCIO LÍQUIDO	ARRECA	AL	198	198	198	198
VALOR ADIC. DE SERVIÇOS	MS ³	V	8	8	8	8
CONTRIBUIÇÃO DE SERVIÇOS DE COMÉRCIO		G	8	8	8	8
INDICADOR DE PRODUTIVIDADE DE SERVIÇOS	$\text{AL} \cdot \text{POP}^{-2} \cdot \text{OC}^{-1}$	IP ₁	8	8	8	8
INDICADOR DE PRODUTIVIDADE DE SERVIÇOS	$\text{AL} \cdot \text{POP}^{-2} \cdot \text{OC}^{-1}$	IP ₂	8	8	8	8
PRODUTIVIDADE DE SERVIÇOS	MS	PM	4,5	4,5	4,5	4,5
PRODUTIVIDADE DE SERVIÇOS		PI	8,6	8,6	8,6	8,6
CONTRIBUIÇÃO DE SERVIÇOS DE COMÉRCIO	MS ²	BITL	18	18	18	18
PRODUTIVIDADE DE SERVIÇOS DE COMÉRCIO	OC	PIU	657	657	657	657
PRODUTIVIDADE DE SERVIÇOS DE COMÉRCIO	L	PI	18	18	18	18
PRODUTIVIDADE DE SERVIÇOS DE COMÉRCIO	V	PI	75	75	75	75

TABELA 5.4 - DADOS DE ENTRADA PARA O CÁLCULO NUMÉRICO DO ALUMÍNIO PURO (5057)

Condição	Módulo	ID	Dados de Entrada					
			ESD 1	ESD 2	ESD 3	ESD 4	ESD 5	ESD 6
Cond. 1 (100% Al)	100%	100	1,1110ZAU ²	3,1110ZAU ²	3,1110ZAU ²	3,1110ZAU ²	3,1110ZAU ²	3,1110ZAU ²
Cond. 2 (50% Al)	50%	50	5,1110	5,1110	5,1110	5,1110	5,1110	5,1110
Cond. 3 (25% Al)	25%	25	14	14	14	14	14	14
Cond. 4 (12,5% Al)	12,5%	12,5	140	140	140	140	140	140
Cond. 5 (6,25% Al)	6,25%	6,25	2	2	2	2	2	2
Cond. 6 (3,125% Al)	3,125%	3,125	8	8	8	8	8	8
Cond. 7 (1,5625% Al)	1,5625%	1,5625	8	8	8	8	8	8
Cond. 8 (0,78125% Al)	0,78125%	0,78125	8	8	8	8	8	8
Cond. 9 (0,390625% Al)	0,390625%	0,390625	8	8	8	8	8	8
Cond. 10 (0,1953125% Al)	0,1953125%	0,1953125	8	8	8	8	8	8
Cond. 11 (0,09765625% Al)	0,09765625%	0,09765625	8	8	8	8	8	8
Cond. 12 (0,048828125% Al)	0,048828125%	0,048828125	8	8	8	8	8	8
Cond. 13 (0,0244140625% Al)	0,0244140625%	0,0244140625	8	8	8	8	8	8
Cond. 14 (0,01220703125% Al)	0,01220703125%	0,01220703125	8	8	8	8	8	8
Cond. 15 (0,006103515625% Al)	0,006103515625%	0,006103515625	8	8	8	8	8	8
Cond. 16 (0,0030517578125% Al)	0,0030517578125%	0,0030517578125	8	8	8	8	8	8
Cond. 17 (0,00152587890625% Al)	0,00152587890625%	0,00152587890625	8	8	8	8	8	8
Cond. 18 (0,000762939453125% Al)	0,000762939453125%	0,000762939453125	8	8	8	8	8	8
Cond. 19 (0,0003814697265625% Al)	0,0003814697265625%	0,0003814697265625	8	8	8	8	8	8
Cond. 20 (0,00019073486328125% Al)	0,00019073486328125%	0,00019073486328125	8	8	8	8	8	8
Cond. 21 (0,000095367431640625% Al)	0,000095367431640625%	0,000095367431640625	8	8	8	8	8	8
Cond. 22 (0,0000476837158203125% Al)	0,0000476837158203125%	0,0000476837158203125	8	8	8	8	8	8
Cond. 23 (0,00002384185791015625% Al)	0,00002384185791015625%	0,00002384185791015625	8	8	8	8	8	8
Cond. 24 (0,000011920928955078125% Al)	0,000011920928955078125%	0,000011920928955078125	8	8	8	8	8	8
Cond. 25 (0,0000059604644775390625% Al)	0,0000059604644775390625%	0,0000059604644775390625	8	8	8	8	8	8
Cond. 26 (0,00000298023223876953125% Al)	0,00000298023223876953125%	0,00000298023223876953125	8	8	8	8	8	8
Cond. 27 (0,000001490116119384765625% Al)	0,000001490116119384765625%	0,000001490116119384765625	8	8	8	8	8	8
Cond. 28 (0,0000007450580596923828125% Al)	0,0000007450580596923828125%	0,0000007450580596923828125	8	8	8	8	8	8
Cond. 29 (0,00000037252902984619140625% Al)	0,00000037252902984619140625%	0,00000037252902984619140625	8	8	8	8	8	8
Cond. 30 (0,000000186264514923095703125% Al)	0,000000186264514923095703125%	0,000000186264514923095703125	8	8	8	8	8	8
Cond. 31 (0,0000000931322574615478515625% Al)	0,0000000931322574615478515625%	0,0000000931322574615478515625	8	8	8	8	8	8
Cond. 32 (0,00000004656612873077392578125% Al)	0,00000004656612873077392578125%	0,00000004656612873077392578125	8	8	8	8	8	8
Cond. 33 (0,000000023283064365386962890625% Al)	0,000000023283064365386962890625%	0,000000023283064365386962890625	8	8	8	8	8	8
Cond. 34 (0,0000000116415321826934814453125% Al)	0,0000000116415321826934814453125%	0,0000000116415321826934814453125	8	8	8	8	8	8
Cond. 35 (0,00000000582076609134674072265625% Al)	0,00000000582076609134674072265625%	0,00000000582076609134674072265625	8	8	8	8	8	8
Cond. 36 (0,000000002910383045673370361328125% Al)	0,000000002910383045673370361328125%	0,000000002910383045673370361328125	8	8	8	8	8	8
Cond. 37 (0,0000000014551915228366851806640625% Al)	0,0000000014551915228366851806640625%	0,0000000014551915228366851806640625	8	8	8	8	8	8
Cond. 38 (0,00000000072759576141834259033203125% Al)	0,00000000072759576141834259033203125%	0,00000000072759576141834259033203125	8	8	8	8	8	8
Cond. 39 (0,000000000363797880709171295166015625% Al)	0,000000000363797880709171295166015625%	0,000000000363797880709171295166015625	8	8	8	8	8	8
Cond. 40 (0,0000000001818989403545856475780078125% Al)	0,0000000001818989403545856475780078125%	0,0000000001818989403545856475780078125	8	8	8	8	8	8
Cond. 41 (0,00000000009094947017729282378900390625% Al)	0,00000000009094947017729282378900390625%	0,00000000009094947017729282378900390625	8	8	8	8	8	8
Cond. 42 (0,000000000045474735088646411894951953125% Al)	0,000000000045474735088646411894951953125%	0,000000000045474735088646411894951953125	8	8	8	8	8	8
Cond. 43 (0,000000000022737367544323205947479765625% Al)	0,000000000022737367544323205947479765625%	0,000000000022737367544323205947479765625	8	8	8	8	8	8
Cond. 44 (0,0000000000113686837721616102972398828125% Al)	0,0000000000113686837721616102972398828125%	0,0000000000113686837721616102972398828125	8	8	8	8	8	8
Cond. 45 (0,00000000000568434188608050986199444140625% Al)	0,00000000000568434188608050986199444140625%	0,00000000000568434188608050986199444140625	8	8	8	8	8	8
Cond. 46 (0,000000000002842170943040254930997220703125% Al)	0,000000000002842170943040254930997220703125%	0,000000000002842170943040254930997220703125	8	8	8	8	8	8
Cond. 47 (0,0000000000014210854715201274654986103515625% Al)	0,0000000000014210854715201274654986103515625%	0,0000000000014210854715201274654986103515625	8	8	8	8	8	8
Cond. 48 (0,00000000000071054273576006373274930517578125% Al)	0,00000000000071054273576006373274930517578125%	0,00000000000071054273576006373274930517578125	8	8	8	8	8	8
Cond. 49 (0,0000000000003552713678800318663746525890625% Al)	0,0000000000003552713678800318663746525890625%	0,0000000000003552713678800318663746525890625	8	8	8	8	8	8
Cond. 50 (0,00000000000017763568394001593318732629453125% Al)	0,00000000000017763568394001593318732629453125%	0,00000000000017763568394001593318732629453125	8	8	8	8	8	8
Cond. 51 (0,00000000000008881784197000796659366312265625% Al)	0,00000000000008881784197000796659366312265625%	0,00000000000008881784197000796659366312265625	8	8	8	8	8	8
Cond. 52 (0,0000000000000444089209850039832968315628125% Al)	0,0000000000000444089209850039832968315628125%	0,0000000000000444089209850039832968315628125	8	8	8	8	8	8
Cond. 53 (0,0000000000000222044604925019916484157640625% Al)	0,0000000000000222044604925019916484157640625%	0,0000000000000222044604925019916484157640625	8	8	8	8	8	8
Cond. 54 (0,00000000000001110223024625099582420788203125% Al)	0,00000000000001110223024625099582420788203125%	0,00000000000001110223024625099582420788203125	8	8	8	8	8	8
Cond. 55 (0,00000000000000555111512312504791210394015625% Al)	0,00000000000000555111512312504791210394015625%	0,00000000000000555111512312504791210394015625	8	8	8	8	8	8
Cond. 56 (0,000000000000002775557561562502395551970078125% Al)	0,000000000000002775557561562502395551970078125%	0,000000000000002775557561562502395551970078125	8	8	8	8	8	8
Cond. 57 (0,00000000000000138777878078125011977759850390625% Al)	0,00000000000000138777878078125011977759850390625%	0,00000000000000138777878078125011977759850390625	8	8	8	8	8	8
Cond. 58 (0,000000000000000693889390390625059888799251953125% Al)	0,000000000000000693889390390625059888799251953125%	0,000000000000000693889390390625059888799251953125	8	8	8	8	8	8
Cond. 59 (0,000000000000000346944695195312502994439962578125% Al)	0,000000000000000346944695195312502994439962578125%	0,000000000000000346944695195312502994439962578125	8	8	8	8	8	8
Cond. 60 (0,00000000000000017347234759765625014972199812890625% Al)	0,00000000000000017347234759765625014972199812890625%	0,00000000000000017347234759765625014972199812890625	8	8	8	8	8	8
Cond. 61 (0,0000000000000000867361737988281250074860999064453125% Al)	0,0000000000000000867361737988281250074860999064453125%	0,0000000000000000867361737988281250074860999064453125	8	8	8	8	8	8
Cond. 62 (0,00000000000000004336808689941406250037430499532265625% Al)	0,00000000000000004336808689941406250037430499532265625%	0,00000000000000004336808689941406250037430499532265625	8	8	8	8	8	8
Cond. 63 (0,000000000000000021684043449707031250018715249976628125% Al)	0,000000000000000021684043449707031250018715249976628125%	0,000000000000000021684043449707031250018715249976628125	8	8	8	8	8	8
Cond. 64 (0,00000000000000001084202172485351562500093576249640625% Al)	0,00000000000000001084202172485351562500093576249640625%	0,00000000000000001084202172485351562500093576249640625	8	8	8	8	8	8
Cond. 65 (0,0000000000000000054210108624267578125000467881248203125% Al)	0,0000000000000000054210108624267578125000467881248203125%	0,0000000000000000054210108624267578125000467881248203125	8	8	8	8	8	8
Cond. 66 (0,000000000000000002710505431213378906250002339406241015625% Al)	0,000000000000000002710505431213378906250002339406241015625%	0,000000000000000002710505431213378906250002339406241015625	8	8	8	8	8	8
Cond. 67 (0,0000000000000000013552527156066894531250001169703122078125% Al)	0,0000000000000000013552527156066894531250001169703122078125%	0,0000000000000000013552527156066894531250001169703122078125	8	8	8	8	8	8
Cond. 68 (0,000000000000000000677626357803344726562500005848515610390625% Al)	0,000000000000000000677626357803344726562500005848515610390625%	0,000000000000000000677626357803344726562500005848515610390625	8	8	8	8	8	8
Cond. 69 (0,00000000000000000033881317890167236328125000029242578051953125% Al)	0,00000000000000000033881317890167236328125000029242578051953125%	0,00000000000000000033881317890167236328125000029242578051953125	8	8	8	8	8	8
Cond. 70 (0,00000000000000000016940658945083618164062500001462128902578125% Al)	0,00000000000000000016940658945083618164062500001462128902578125%	0,000000000000						

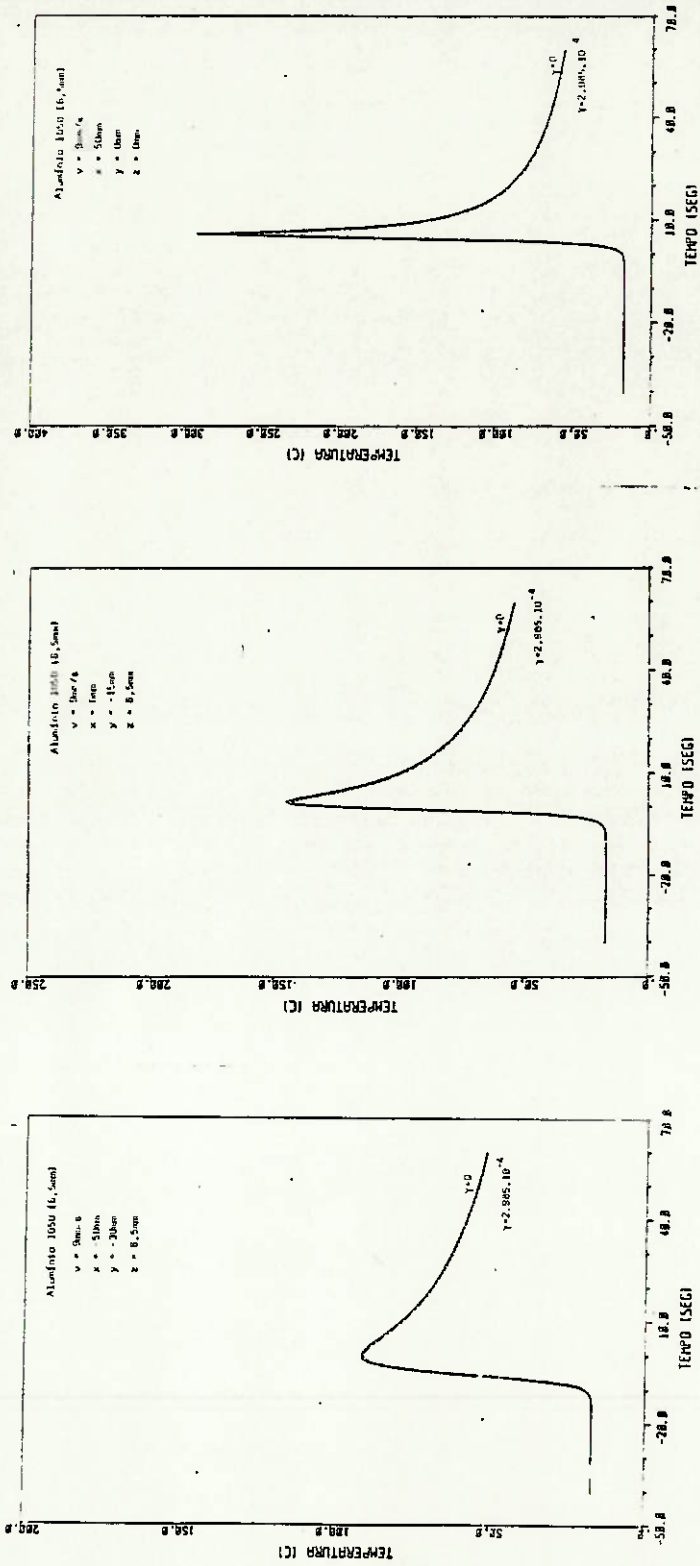


FIGURA 5.1 - DISTRIBUIÇÕES TEÓRICAS DE TEMPERATURAS GERADAS PELO PROGRAMA "DISTEMP", UTILIZANDO OS VALORES DO CASO 1 DA TABELA 5.3

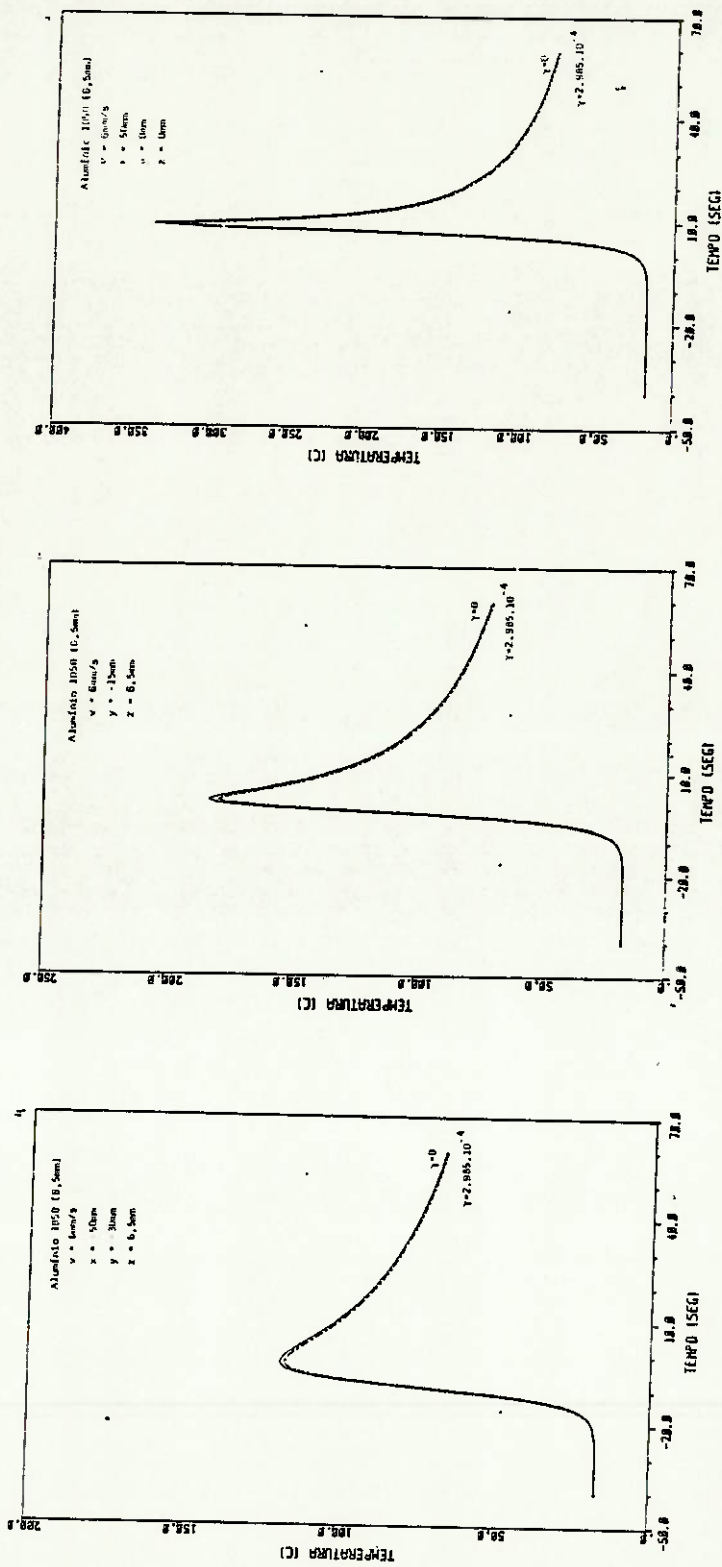


FIGURA 5.2 - DISTRIBUIÇÕES TEÓRICAS DE TEMPERATURAS GERADAS PELO PROGRAMA "DISTEMP", UTILIZANDO OS VALORES DO CASO 2 DA TABELA 5.3

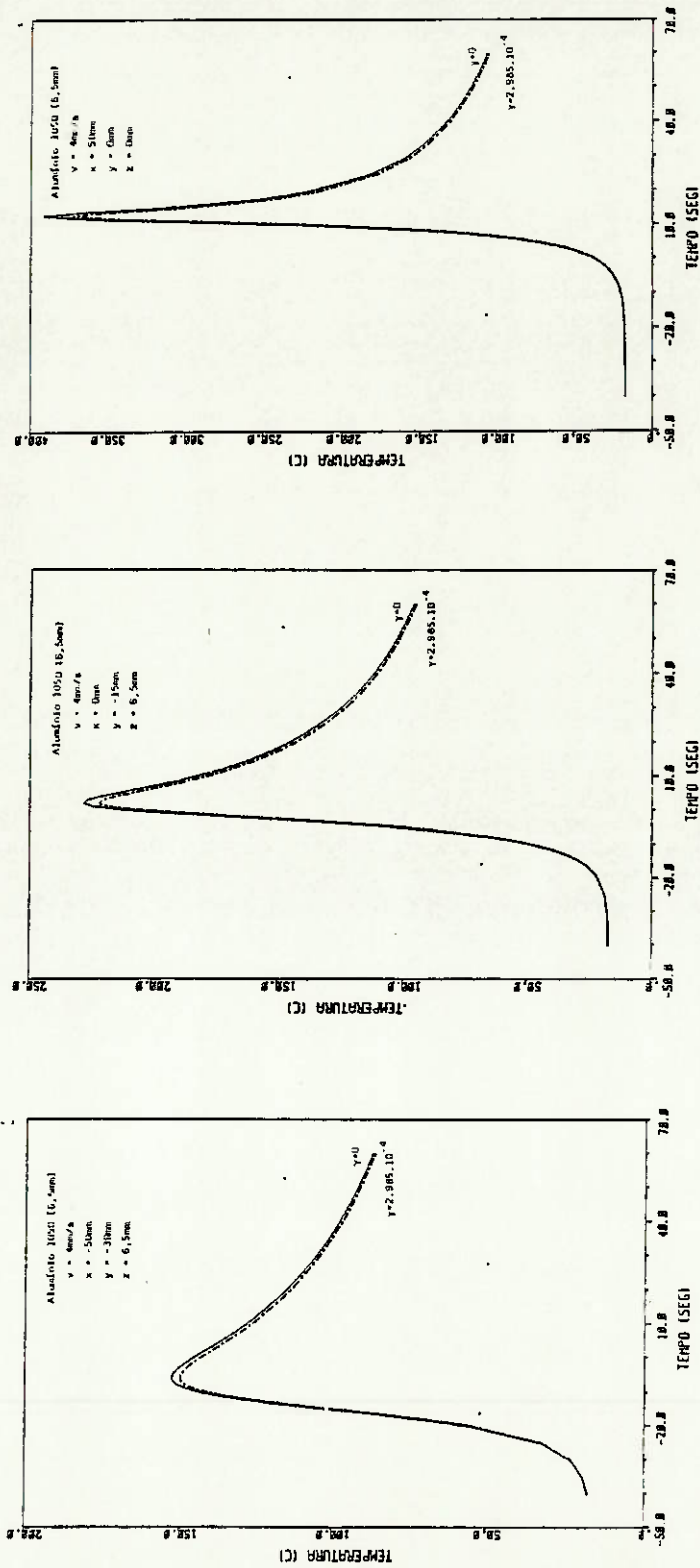


FIGURA 5.3 - DISTRIBUIÇÕES TEÓRICAS DE TEMPERATURAS GERADAS PELO PROGRAMA "DISTEMP", UTILIZANDO OS VALORES DO CASO 3 DA TABELA 5.3

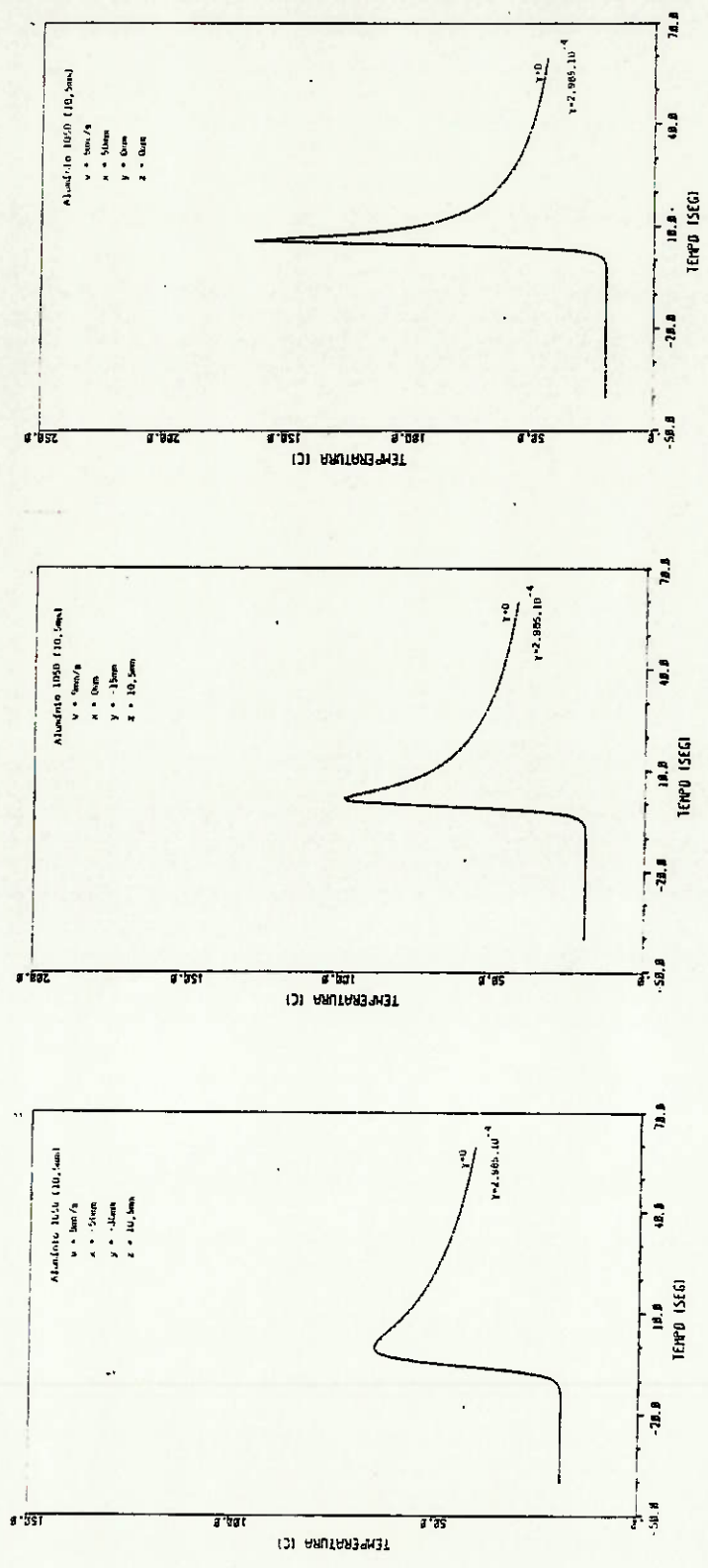


FIGURA 5.4 - DISTRIBUIÇÕES TEÓRICAS DE TEMPERATURAS GERADAS PELO PROGRAMA "DISTEMP", UTILIZANDO OS VALORES DO CASO 4 DA TABELA 5.3

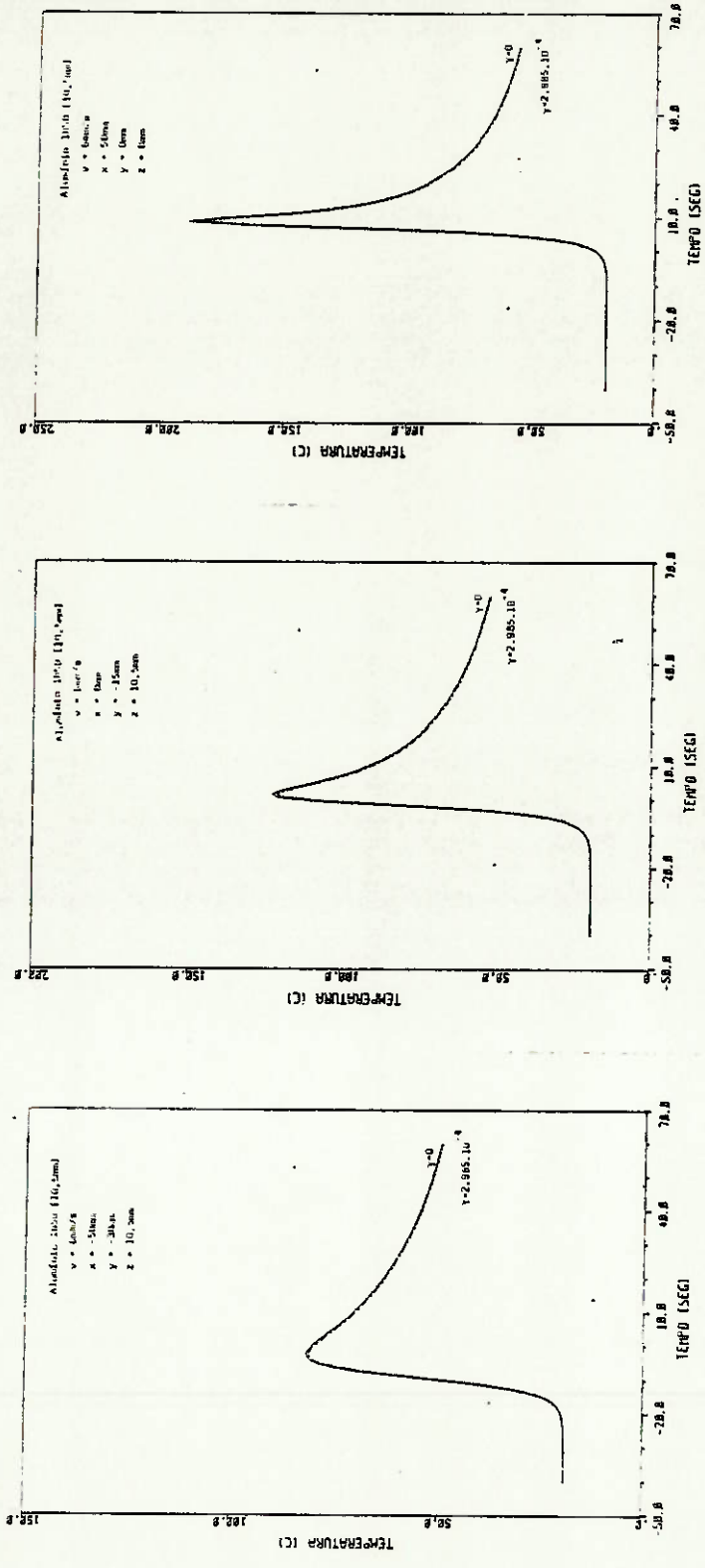


FIGURA 5.5 - DISTRIBUIÇÕES TEÓRICAS DE TEMPERATURAS GERADAS PELO PROGRAMA "DISTEMP", UTILIZANDO OS VALORES DO CASO 5 DA TABELA 5.3

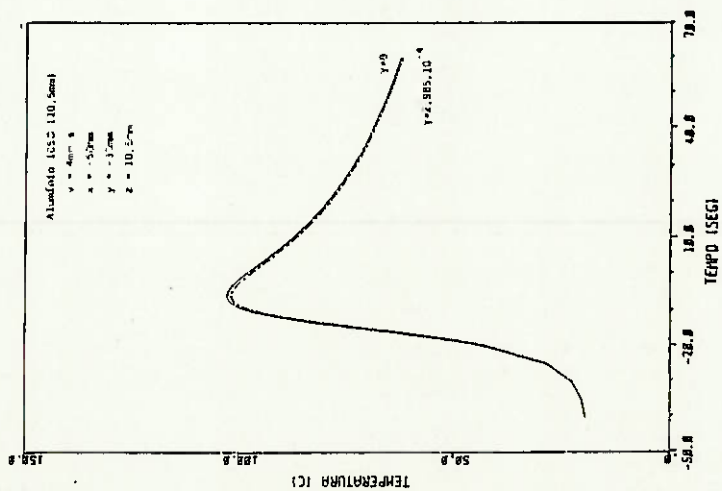
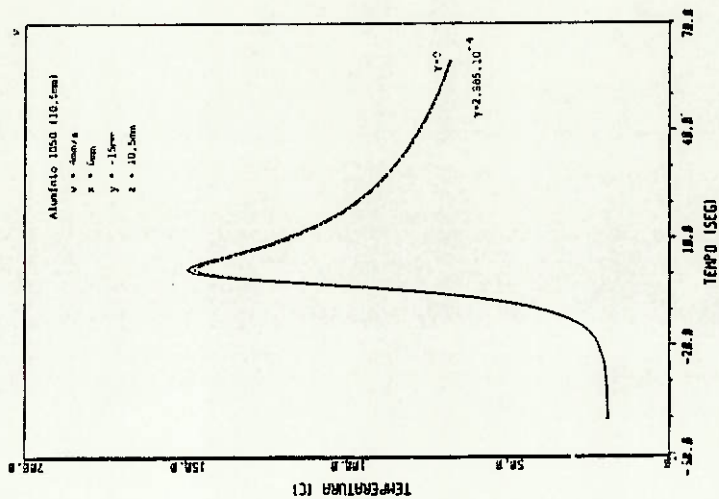
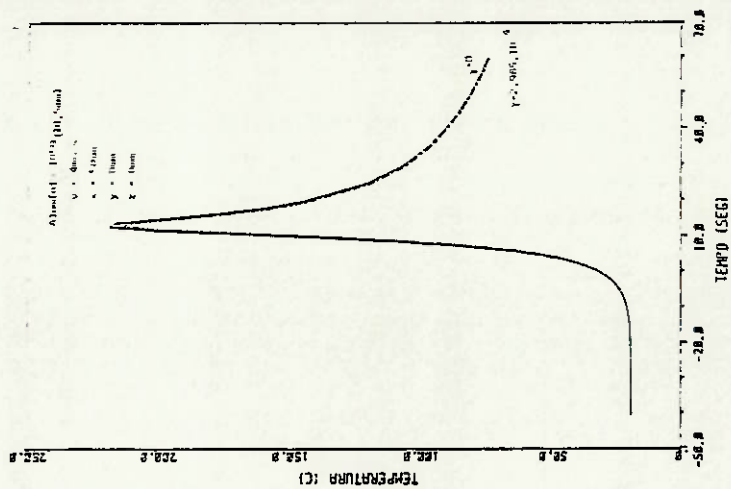


FIGURA 5.6 - DISTRIBUIÇÕES TEÓRICAS DE TEMPERATURAS GERADAS PELO PROGRAMA "DISTEMP", UTILIZANDO OS VALORES DO CASO 6 DA TABELA 5.3

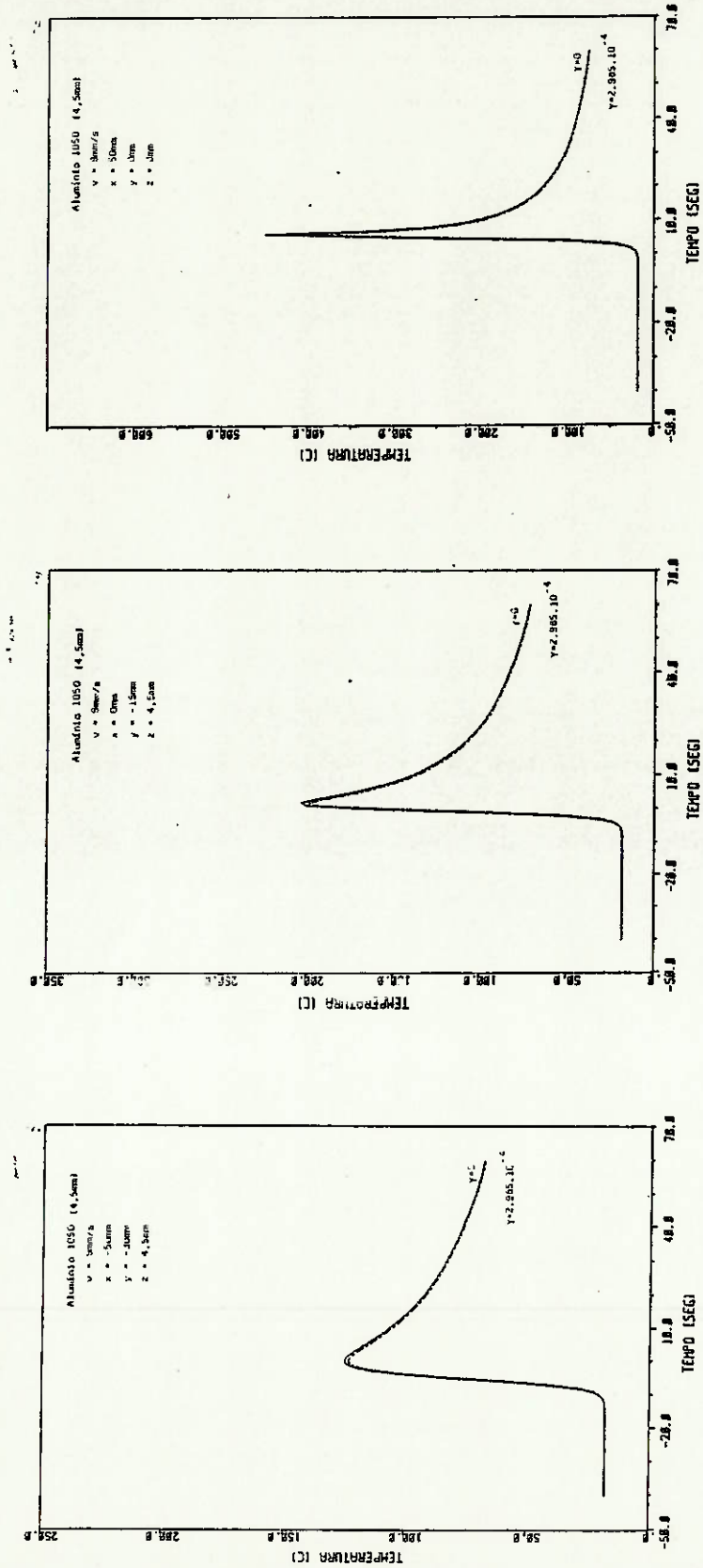


FIGURA 5.7 - DISTRIBUIÇÕES TEÓRICAS DE TEMPERATURAS GERADAS PELO PROGRAMA "DISTEMP", UTILIZANDO OS VALORES DO CASO 7 DA TABELA 5.3

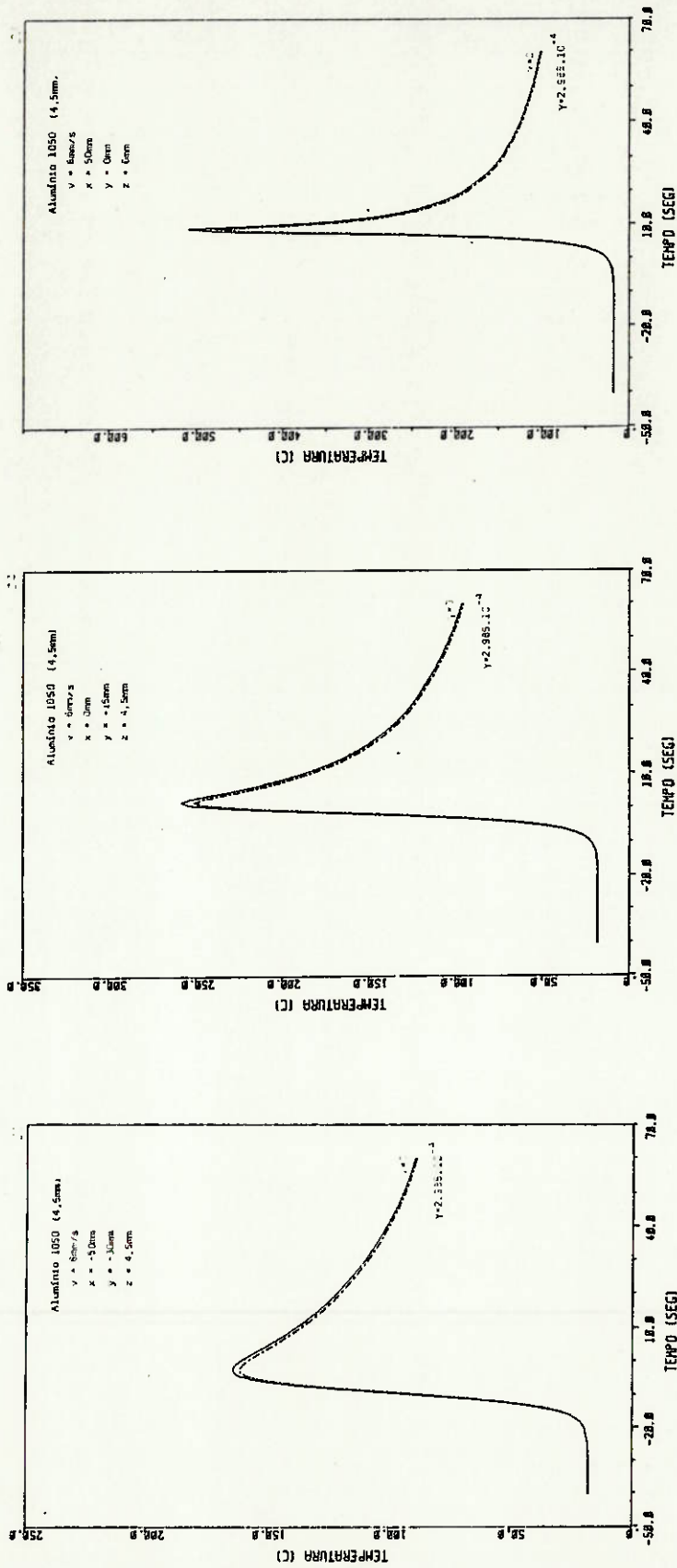


FIGURA 5.8 - DISTRIBUIÇÕES TEÓRICAS DE TEMPERATURAS GERADAS PELO PROGRAMA "DISTEMP", UTILIZANDO OS VALORES DO CASO 8 DA TABELA 5.3

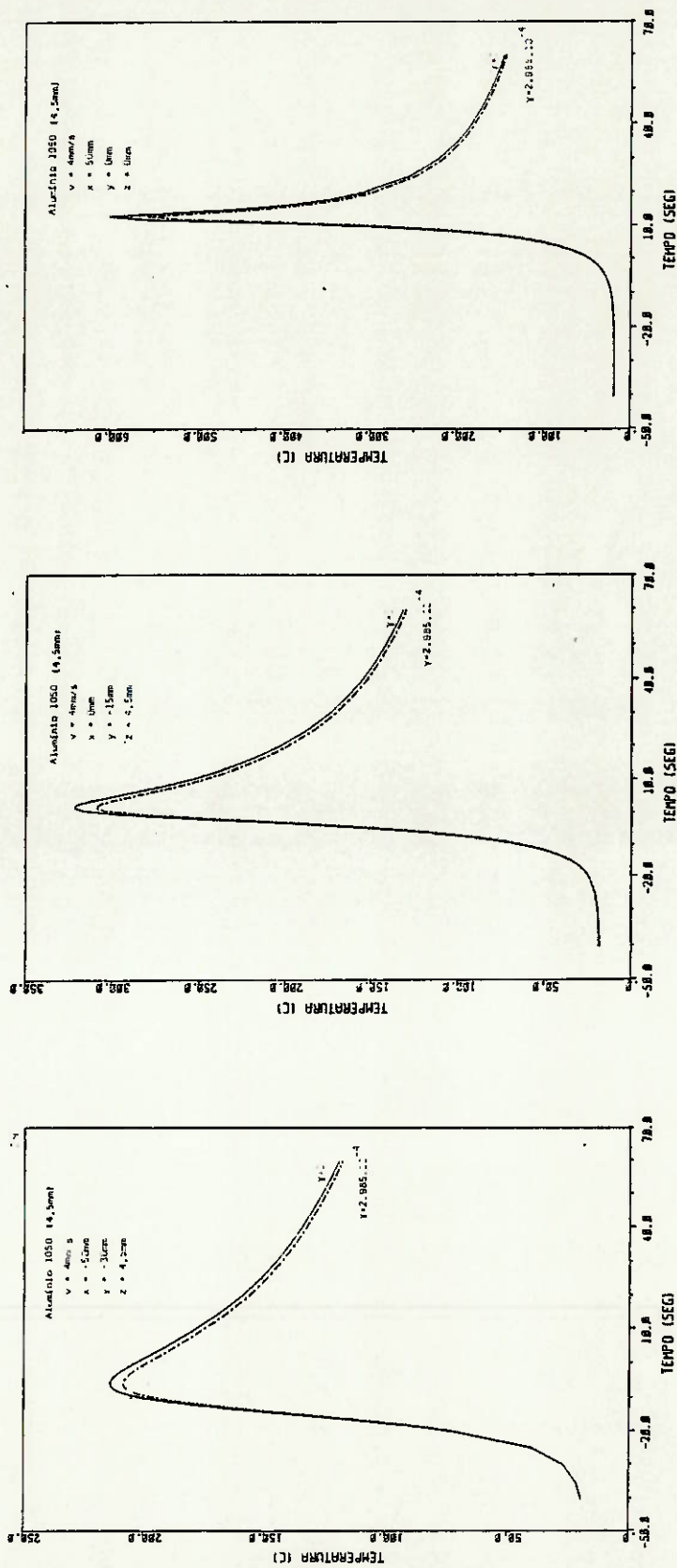


FIGURA 5.9 - DISTRIBUIÇÕES TEÓRICAS DE TEMPERATURAS GERADAS PELO PROGRAMA "DISTEMP", UTILIZANDO OS VALORES DO CASO 9 DA TABELA 5.3

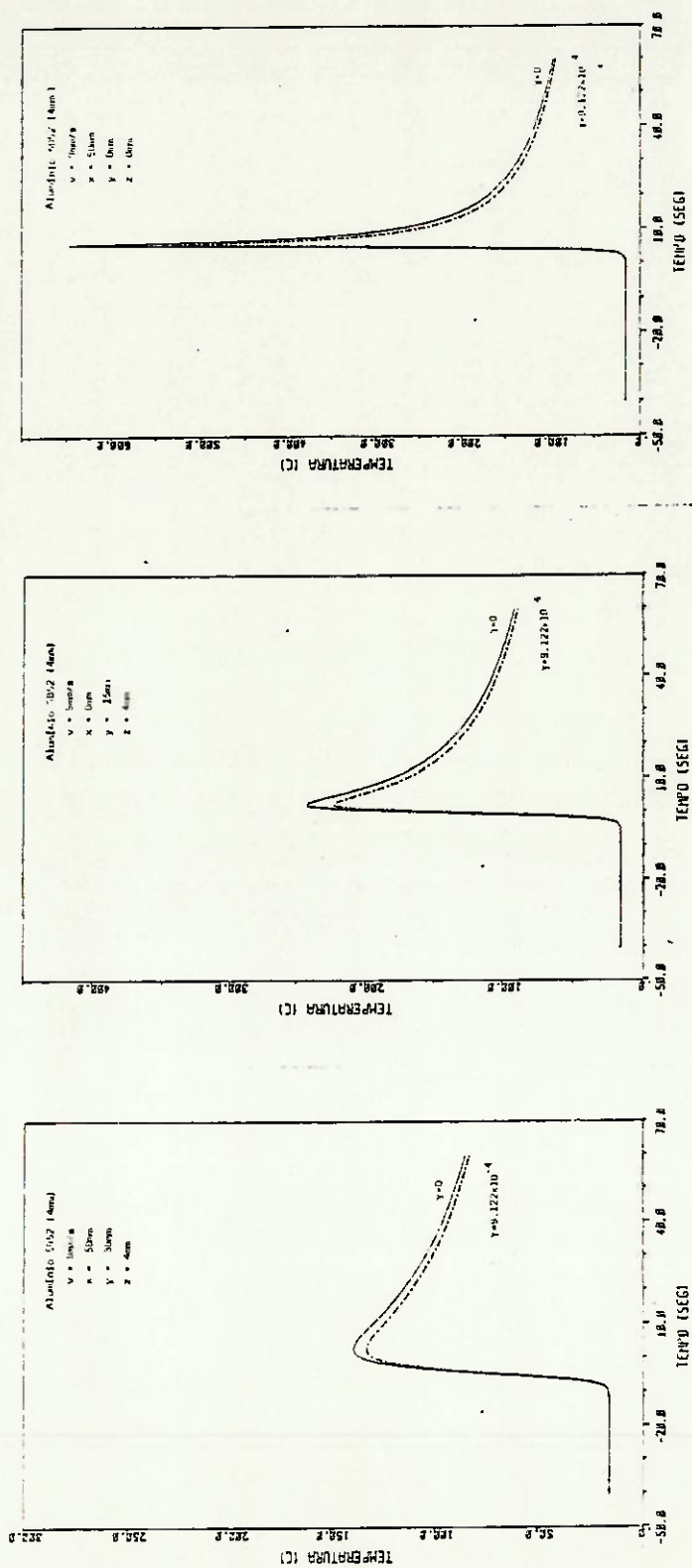


FIGURA 5.10 - DISTRIBUIÇÕES TEÓRICAS DE TEMPERATURAS GERADAS PELO PROGRAMA "DISTEMP", UTILIZANDO OS VALORES DO CASO 1 DA TABELA 5.4

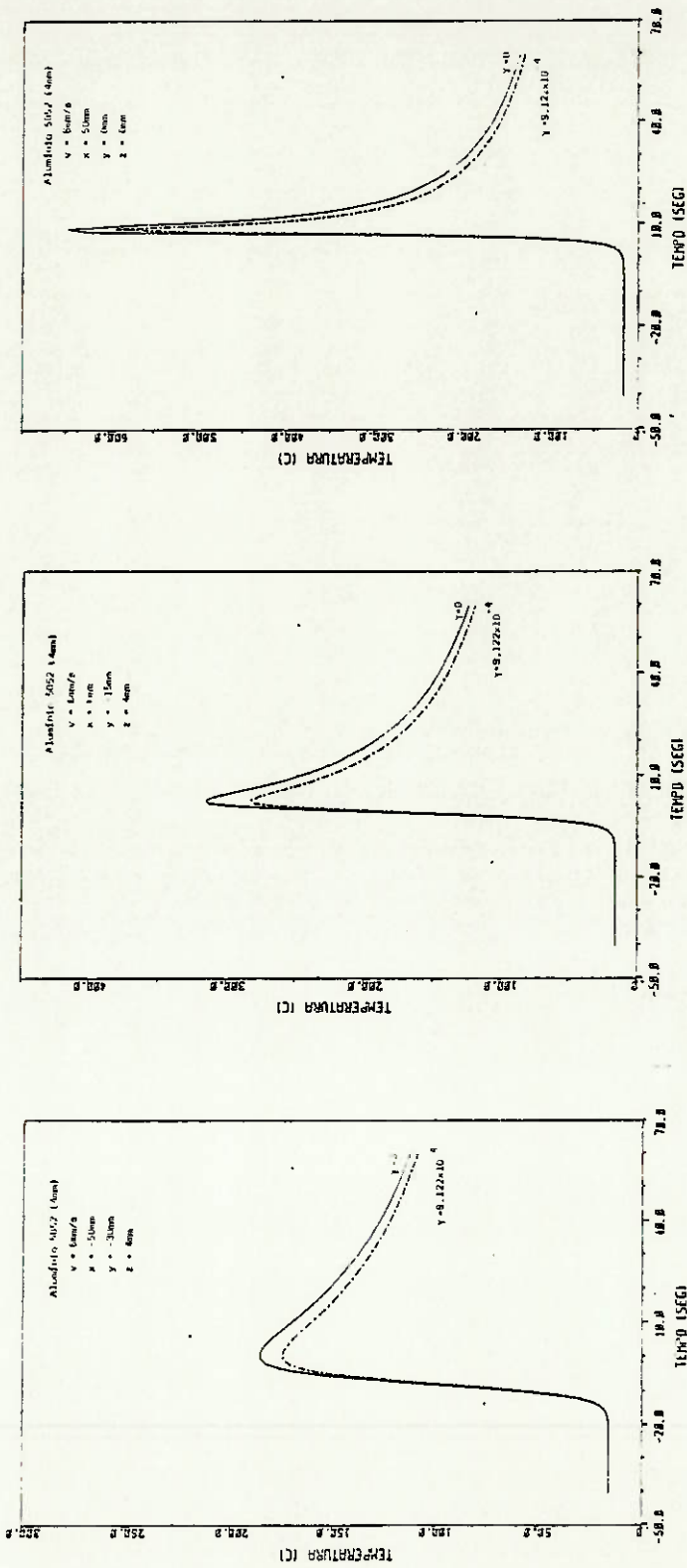


FIGURA 5.11 - DISTRIBUIÇÕES TEÓRICAS DE TEMPERATURAS GERADAS PELO PROGRAMA "DISTEMP", UTILIZANDO OS VALORES DO CASO 2 DA TABELA 5.4

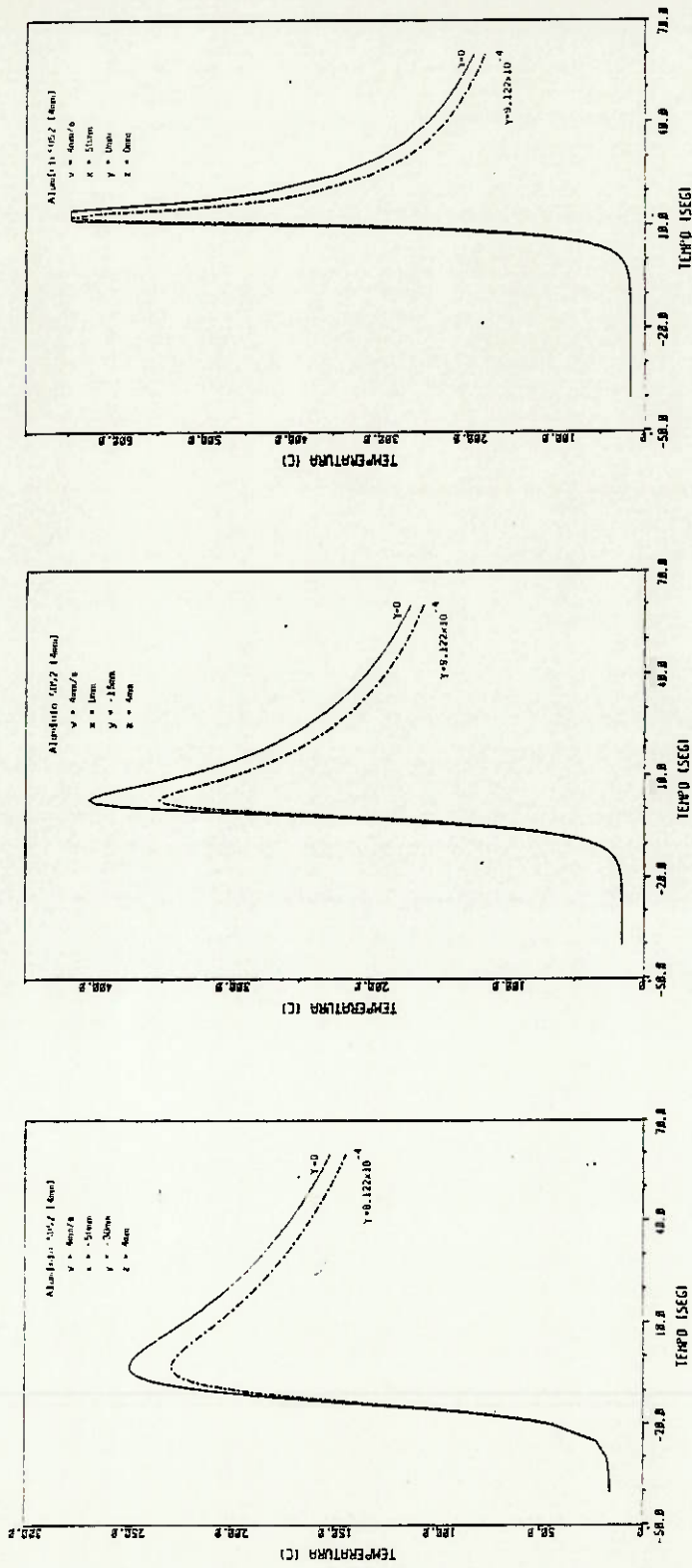


FIGURA 5.12 - DISTRIBUIÇÕES TEÓRICAS DE TEMPERATURAS GERADAS PELO PROGRAMA "DISTEMP", UTILIZANDO OS VALORES DO CASO 3 DA TABELA 5.4

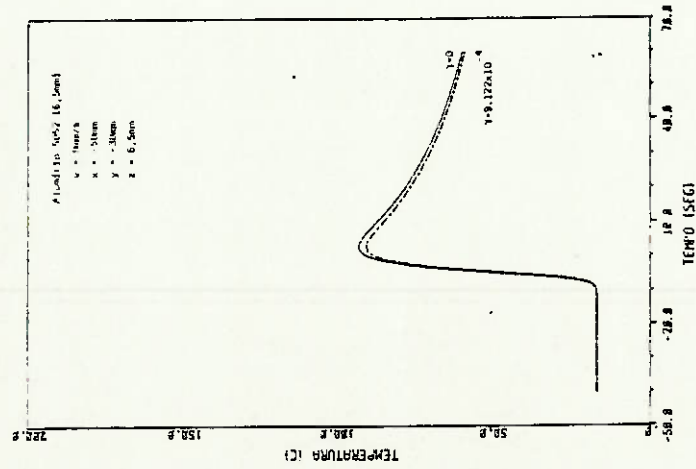
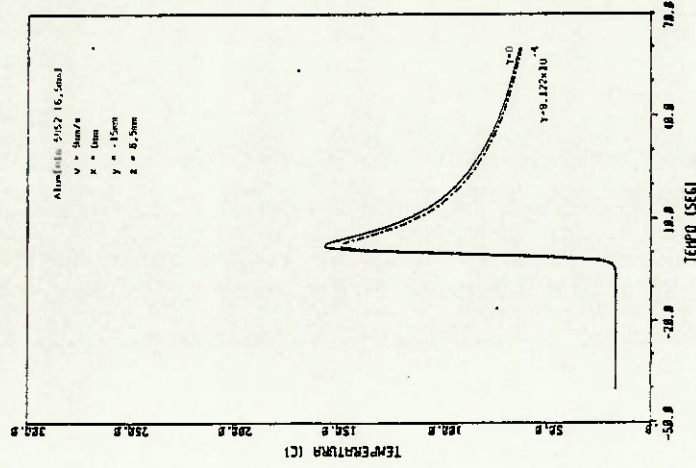
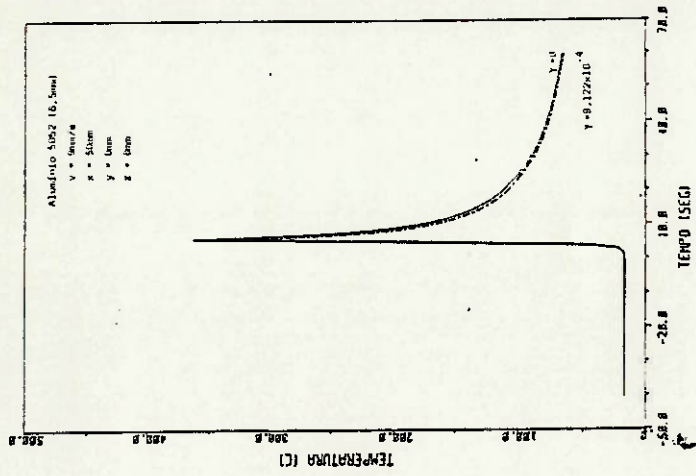


FIGURA 5.13 - DISTRIBUIÇÕES TEÓRICAS DE TEMPERATURAS GERADAS PELO PROGRAMA "DISTEMP", UTILIZANDO OS VALORES DO CASO 4 DA TABELA 5.4

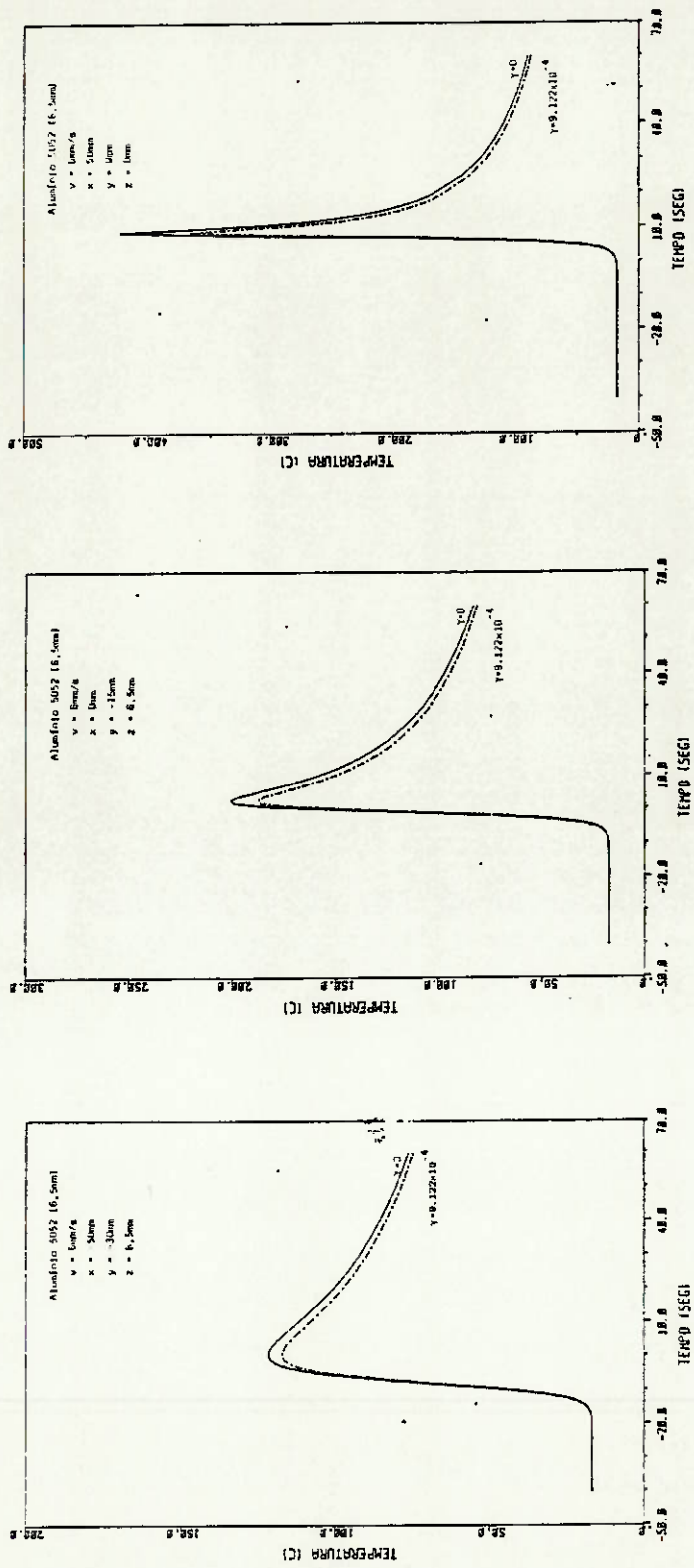


FIGURA 5.14 - DISTRIBUIÇÕES TEÓRICAS DE TEMPERATURAS GERADAS PELO PROGRAMA "DISIEMP", UTILIZANDO OS VALORES DO CASO 5 DA TABELA 5.4

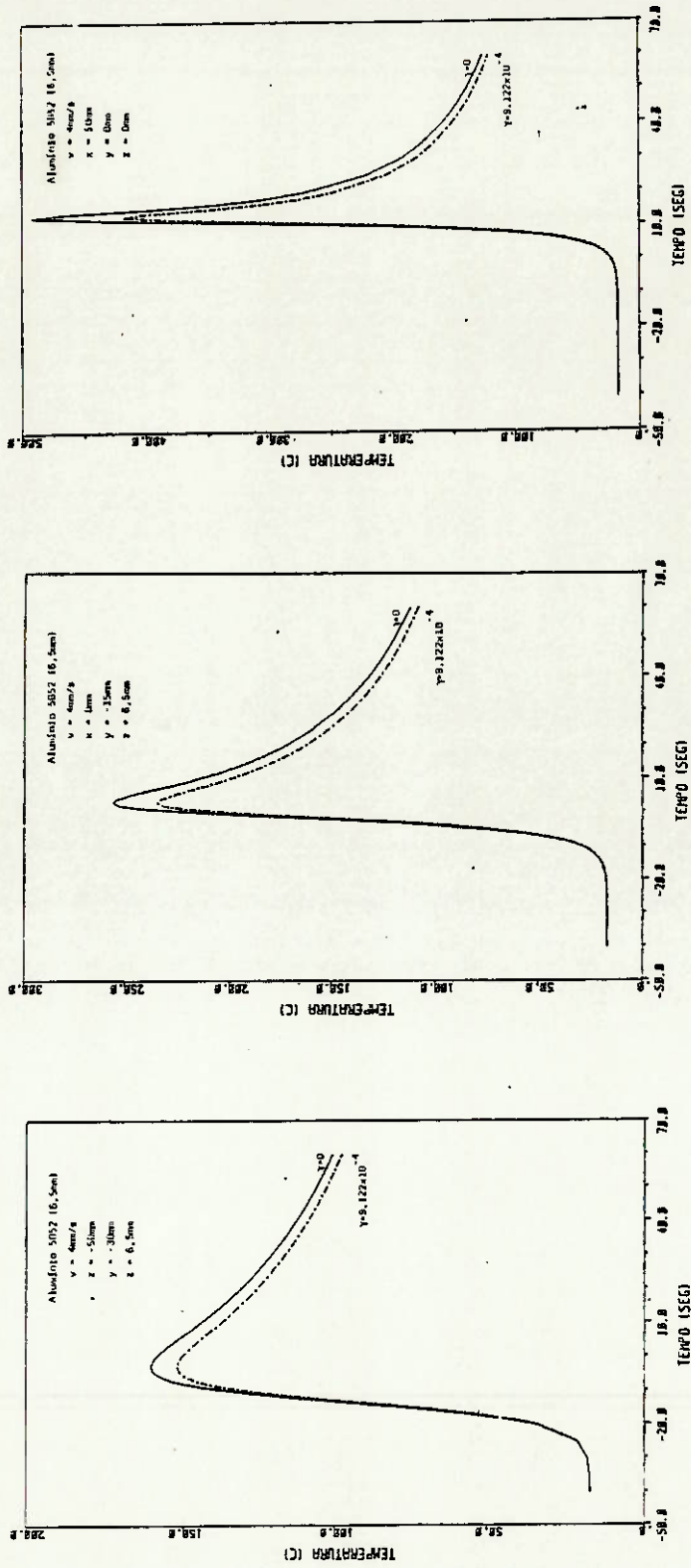


FIGURA 5.15 - DISTRIBUIÇÕES TEÓRICAS DE TEMPERATURAS GERADAS PELO PROGRAMA "DISTEMP", UTILIZANDO OS VALORES DO CASO 6 DA TABELA 5.4

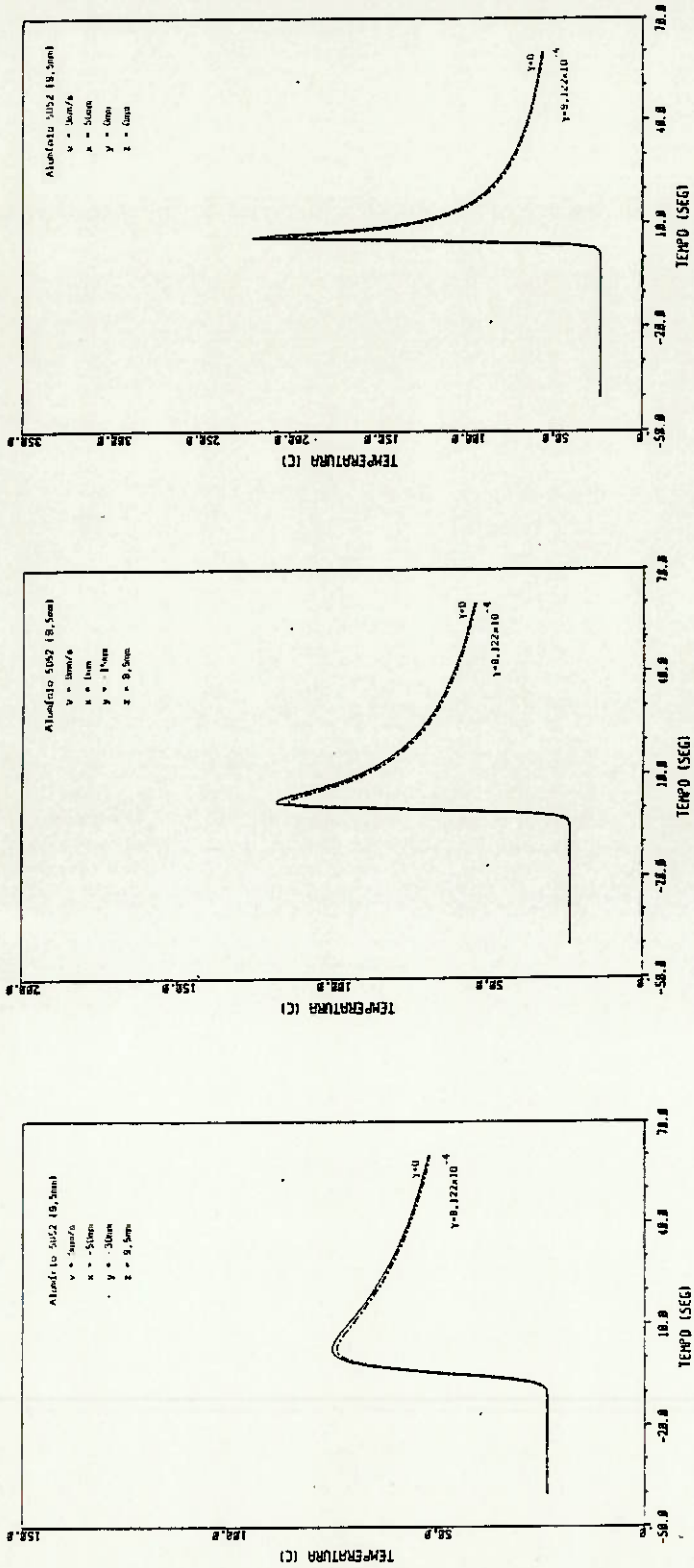


FIGURA 5.16 - DISTRIBUIÇÕES TEÓRICAS DE TEMPERATURAS GERADAS PELO PROGRAMA "DISTEMP", UTILIZANDO OS VALORES DO CASO 7 DA TABELA 5.4

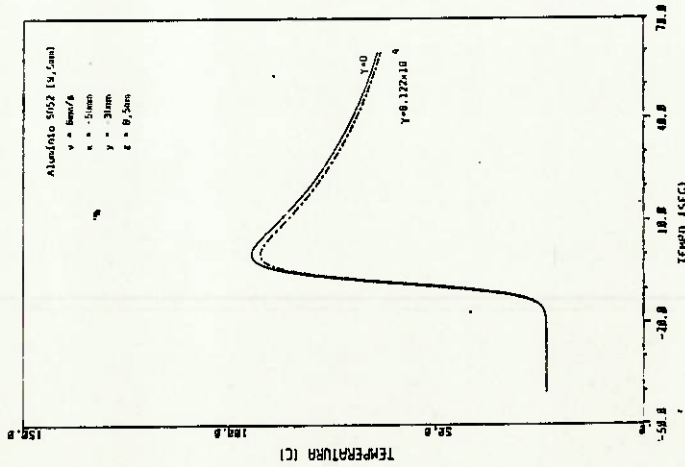
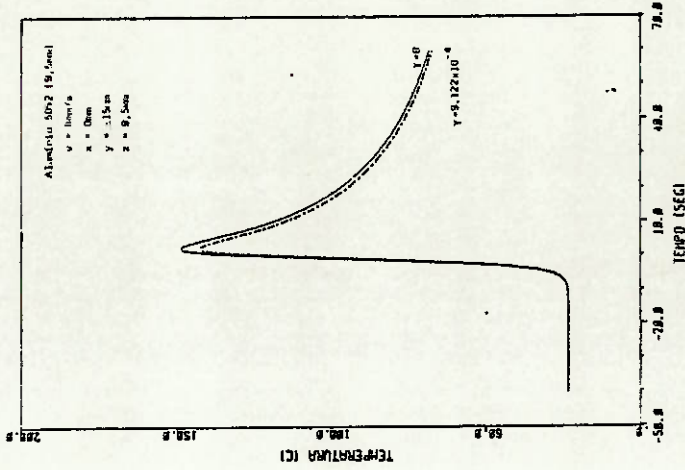
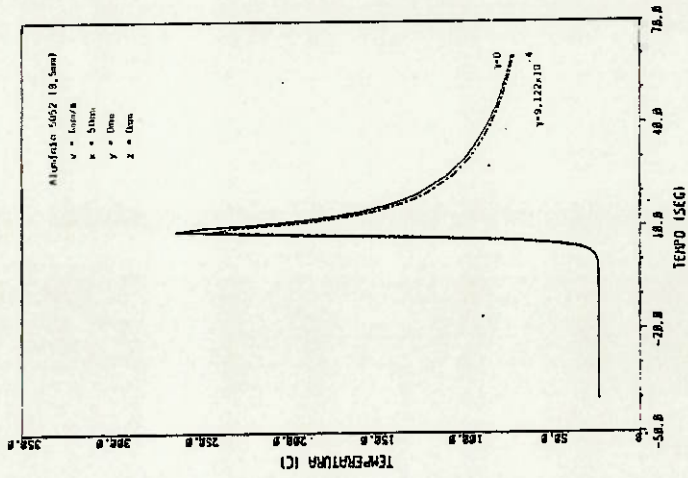


FIGURA 5.17 - DISTRIBUIÇÕES TEÓRICAS DE TEMPERATURAS GERADAS PELO PROGRAMA "DISTEMP", UTILIZANDO OS VALORES DO CASO 8 DA TABELA 5.4

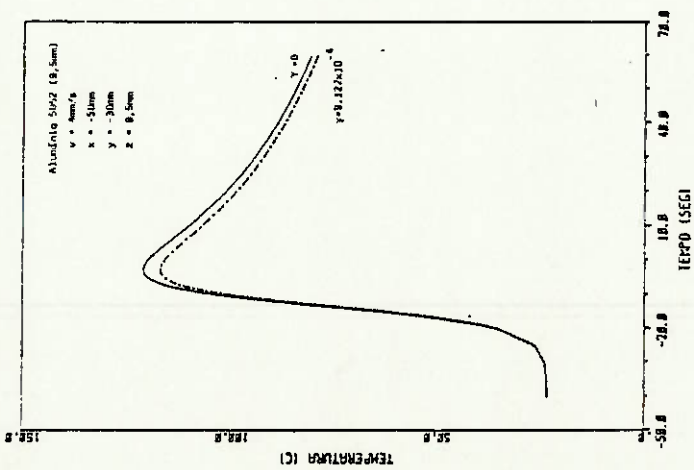
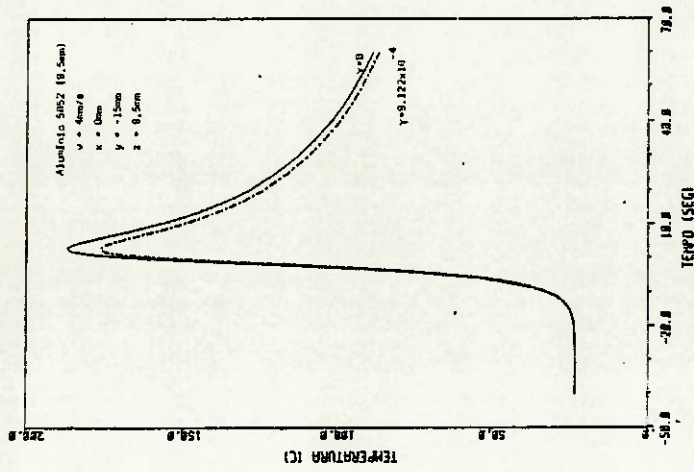
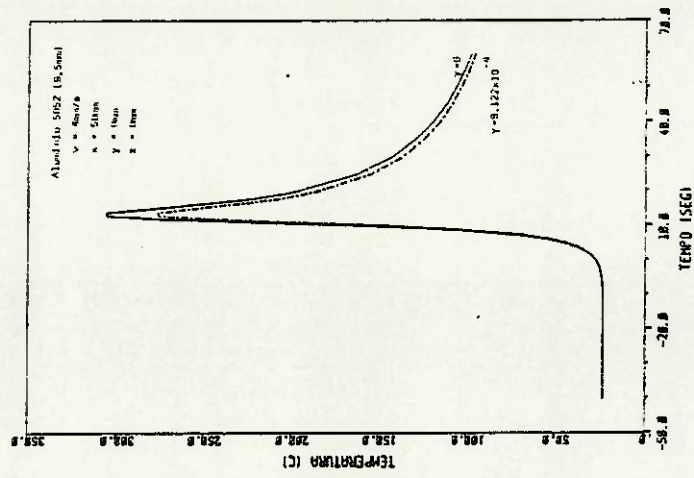


FIGURA 5.10 - DISTRIBUIÇÕES TEÓRICAS DE TEMPERATURAS GERADAS PELO PROGRAMA "DISTEMP", UTILIZANDO OS VALORES DO CASO 9 DA TABELA 5.4

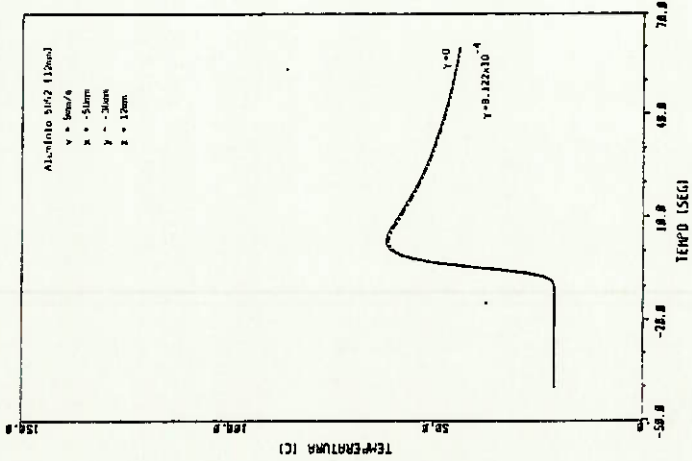
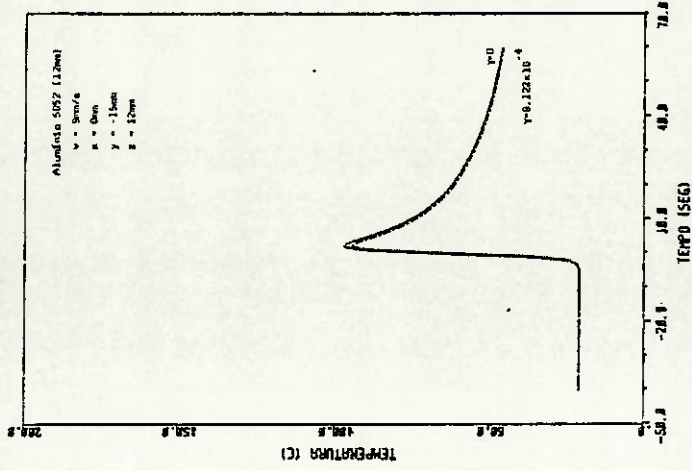
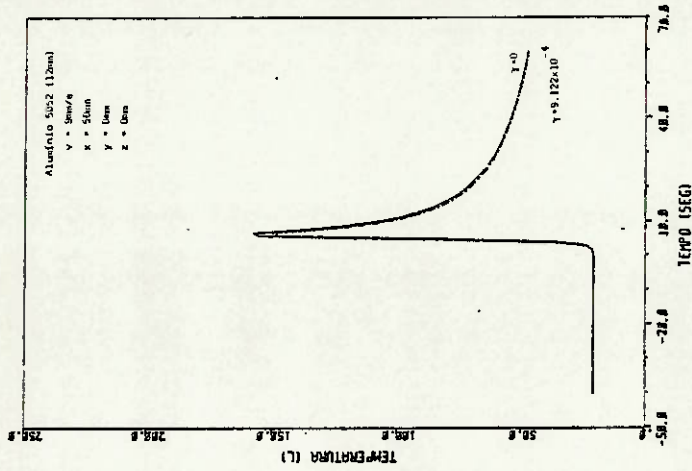


FIGURA 5.19 - DISTRIBUIÇÕES TEÓRICAS DE TEMPERATURAS GERADAS PELO PROGRAMA "DISTEMP", UTILIZANDO OS VALORES DO CASO 10 DA TABELA 5.4

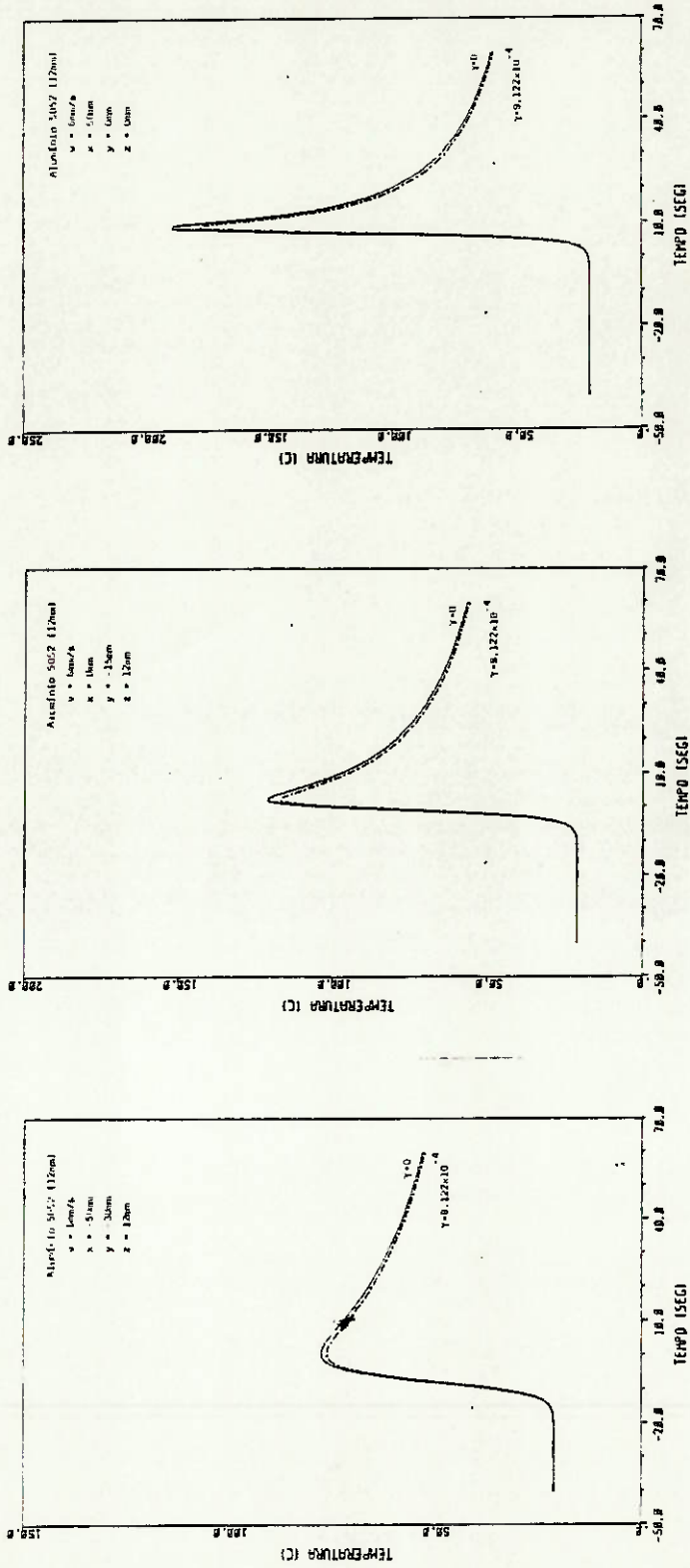


FIGURA 5.20 - DISTRIBUIÇÕES TEÓRICAS DE TEMPERATURAS GERADAS PELO PROGRAMA "DISTEMP", UTILIZANDO OS VALORES DO CASO 11 DA TABELA 5.4

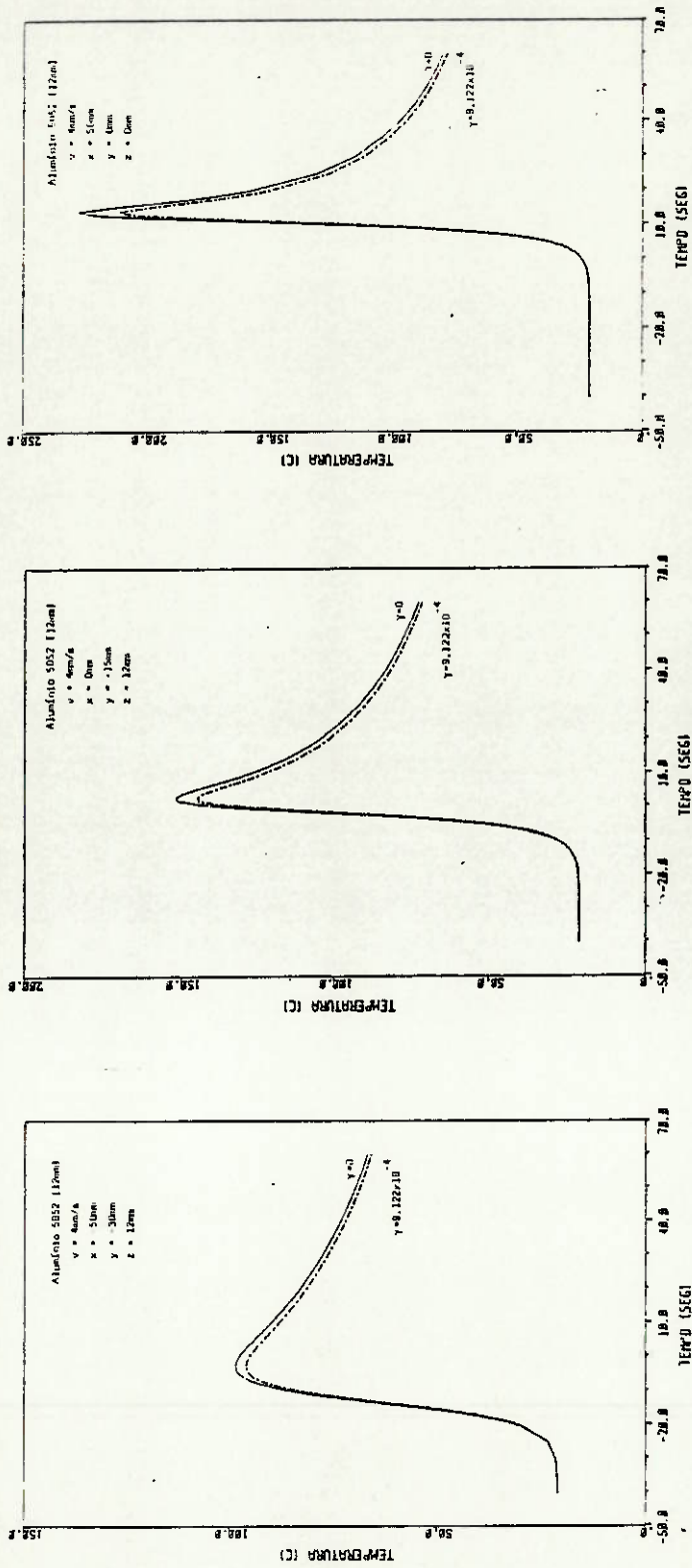


FIGURA 5.21 - DISTRIBUIÇÕES TEÓRICAS DE TEMPERATURAS GERADAS PELO PROGRAMA "DISTEMP", UTILIZANDO OS VALORES DO CASO 12 DA TABELA 5.4

CAPÍTULO 6

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os resultados experimentais que serão submetidos a análise, foram levantados com o objetivo de avaliar e comprovar a aplicabilidade do modelo teórico desenvolvido no capítulo 2.

Inicialmente, é efetuada uma descrição sucinta das condições e metodologia empregadas em cada ensaio executado e, a seguir, mostram-se os resultados em forma de gráficos a fim de facilitar ao leitor sua compreensão.

6.1 - CONDIÇÕES PARA OS ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Os ensaios experimentais foram executados, aquecendo chapas de alumínio retangulares de 500x500mm, utilizando-se as ligas 1050 e 5052, mencionadas no capítulo 3, por meio de uma fonte TIG empregando corrente contínua e polaridade direta. O controle da velocidade da fonte foi automatizado e não se utilizou eletrodo consumível (vide figura 6.1).

As dimensões das amostras foram escolhidas de maneira a reproduzir, o melhor possível, a condição de estado quase-estacionário ao longo da linha de aquecimento dessas chapas.

Num primeiro estágio, optou-se pelo processo de soldagem AC-TIG (fonte TIG empregando corrente alternada) como fonte geradora de calor, pois simulava-se a condição de fonte de calor tridimensional e obtinha-se uma alta concentração de energia. O processo foi logo rejeitado devido à incompatibilidade do processo com alguns dos instrumentos de medição. O registrador gráfico de temperaturas não possuía blindagem contra as altas frequências produzidas pelo ignitor, equipamen

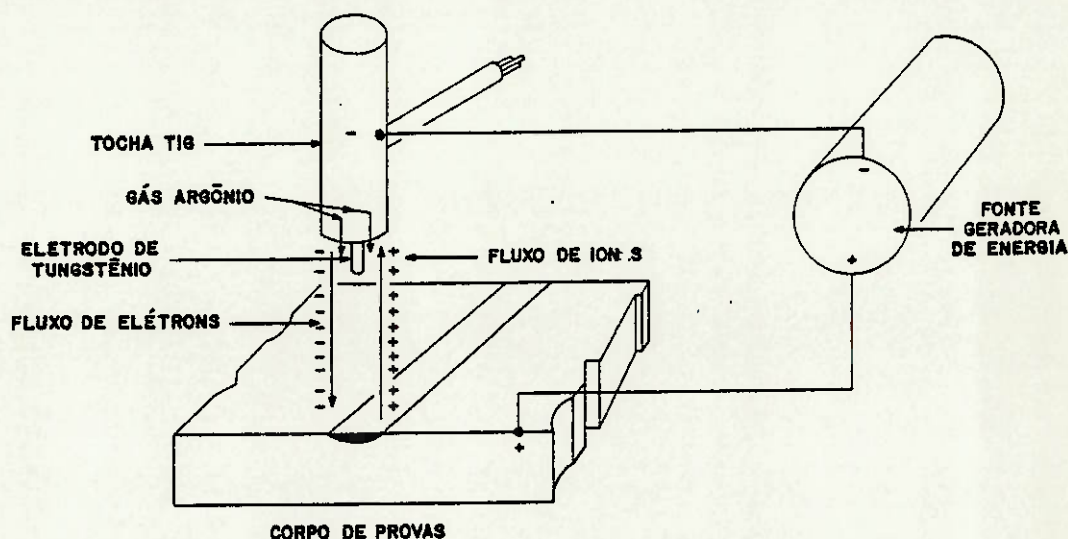


FIGURA 6.1 - PROCESSO DE SOLDAGEM DCSP-TIG

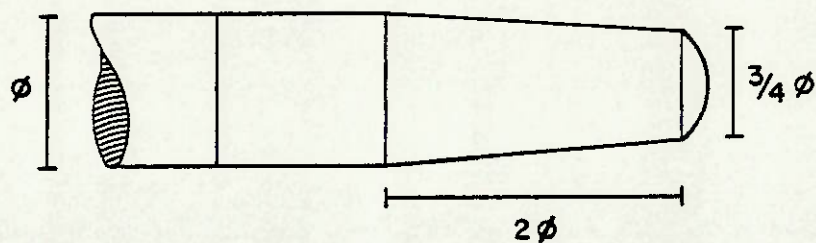
to imprescindível no processo AC-TIG, para a abertura e estabilidade do arco elétrico, durante a soldagem.

Assim, finalmente, selecionou-se o processo DCSP-TIG, pelas seguintes razões:

1. Compatibilidade existente entre os equipamentos e instrumentos utilizados nos levantamentos experimentais;
2. A condição de fonte de calor tridimensional é bem simulada através deste processo.
3. O processo proporciona uma disponibilidade de energia maior que no processo DCPR-TIG (fonte TIG empregando corrente contínua e polaridade inversa).

Consultando-se as referências bibliográficas [25], [33], [36] e [42], que fazem menção a ensaios experimentais empregando o processo DCSP-TIG, obtiveram-se as informações necessárias, referentes à sua utilização. O tipo de gás utilizado foi o argônio e o eletrodo de tungstênio puro. A maneira de afilar as pontas dos eletrodos está mostradas na tabela 6.1 e a posição da tocha na operação de aquecimento do corpo de provas e distâncias entre a peça e o eletrodo na figura 6.2. As faixas

TABELA 6.1 - PREPARAÇÃO DAS PONTAS DOS ELETRODOS PARA OPERAÇÃO DCSP-TIG 36



φ		2φ		3/4 φ	
(in)	(mm)	(in)	(mm)	(in)	(mm)
1/16	1,6	1/8	3,2	3/64	1,2
3/32	2,4	3/16	4,8	9/128	1,8
1/8	3,2	1/4	6,4	3/32	2,4
5/32	4,0	5/16	7,9	15/128	3,0
3/16	4,8	3/8	9,5	9/64	3,6
1/4	6,4	1/2	12,7	3/16	4,8
5/16	7,9	5/8	15,9	15/64	6,0
3/8	9,5	3/4	19,1	9/31	7,1

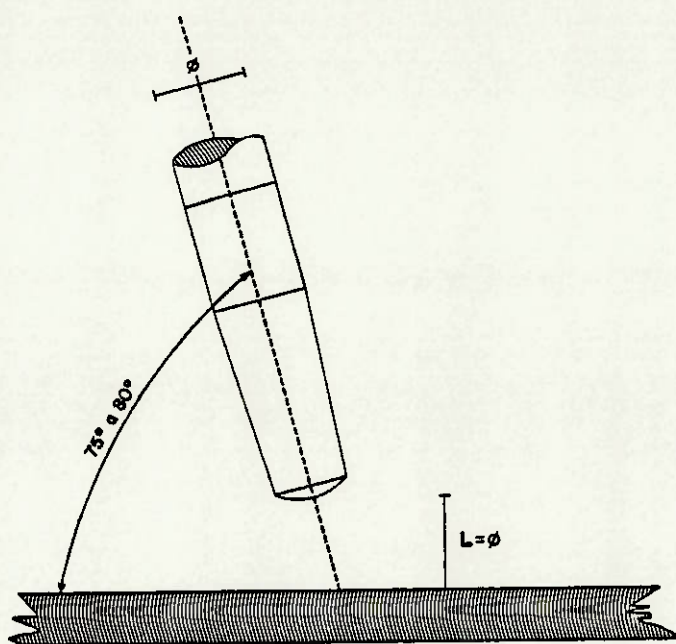


FIGURA 6.2 - POSIÇÃO DO ELETRODO E DISTÂNCIA À CHAPA | 36 |

de variação das vazões de gás e diâmetro dos eletrodos em função da corrente utilizada no processo é por sua vez mostrada na tabela 6.2.

TABELA 6.2 - FAIXAS RECOMENDADAS PARA O PROCESSO DE SOLDAGEM DCSP-TIG

ESPESSURA DO MATERIAL (mm)	CORRENTE DO ARCO (A)	VOLTAGEM DO ARCO (V)	DIÂMETRO DO ELETRODO (mm)	VAZÃO DO GÁS (ℓ/min)
2,3	90-185	10	1,6	9,4-23,6
3,2	120-220	10	3,2	9,4-23,6
6,4	230-240	12,5	3,2	11,8-28,4
12,7	300-450	12,5	3,2	11,8-28,4
19,1	260-300	13,0	4,0	11,8-28,4
25,4	450-470	9,5	4,8	18,9-28,4

Foi efetuada uma seleção prévia da série de experiências realizadas neste estudo, pois os recursos materiais disponíveis para sua efetivação eram limitados.

Cada série constou de três ensaios a diferentes velocidades de avanço da fonte de calor, sendo que as variáveis operacionais do processo DCSP-TIG estão indicadas nas tabelas 6.3 e 6.4 e foram obtidas com o auxílio de um amperímetro e um voltímetro de alta inércia, acoplados ao equipamento TIG e também um cronômetro.

6.2 - METODOLOGIA DOS ENSAIOS E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

As comprovações experimentais do modelo teórico, apresentado nos capítulos anteriores, consistirão basicamente em aquecer um corpo de prova ao longo de uma linha previamente marcada na superfície, com 400mm de comprimento (vide figura 6.3), e registrar as temperaturas que ocorrem em diferentes pontos desse corpo, à medida que a fonte se desloca sobre a superfície, por meio de três termo-pares conectados a um registrador gráfico de temperaturas.

Dois termo-pares foram instalados na superfície superior do corpo e um outro na superfície inferior, conforme o esquema mostrado na figura 6.4.

Os termo-pares foram fixados por fusão em suas posições através de um processo AC-TIG. As outras extremidades destes termo-pares foram ligadas aos terminais do registrador gráfico de temperaturas. Um esquema da instalação pode ser observado na figura 6.5.

Para o controle da velocidade da fonte de calor, que se constitui numa das variáveis significativas do processo, foi empregado o carro de um sistema de corte automático, que permitia uma regulagem das velocidades entre zero e dez mm/seg., cobrindo assim, a faixa de velocidades especificada para as experiências.

TABELA 6.3 - CONDIÇÕES OPERACIONAIS PARA OS ENSAIOS COM CORPO DE PROVAS CONSTITUÍDOS PELA LIGA 1050 E UTILIZANDO O PROCESSO DE SOLDAGEM DCSP-TIG

I T E M						
ESPESSURA DO CORPO DE PROVAS (mm)	VELOCIDADE DE AVANÇO DA FONTE (mm.5 ⁻¹)	VOLTAGEM DO ARCO ELÉTRICO (V)	CORRENTE DO ARCO ELÉTRICO (A)	VAZÃO DO GÁS (ℓ/min)	COMPRIMENTO DO CORDÃO DE SOLDA (mm)	
4,5	9,0-6,0-4,0	14	140	15	350	
6,5	9,0-6,0-4,0	14	140	15	400	
10,5	9,0-6,0-4,0	14	140	15	400	

TABELA 6.4 - CONDIÇÕES OPERACIONAIS PARA OS ENSAIOS COM CORPO DE PROVAS CONSTITUÍDOS PELA LIGA 5052 E UTILIZANDO O PROCESSO DE SOLDAGEM DCSP-TIG

I T E M S						
ESPESSURA DO CORPO DE PROVAS (mm)	VELOCIDADE DE AVANÇO DA FONTE (mm.seg ⁻¹)	VOLTAGEM DO ARCO ELÉTRICO (V)	CORRENTE DO ARCO ELÉTRICO (A)	VAZÃO DO GÁS (ℓ/min)	COMPRIMENTO DO CORDÃO DE SOLDA (mm)	
4,0	4,0-6,0-9,0	14	140	15	400	
6,5	4,0-6,0-9,0	14	140	15	400	
9,5	4,0-6,0-9,0	14	140	15	400	
12,0	4,0-6,0-9,0	14	140	15	400	

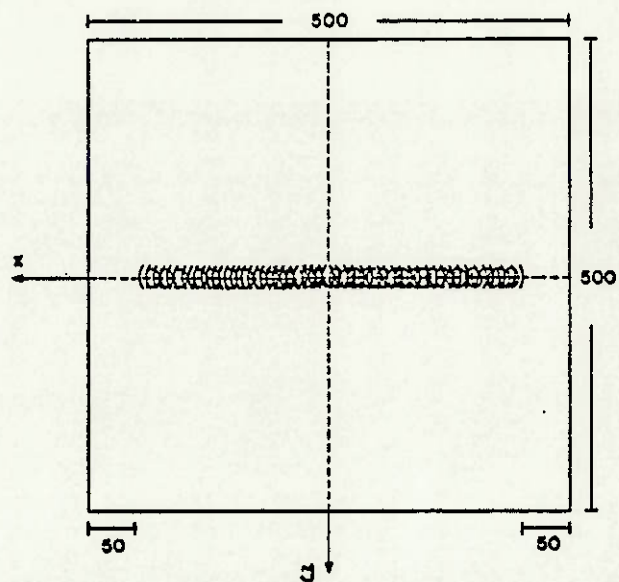


FIGURA 6.3 - CORPO DE PROVA PARA A REALIZAÇÃO DAS EXPERIÊNCIAS

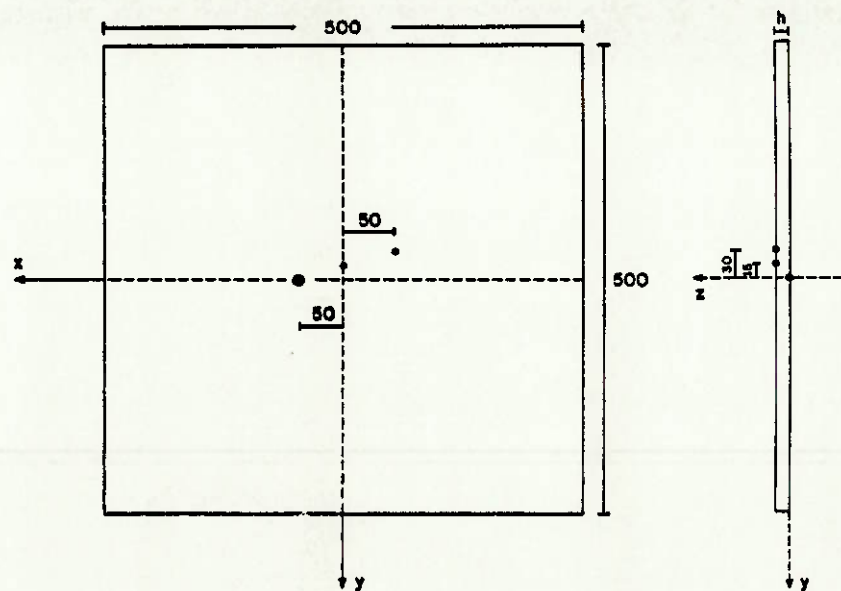


FIGURA 6.4 - POSIÇÃO DOS TERMO-PARES

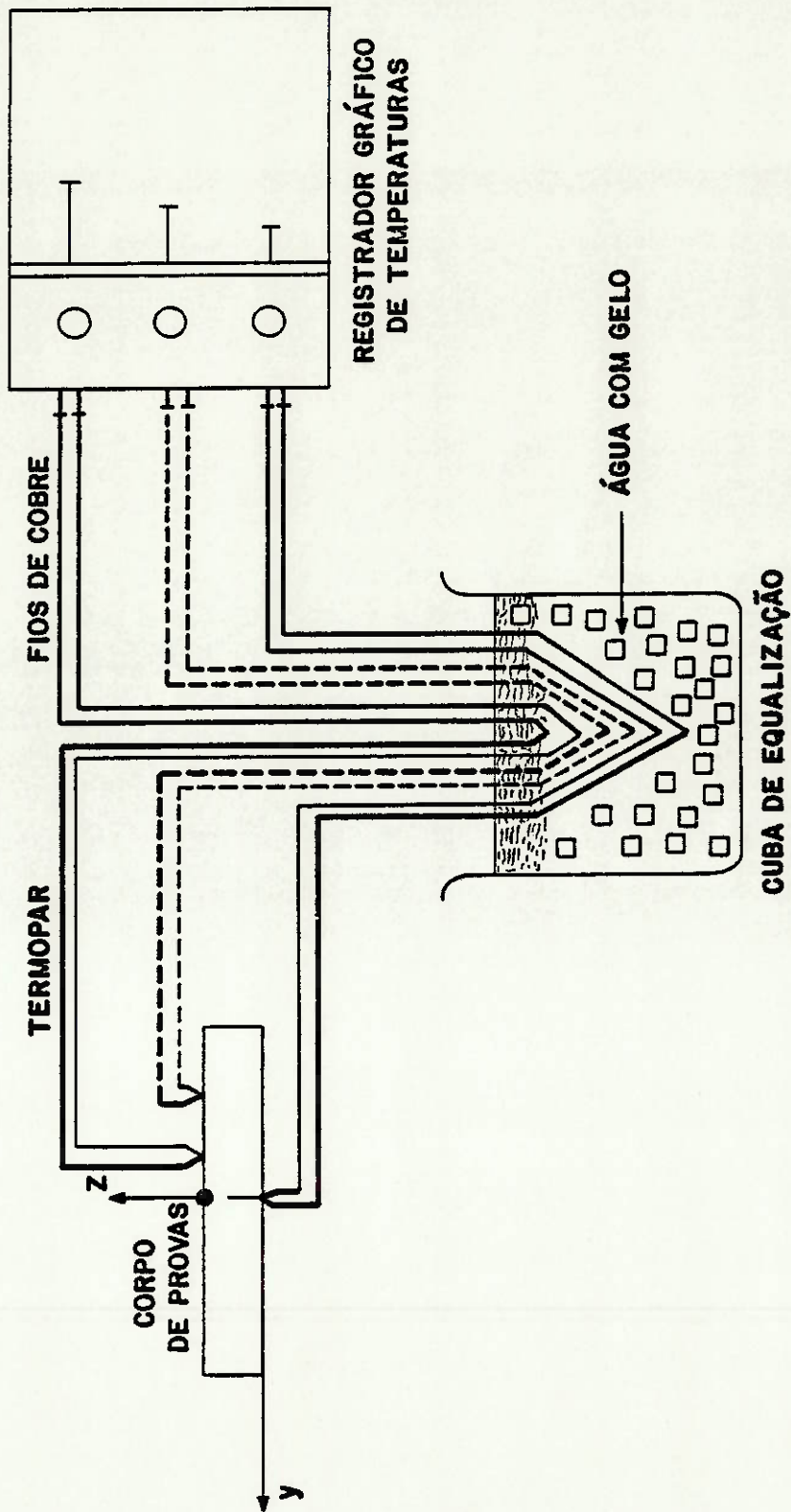


FIGURA 6.5 - ARRANJO DO EQUIPAMENTO PARA MEDIR AS DISTRIBUIÇÕES DE TEMPERATURAS | 24 |

As especificações dos instrumentos e equipamentos usados nos levantamentos experimentais acham-se listados na tabela 6.5.

TABELA 6.5 - ESPECIFICAÇÕES DOS EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS

ITEM	ESPECIFICAÇÃO GERAL	FABRICANTE	
1	Tocha para o processo de soldagem DCSP-TIG	Tocha TIG Heliarc HW-26v esfriada a ar. Faixa de trabalho até 200 Ampères	S.A.White Martins
2	Máquina de soldar	Retificador Soldarc modelo RS 300 NM. Faixa de trabalho 40 a 300 Ampères	S.A.White Martins
3	Máquina de corte portátil	Modelo MC-160	S.A.White Martins
4	Termo-pares	Tipo K Chromel Alumel. Faixa máxima de trabalho 1200°C	

6.3 - APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Um total de 63 ensaios experimentais foram efetuados, abrangendo sete espessuras de chapas e três valores de velocidade de avanço da fonte. As figuras 6.1 a 6.21 mostram esses resultados experimentais em forma de gráficos para facilitar a sua visualização e futura comparação.

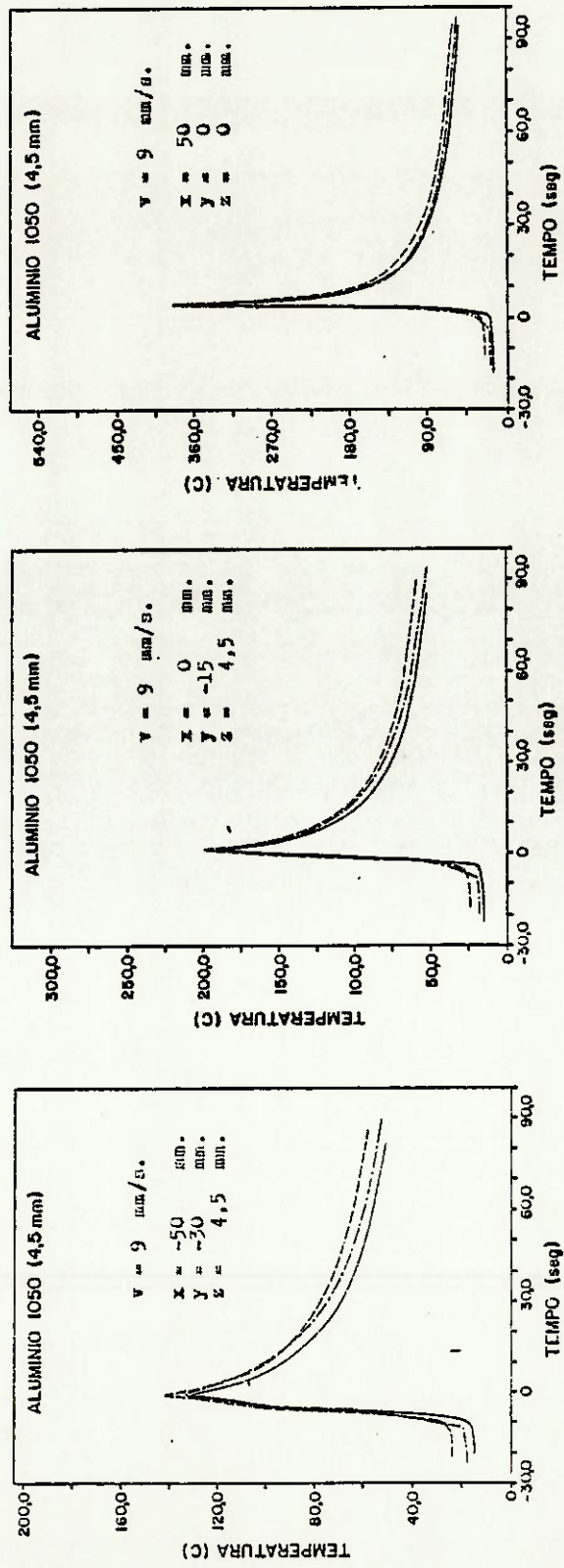


FIGURA 6.6 - PERFIS DE TEMPERATURA MEDIDOS EXPERIMENTALMENTE USANDO AS CONDIÇÕES OPERACIONAIS DA TABELA 6.3, PARA O MODELO DE CHAPA DE 4,5mm E VELOCIDADE 9,0mm/s

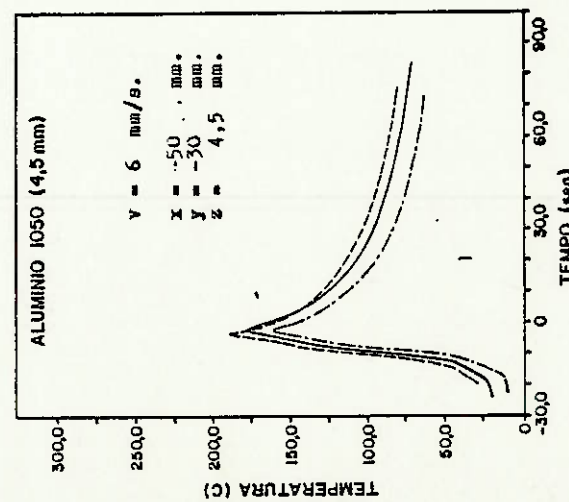
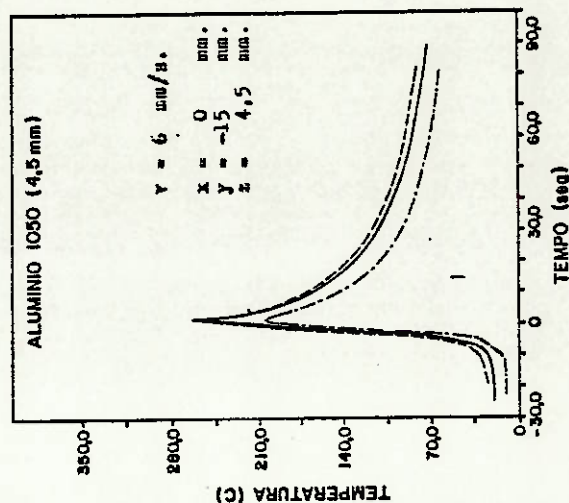
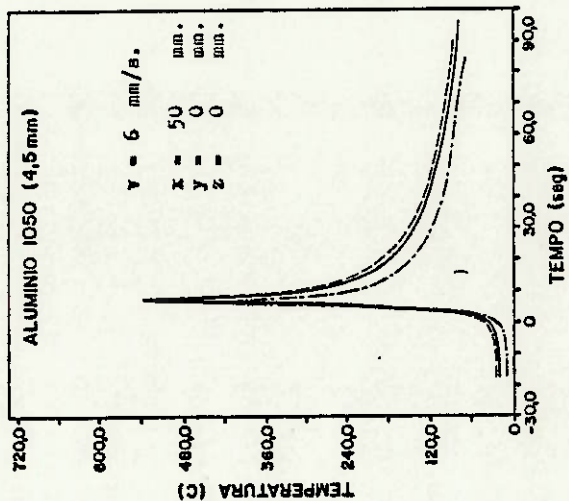


FIGURA 6.7 - PERFIS DE TEMPERATURA MEDIDOS EXPERIMENTALMENTE USANDO AS CONDIÇÕES OPERACIONAIS DA TABELA 6.3, PARA O MODELO DE CHAPA DE 4,5mm E VELOCIDADE 6,0mm/s

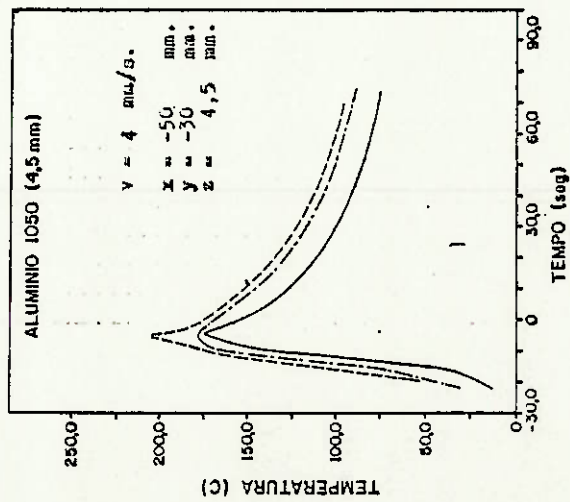
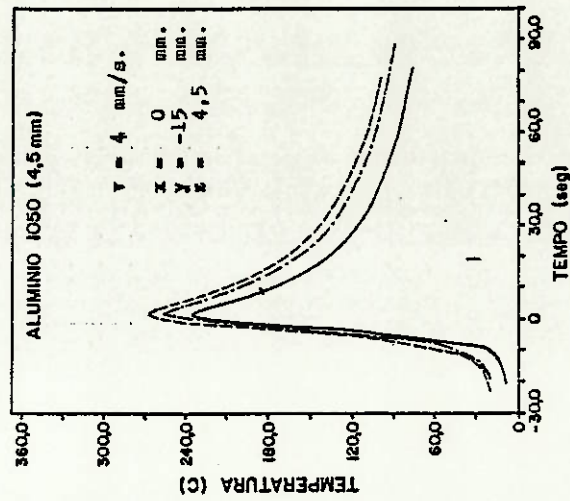
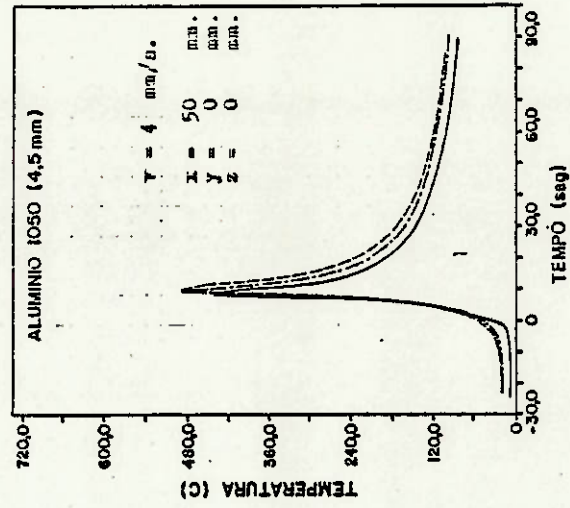


FIGURA 6.8 - PERFIS DE TEMPERATURA MEDIDOS EXPERIMENTALMENTE USANDO AS CONDIÇÕES OPERACIONAIS DA TABELA 6.3, PARA O MODELO DE CHAPA DE 4,5mm E VELOCIDADE 4,0mm/s

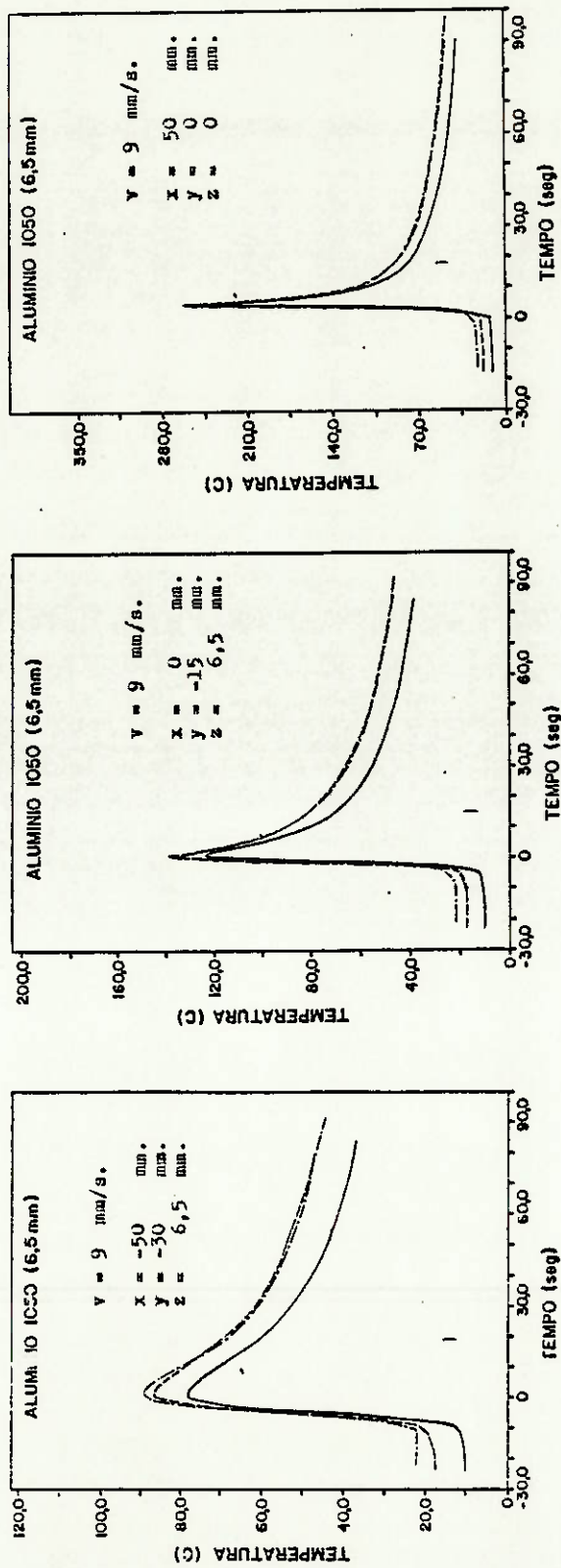


FIGURA 6.9 - PERFIS DE TEMPERATURA MEDIDOS EXPERIMENTALMENTE USANDO AS CONDIÇÕES OPERACIONAIS DA TABELA 6.3, PARA O MODELO DE CHAPA DE 6,5mm E VELOCIDADE 9,0mm/s

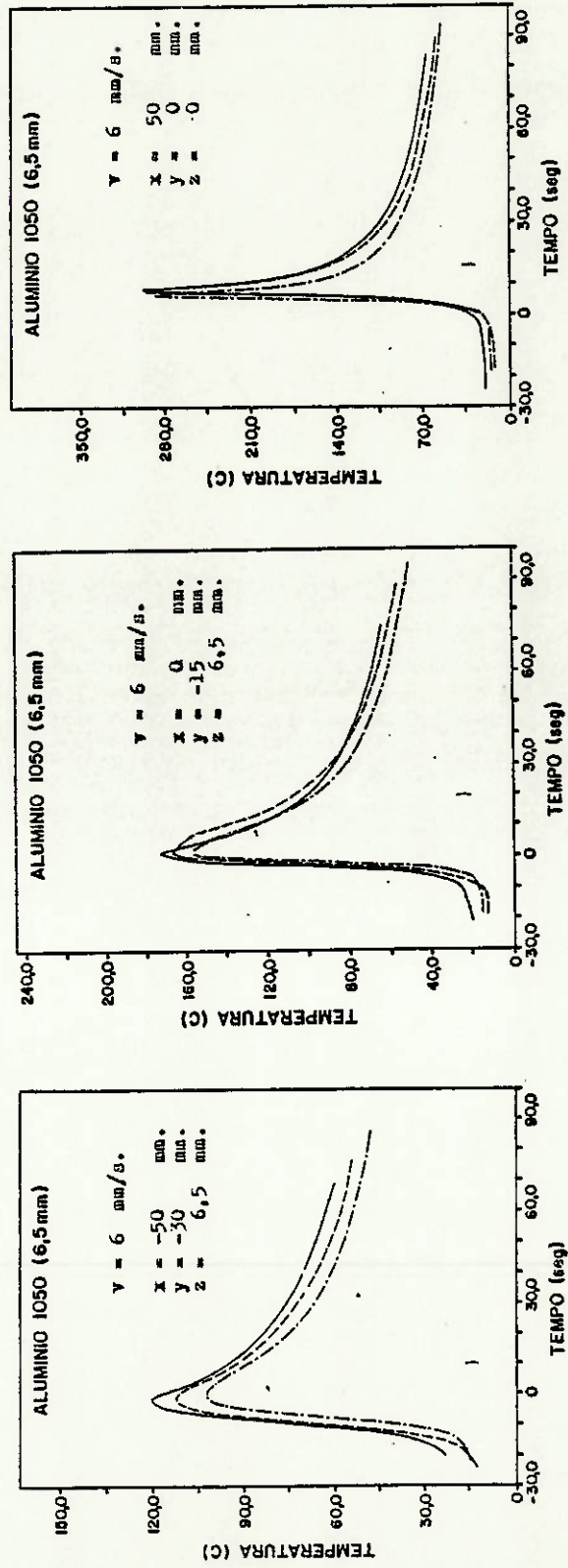


FIGURA 6.10- PERFIS DE TEMPERATURA MEDIDOS EXPERIMENTALMENTE USANDO AS CONDIÇÕES OPERACIONAIS DA TABELA 6.3, PARA O MODELO DE CHAPA DE 6,5mm E VELOCIDADE 6,0mm/s

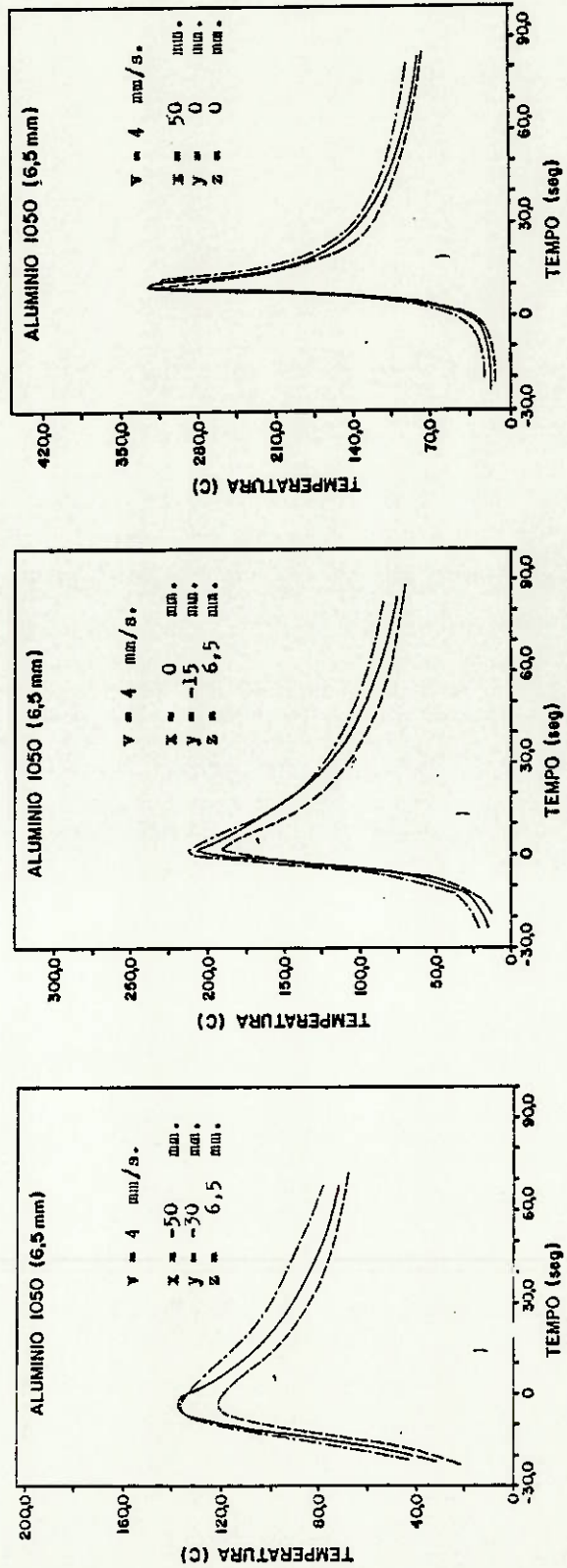


FIGURA 6.11- PERFIS DE TEMPERATURA MEDIDOS EXPERIMENTALMENTE USANDO AS CONDIÇÕES OPERACIONAIS DA TABELA 6.3, PARA O MODELO DE CHAPA DE 6,5mm E VELOCIDADE 4,0mm/s

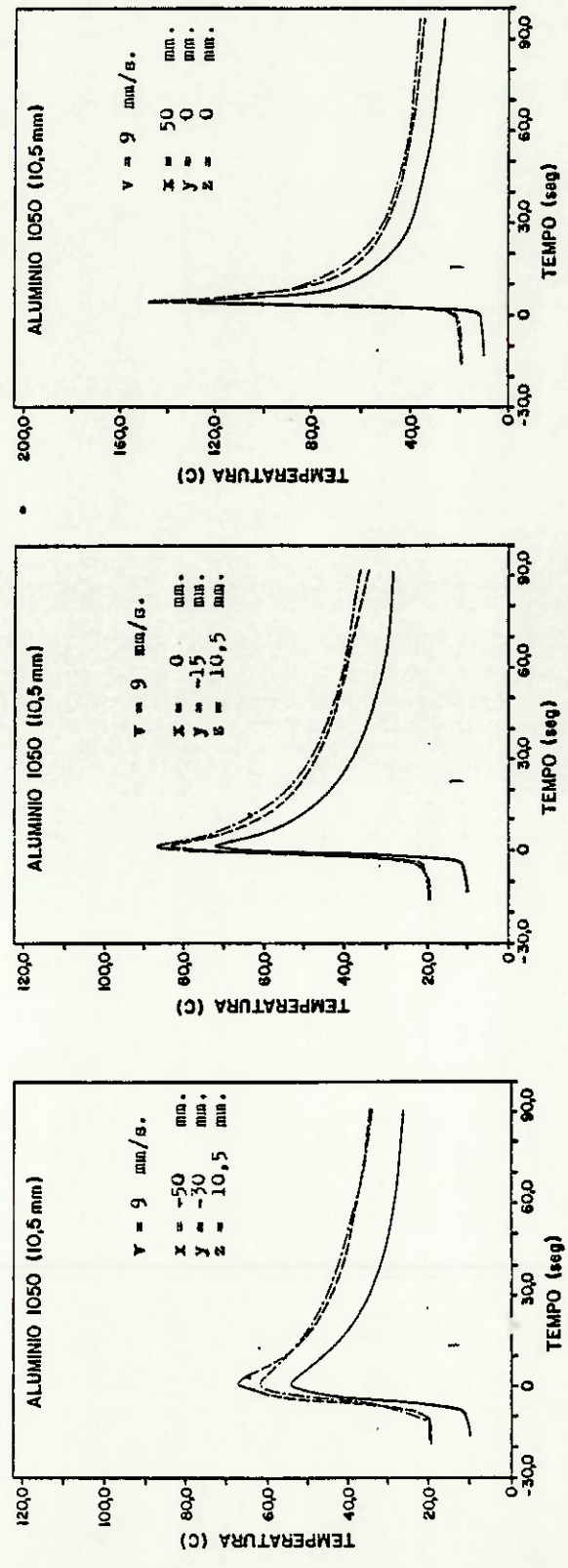


FIGURA 6.12- PERFIS DE TEMPERATURA MEDIDOS EXPERIMENTALMENTE USANDO AS CONDIÇÕES OPERACIONAIS DA TABELA 6.3, PARA O MODELO DE CHAPA DE 10,5mm E VELOCIDADE 9,0mm/s

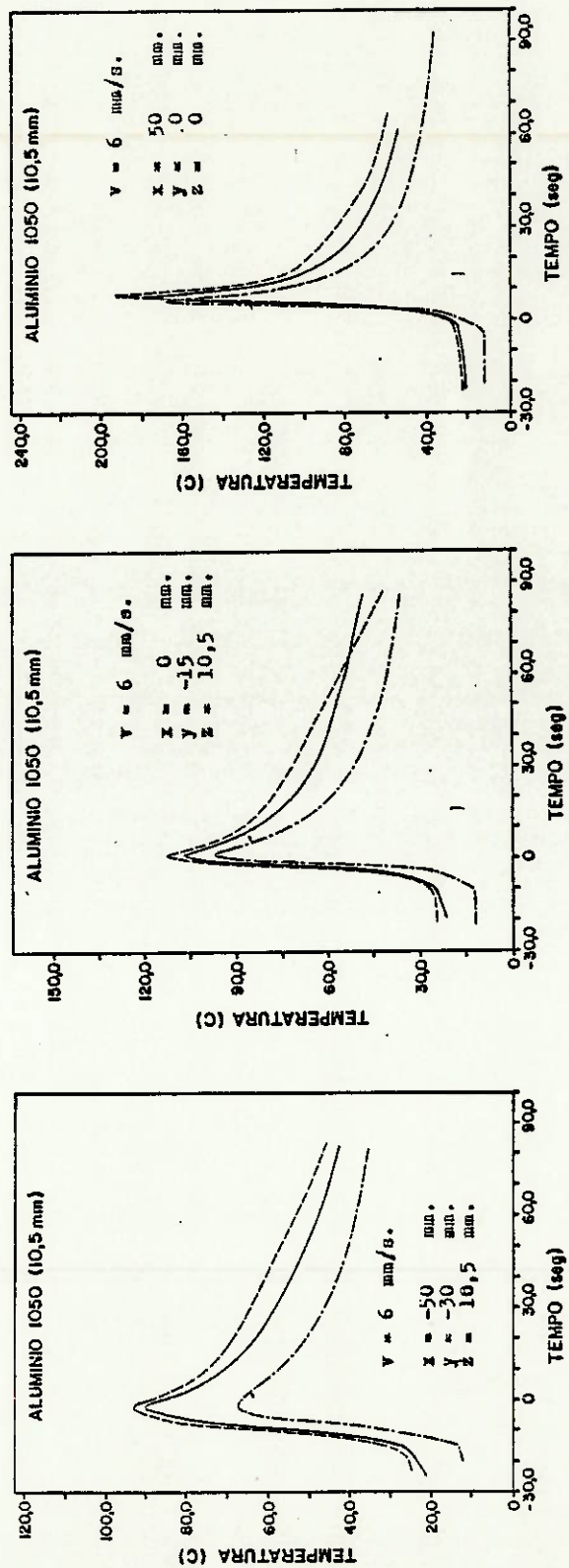


FIGURA 6.13 - PERFIS DE TEMPERATURA MEDIDOS EXPERIMENTALMENTE USANDO AS CONDIÇÕES OPERACIONAIS DA TABELA 6.3, PARA O MODELO DE CHAPA DE 10,5mm E VELOCIDADE 6,0mm/s

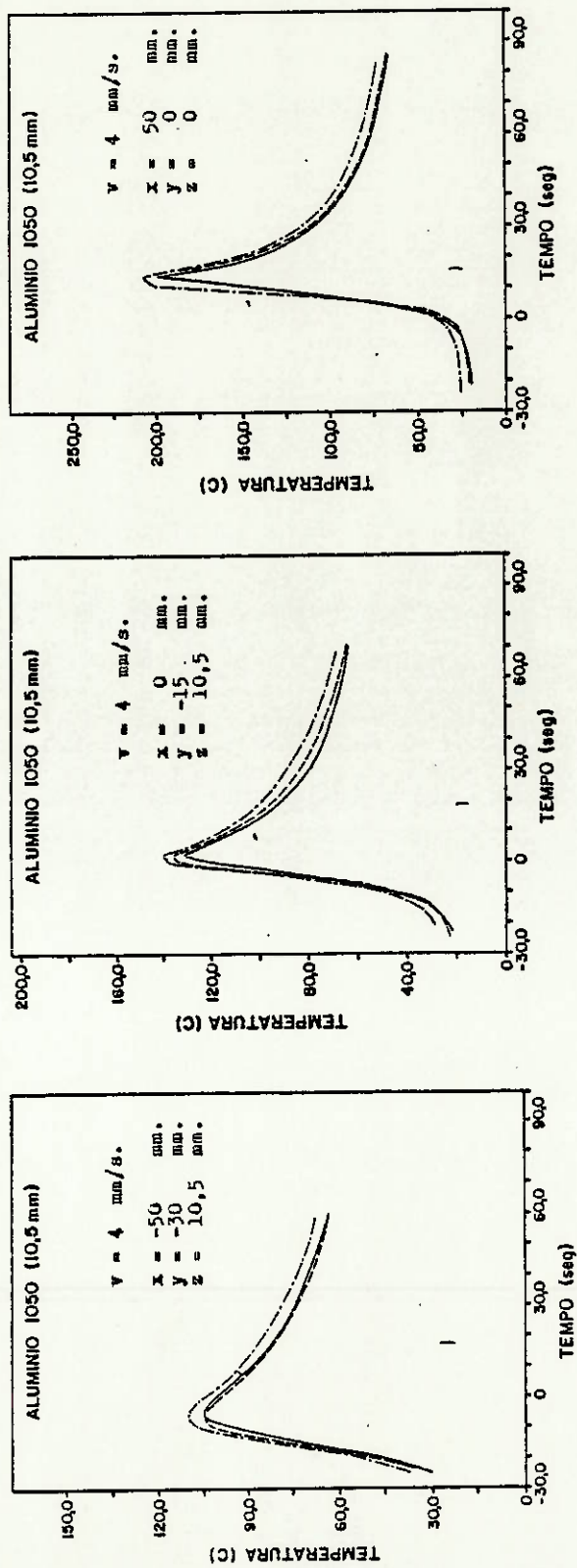


TABELA 6.14 - PERFIS DE TEMPERATURA MEDIDOS EXPERIMENTALMENTE USANDO AS CONDIÇÕES OPERACIONAIS DA TABELA 6.3, PARA O MODELO DE CHAPA DE 10,5mm E VELOCIDADE 4,0mm/s

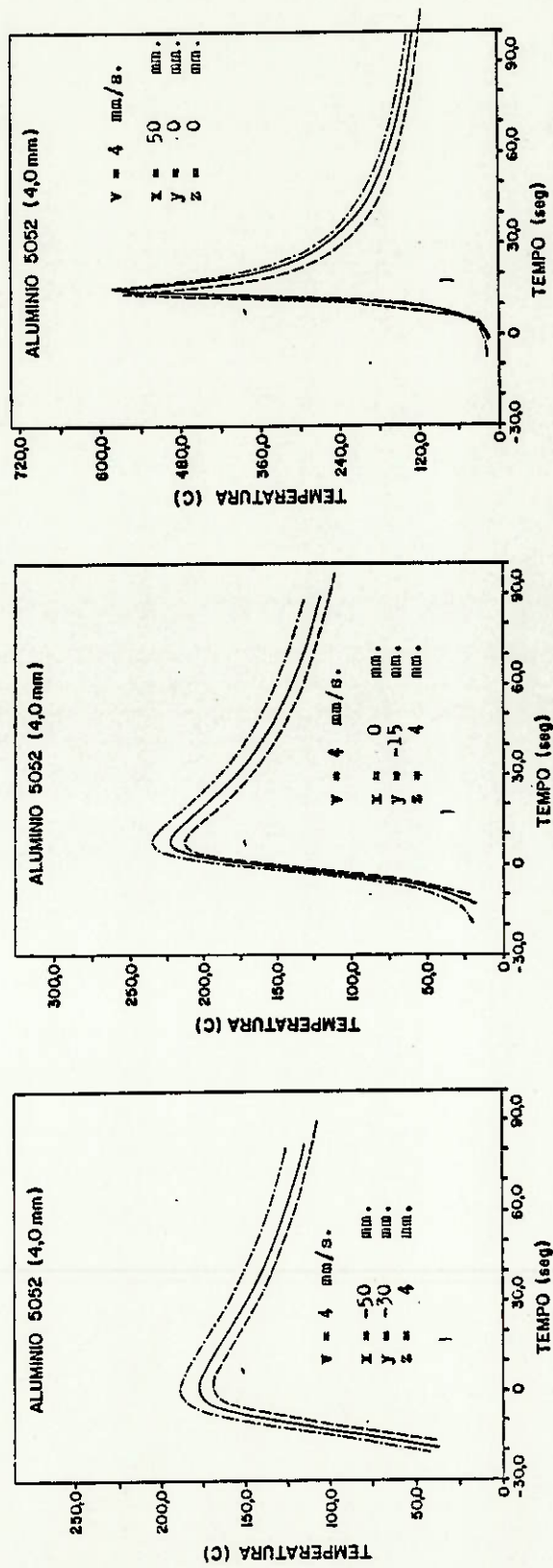


FIGURA 6.15 - PERFIS DE TEMPERATURA MEDIDOS EXPERIMENTALMENTE USANDO AS CONDIÇÕES OPERACIONAIS DA TABELA 6.4, PARA O MODELO DE CHAPA DE 4,0mm E VELOCIDADE 4,0mm/s

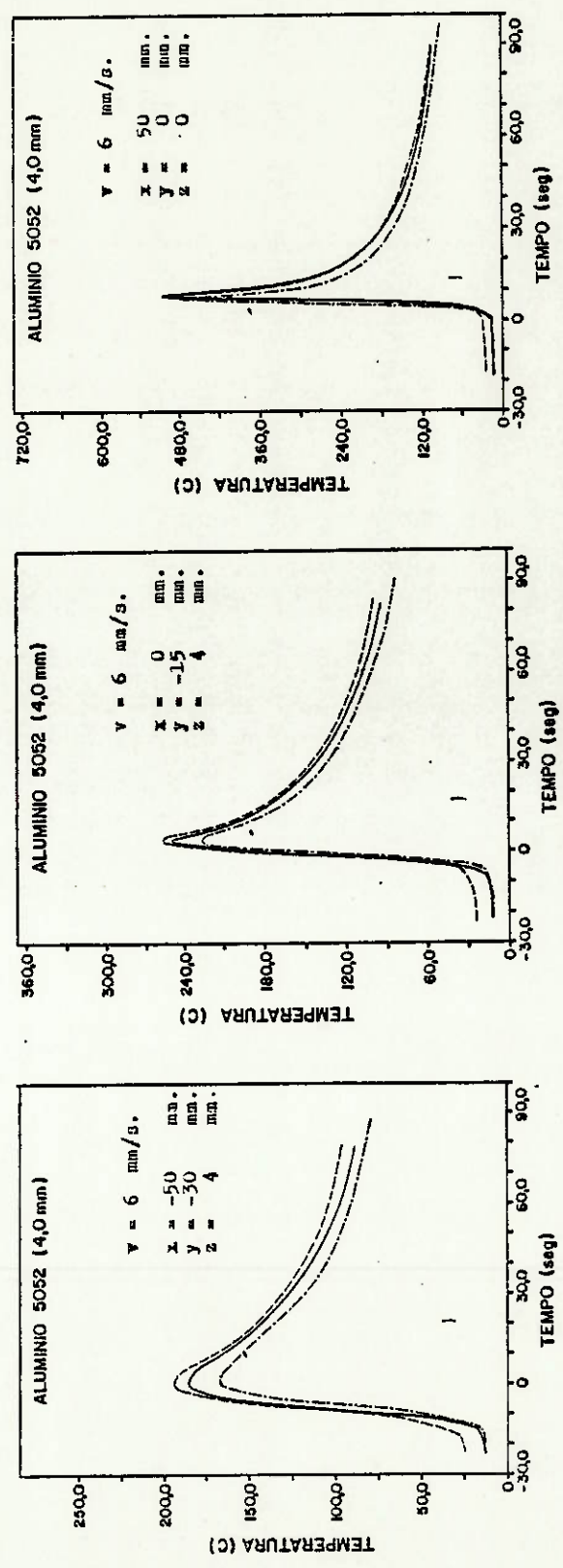


FIGURA 6.16 - PERFIS DE TEMPERATURA MEDIDOS EXPERIMENTALMENTE USANDO AS CONDIÇÕES OPERACIONAIS DA TABELA 6.4, PARA O MODELO DE CHAPA DE 4,0mm E VELOCIDADE 6,0mm/s

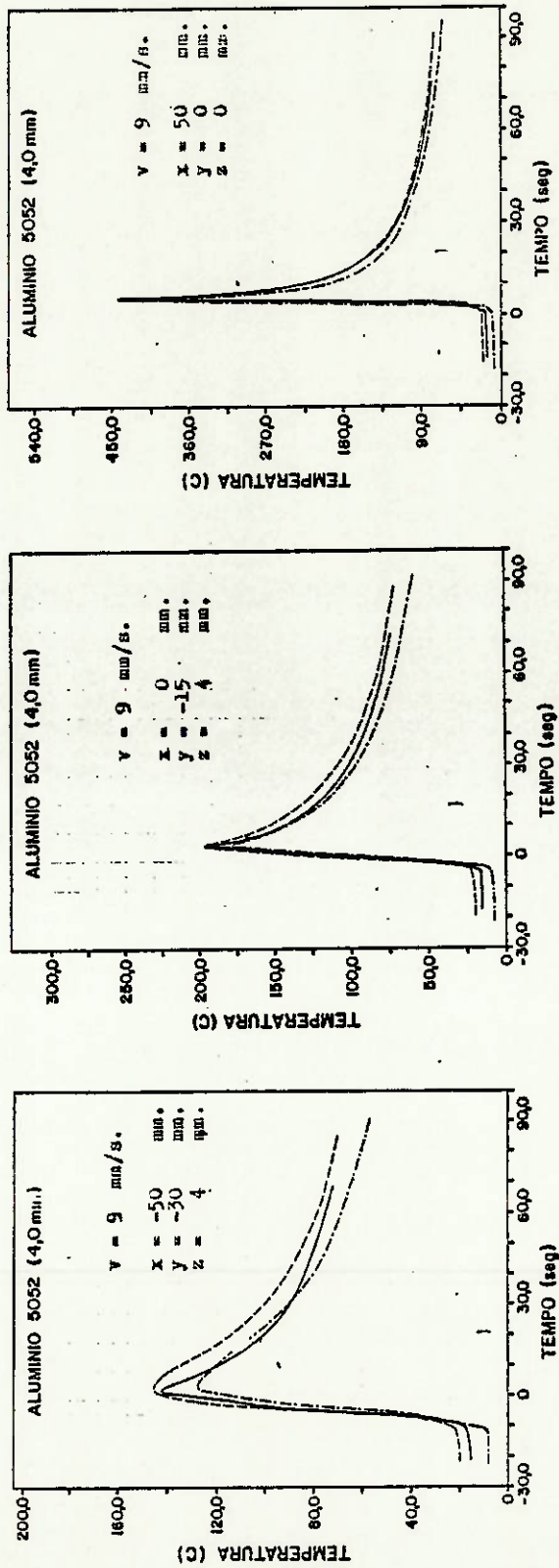


FIGURA 6.17 - PERFIS DE TEMPERATURA MEDIDOS EXPERIMENTALMENTE USANDO AS CONDIÇÕES OPERACIONAIS DA TABELA 6.4, PARA O MODELO DE CHAPA DE 4,0mm E VELOCIDADE 9,0mm/s

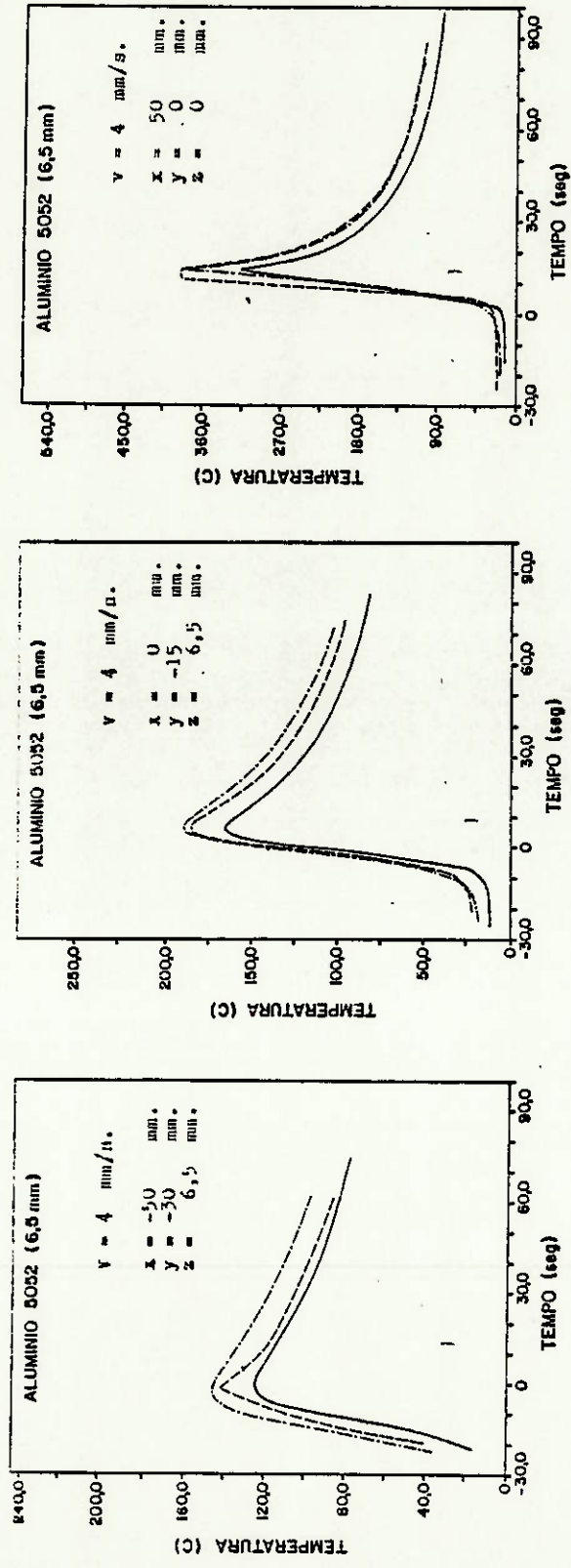


FIGURA 6.18 - PERFIS DE TEMPERATURA MEDIDOS EXPERIMENTALMENTE USANDO AS CONDIÇÕES OPERACIONAIS DA TABELA 6.4, PARA O MODELO DE CHAPA DE 6,5mm E VELOCIDADE 4,0mm/s

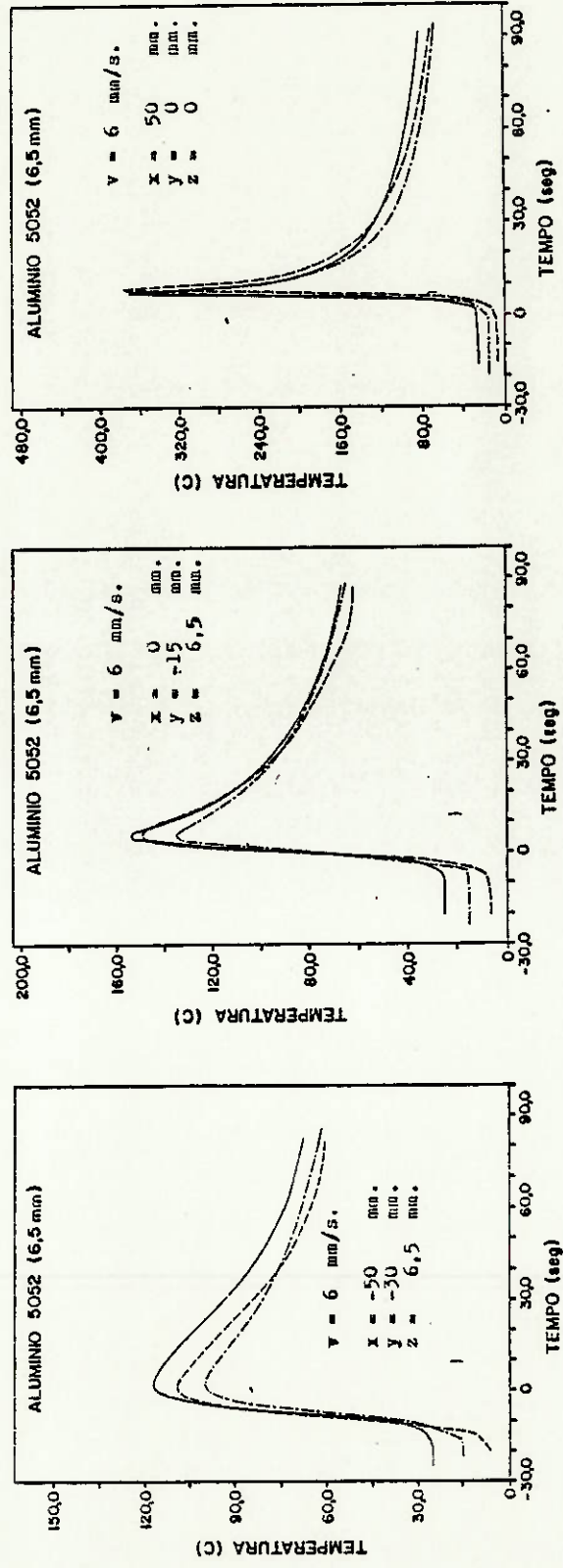


FIGURA 6.19 - PERFIS DE TEMPERATURA MEDIDOS EXPERIMENTALMENTE USANDO AS CONDIÇÕES OPERACIONAIS DA TABELA 6.4, PARA O MODELO DE CHAPA DE 6,5mm E VELOCIDADE 6,0mm/s

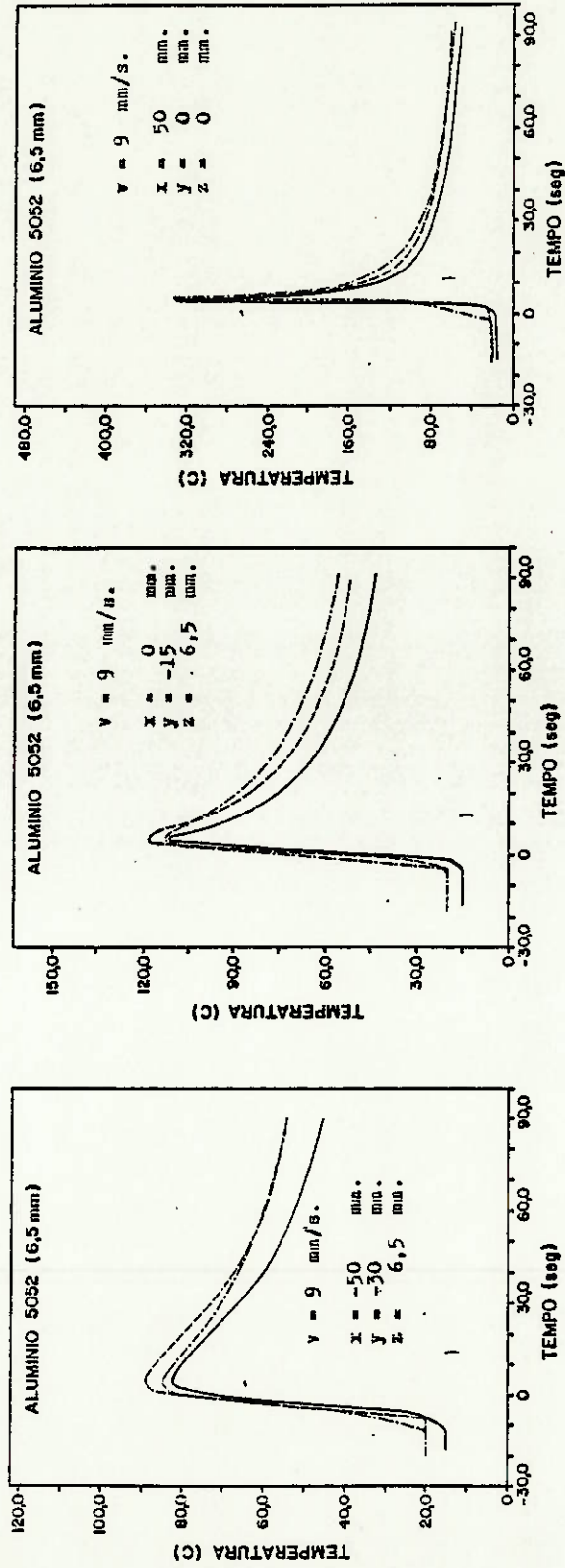


FIGURA 6.20 - PERFIS DE TEMPERATURA MEDIDOS EXPERIMENTALMENTE USANDO AS CONDIÇÕES OPERACIONAIS DA TABELA 6.4, PARA O MODELO DE CHAPA DE 6,5mm E VELOCIDADE 9,0mm/s

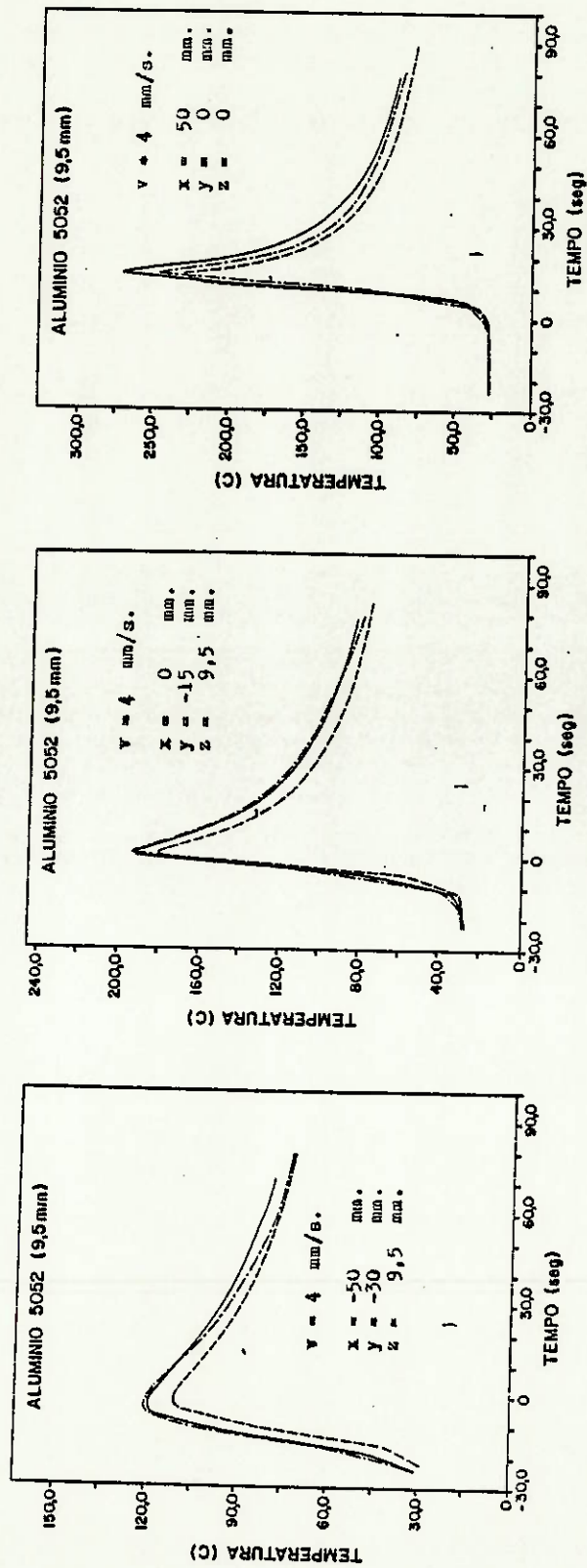


FIGURA 6.21 - PERFIS DE TEMPERATURA MEDIDOS EXPERIMENTALMENTE USANDO AS CONDIÇÕES OPERACIONAIS DA TABELA 6.4, PARA O MODELO DE CHAPA DE 9,5mm E VELOCIDADE 4,0mm/s

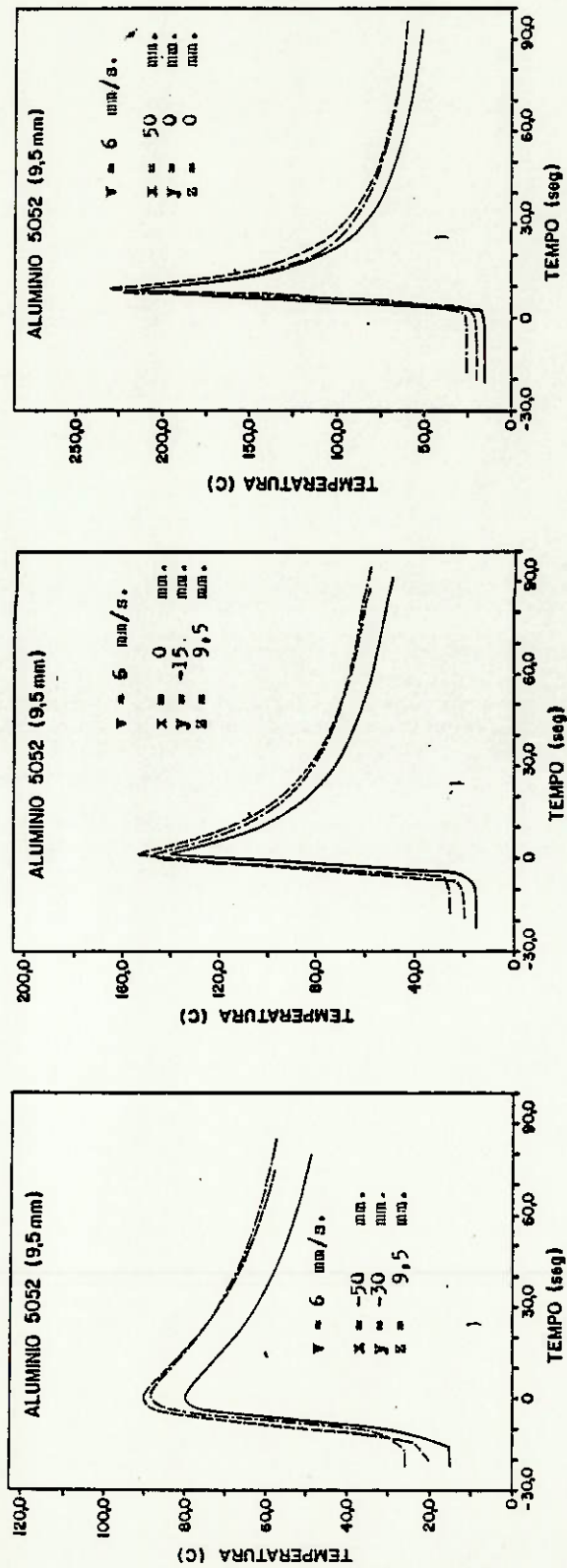


FIGURA 6.22 - PERFIS DE TEMPERATURA MEDIDOS EXPERIMENTALMENTE USANDO AS CONDIÇÕES OPERACIONAIS DA TABELA 6.4, PARA O MODELO DE CHAPA DE 9,5mm E VELOCIDADE 6,0mm/s

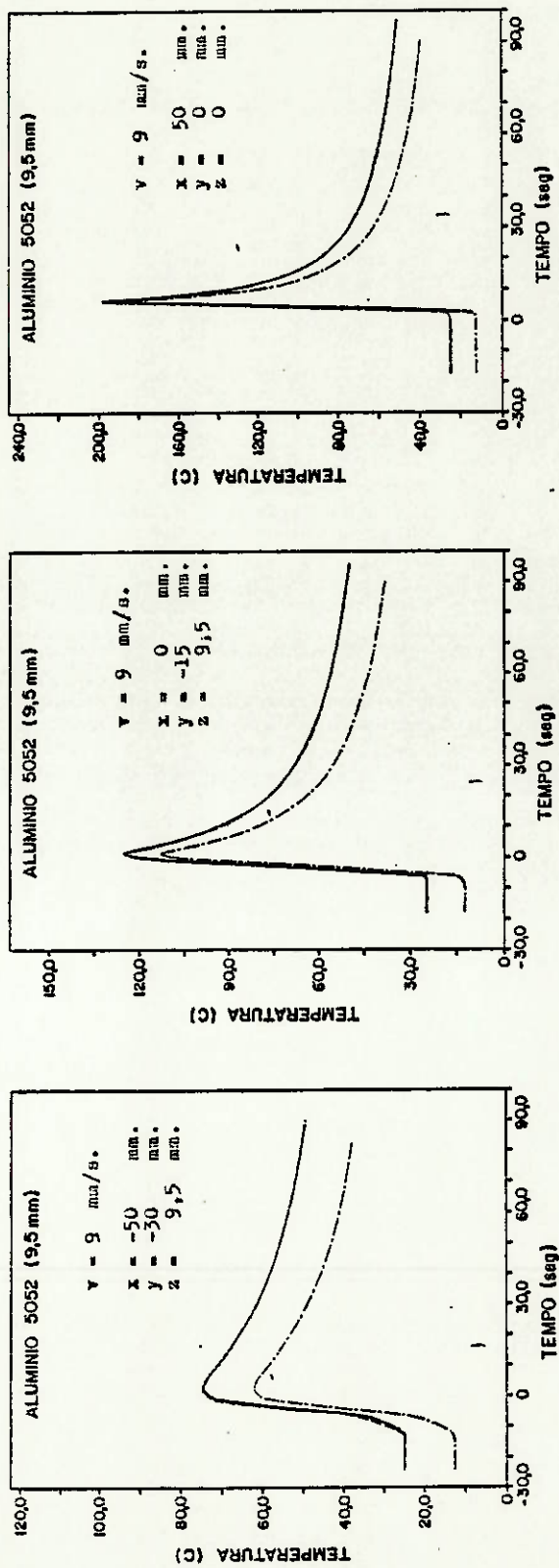


FIGURA 6.23 - PERFIS DE TEMPERATURA MEDIDOS EXPERIMENTALMENTE USANDO AS CONDIÇÕES OPERACIONAIS DA TABELA 6.4, PARA O MODELO DE CHAPA DE 9,5mm E VELOCIDADE 9,0mm/s

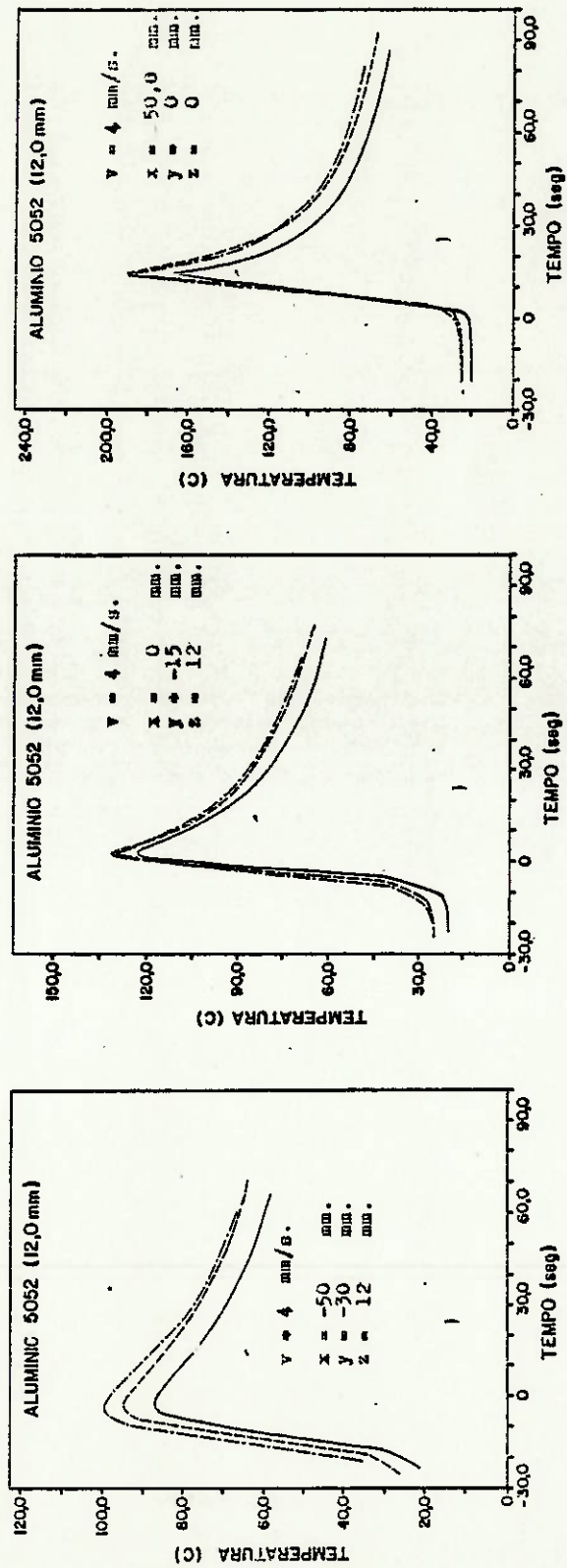


FIGURA 6.24 - PERFIS DE TEMPERATURA MEDIDOS EXPERIMENTALMENTE USANDO AS CONDIÇÕES OPERACIONAIS DA TABELA 6.4, PARA O MODELO DE CHAPA DE 12,0mm E VELOCIDADE 4,0mm/s

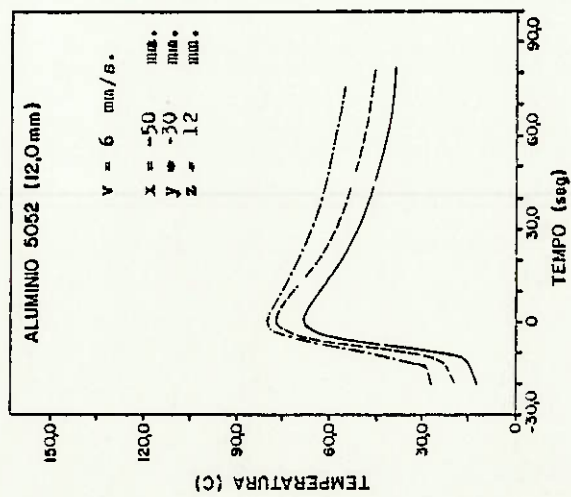
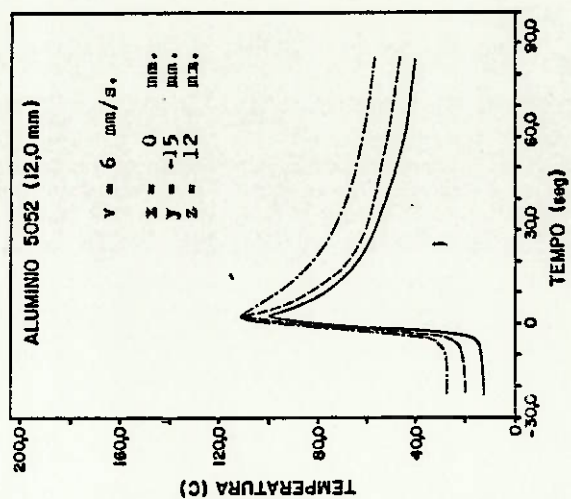
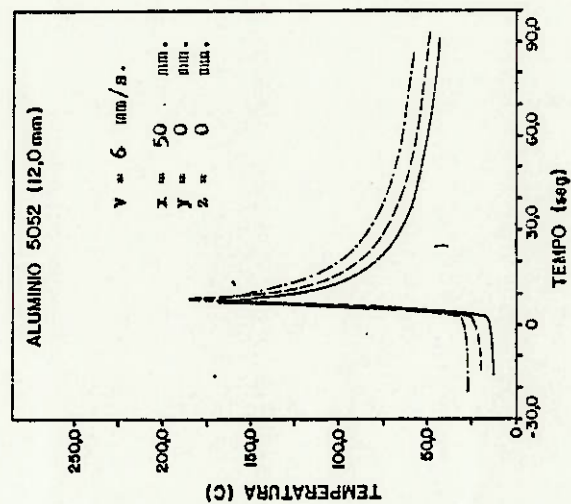


FIGURA 6.25 - PERFIS DE TEMPERATURA MEDIDOS EXPERIMENTALMENTE USANDO AS CONDIÇÕES OPERACIONAIS DA TABELA 6.4, PARA O MODELO DE CHAPA DE 12,0mm E VELOCIDADE 6,0mm/s

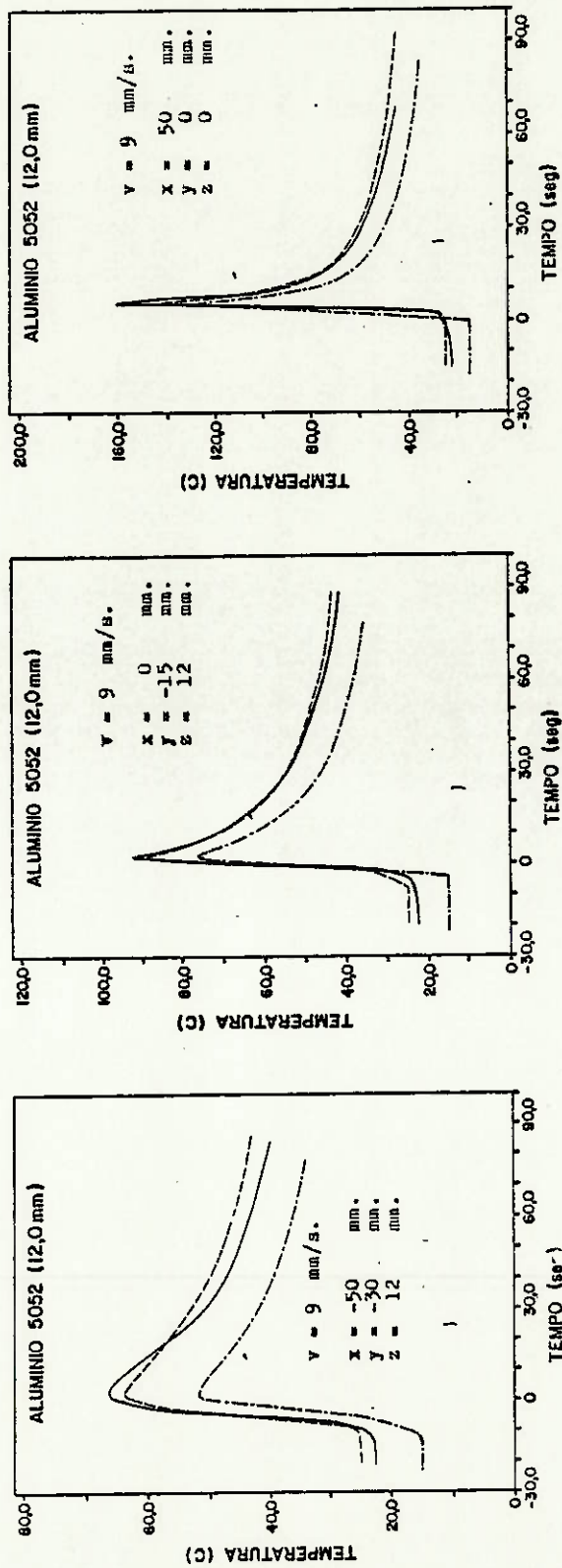


FIGURA 6.26 - PERFIS DE TEMPERATURA MEDIDOS EXPERIMENTALMENTE USANDO AS CONDIÇÕES OPERACIONAIS DA TABELA 6.4, PARA O MODELO DE CHAPA DE 12,0mm E VELOCIDADE 9,0mm/s

CAPÍTULO 7

ANÁLISE COMPARATIVA, CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Os resultados obtidos, tanto no processamento numérico como nos ensaios experimentais, já foram objeto de discussões e análise nos capítulos 5 e 6. Ficou restando, uma análise comparativa entre os resultados teóricos e experimentais, com o propósito de se verificar qual o grau de correlação existente entre eles, quais os pontos possíveis de correção nos casos de discrepâncias existentes e quais as explicações mais coerentes para as diferenças encontradas.

7.1 - ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE AS DISTRIBUIÇÕES TEÓRICAS E EXPERIMENTAIS

Examinando as figuras 7.1 a 7.21, onde são mostradas as superposições das curvas de distribuição de temperaturas teóricas e das curvas de distribuições de temperaturas experimentais, podem ser feitos, em linhas gerais, os seguintes comentários:

1. Os resultados numéricos apresentam uma excelente concordância com os valores experimentais tanto para pontos próximos como para pontos afastados da linha de aquecimento;
2. A máxima temperatura ocorre no mesmo instante, tanto para a distribuição teórica como para a experimental;
3. Os valores das velocidades de aquecimento e resfriamento mostram uma boa concordância entre os resultados teóricos e os experimentais;
4. Os valores de temperaturas um pouco maiores na distribuição teórica devem-se principalmente a terem sido considerados nulos os valores do coeficiente de

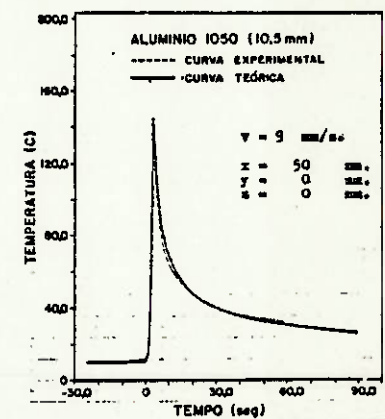
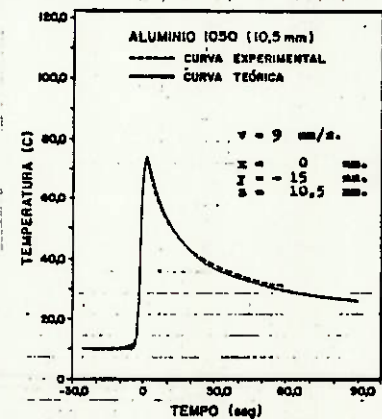
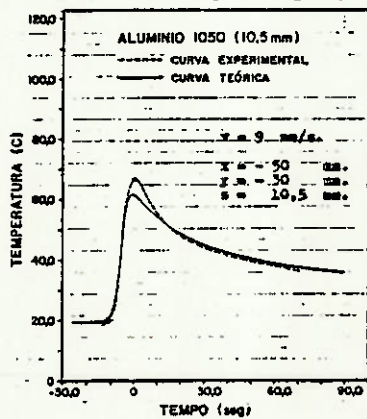
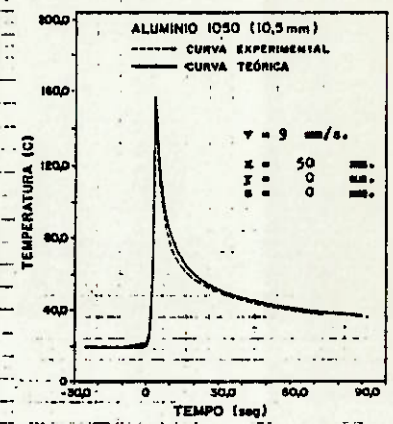
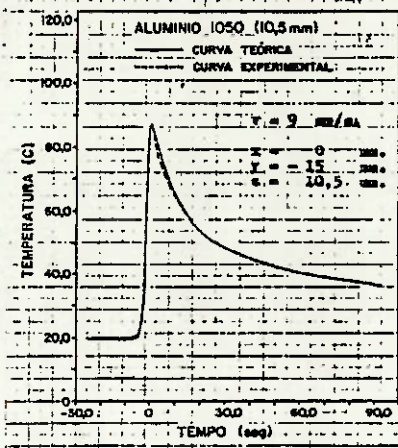
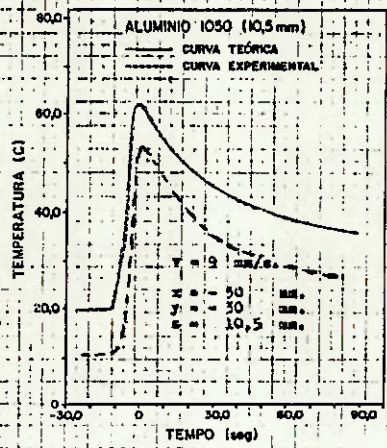
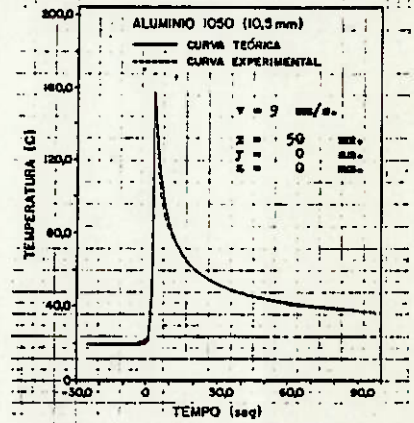
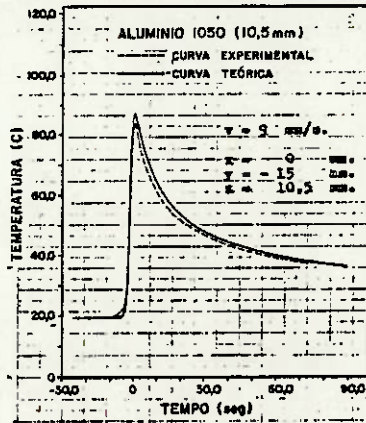
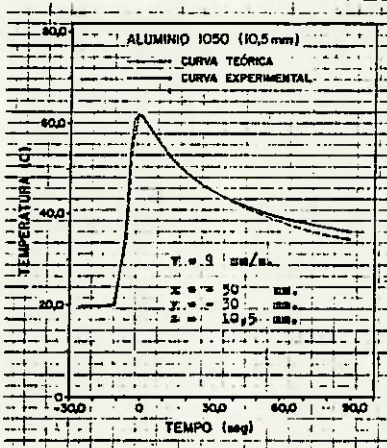


FIGURA 7.1-SUPERPOSIÇÃO DAS CURVAS TEÓRICA E EXPERIMENTAL DE DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA, OBTIDAS PARA UMA CHAPA DE ALUMÍNIO-PURO DE 10,5mm, AQUECIDA POR UMA FONTE MOVIMENTANDO-SE A 9,0mm/s

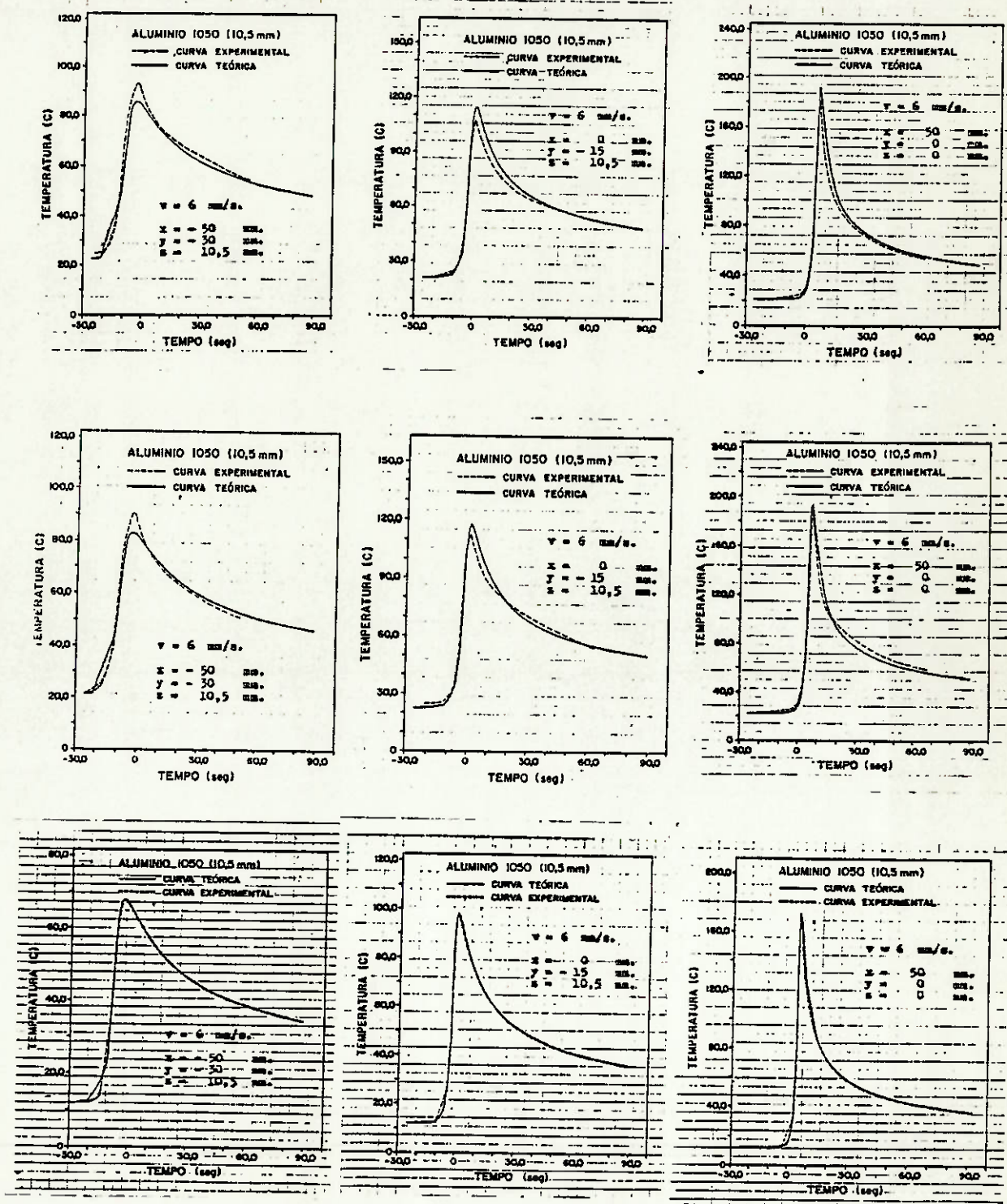


FIGURA 7.2-SUPERPOSIÇÃO DAS CURVAS TEÓRICA E EXPERIMENTAL DE DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA, OBTIDAS PARA UMA CHAPA DE ALUMÍNIO-PURO DE 10,5mm, AQUECIDA POR UMA FONTE MOVIMENTANDO-SE A 6,0mm/s

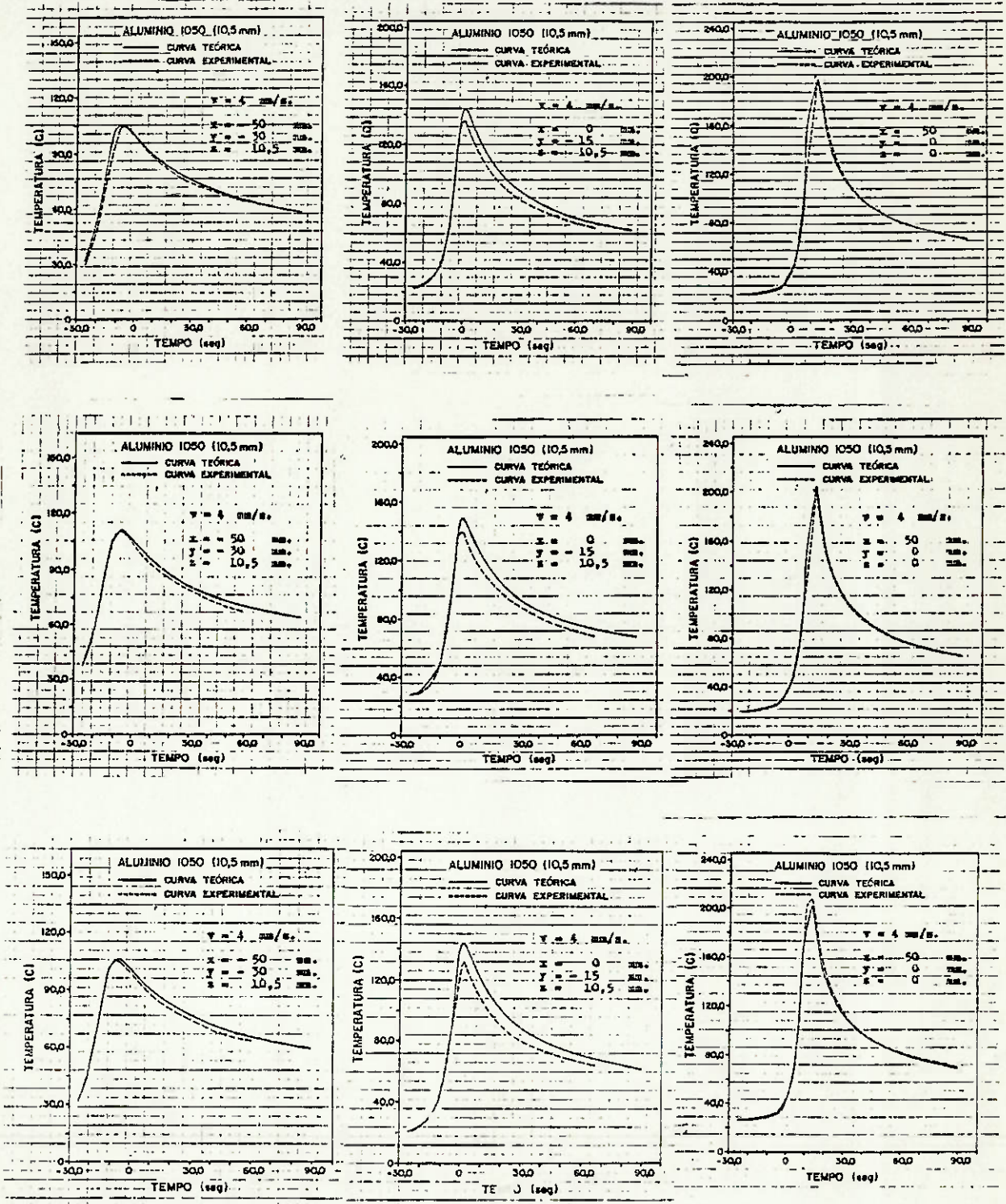


FIGURA 7.3-SUPERPOSIÇÃO DAS CURVAS TEÓRICA E EXPERIMENTAL DE DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA, DEVIDAS PARA UMA CHAPA DE ALUMÍNIO-PURO DE 10,6mm, AQUECIDA POR UMA FONTE MOVIMENTANDO-SE A 4,0mm/s

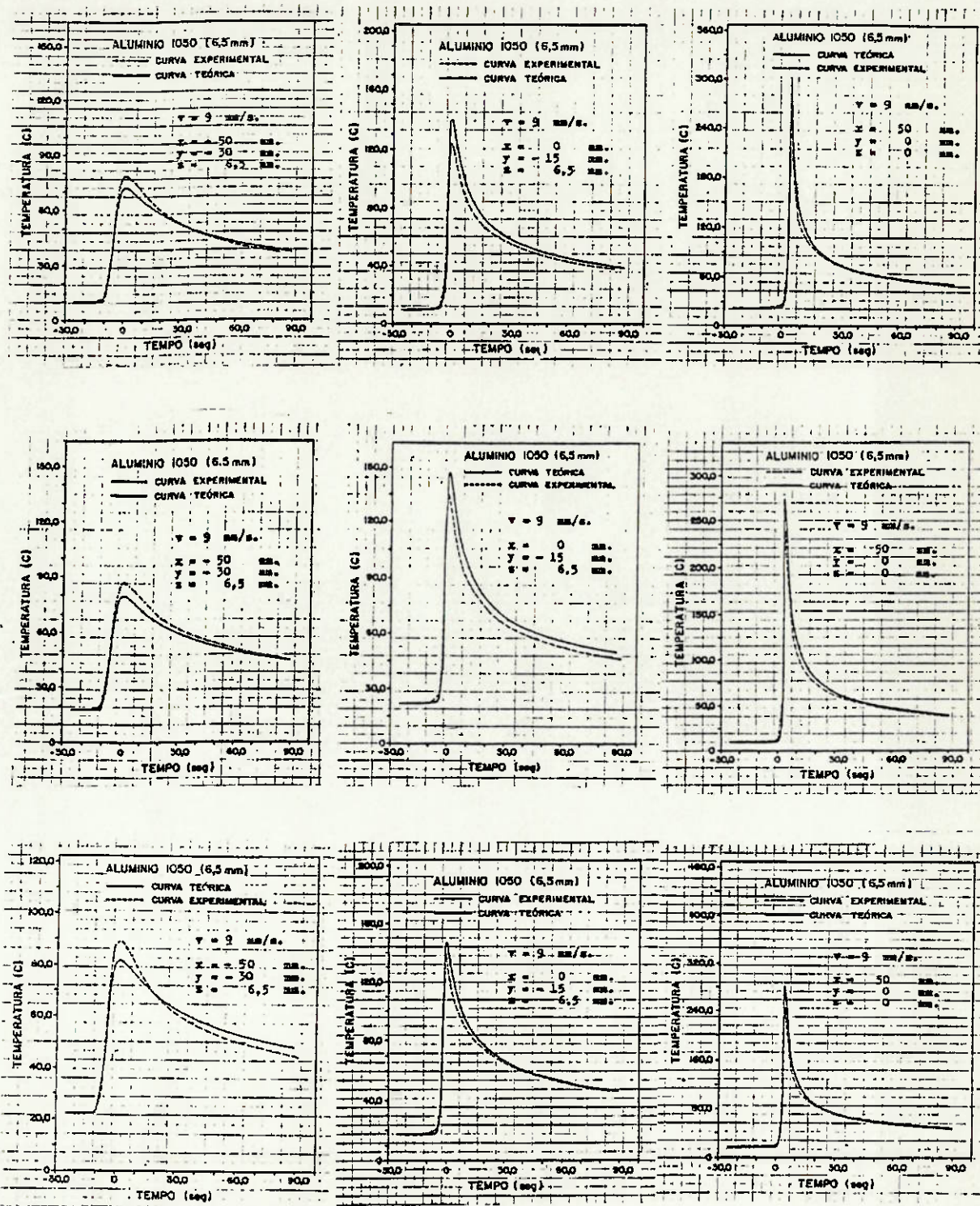


FIGURA 7.4-SUPERPOSIÇÃO DAS CURVAS TEÓRICA E EXPERIMENTAL DE DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA, OBTIDAS PARA UMA CHAPA DE ALUMÍNIO-PURO DE 3,5mm, AQUECIDA POR UMA FONTE MOVIMENTANDO-SE A 9,0mm/s

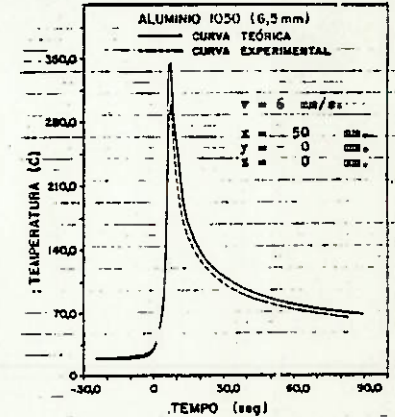
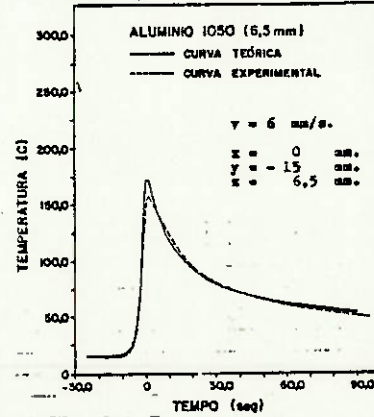
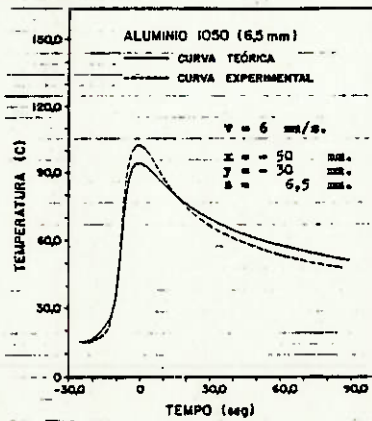
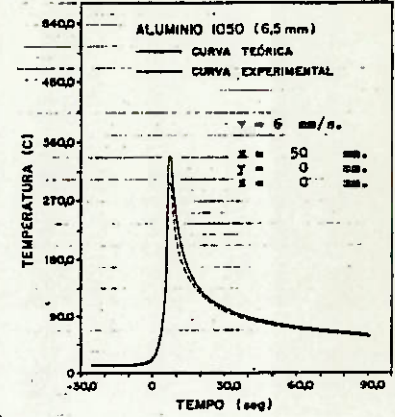
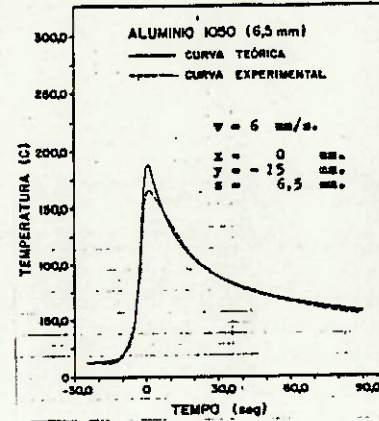
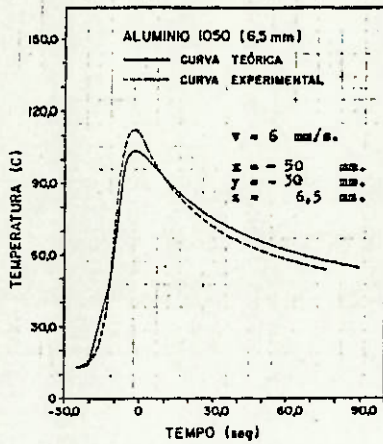
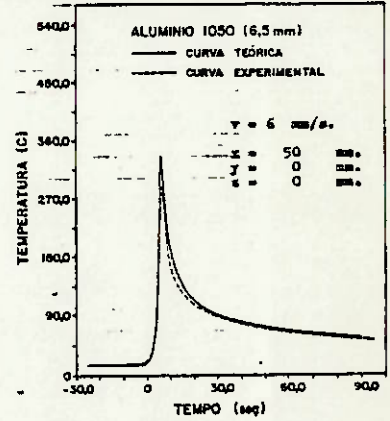
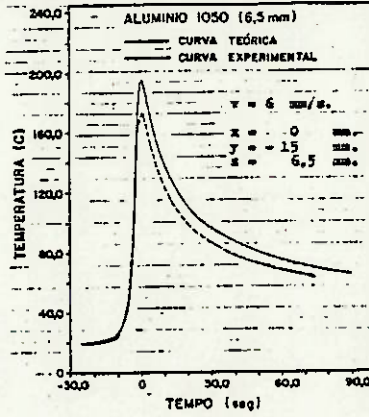
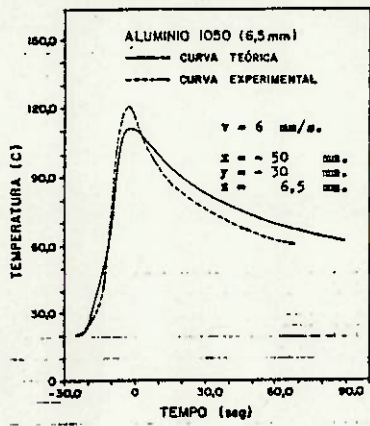


FIGURA 7.5-SUPERPOSIÇÃO DAS CURVAS TEÓRICA E EXPERIMENTAL DE DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA, OBTIDAS PARA UMA CHAPA DE ALUMÍNIO-PURO DE 6,5mm, AQUECIDA POR UMA FONTE MOVIMENTANDO-SE A 6,0mm/s

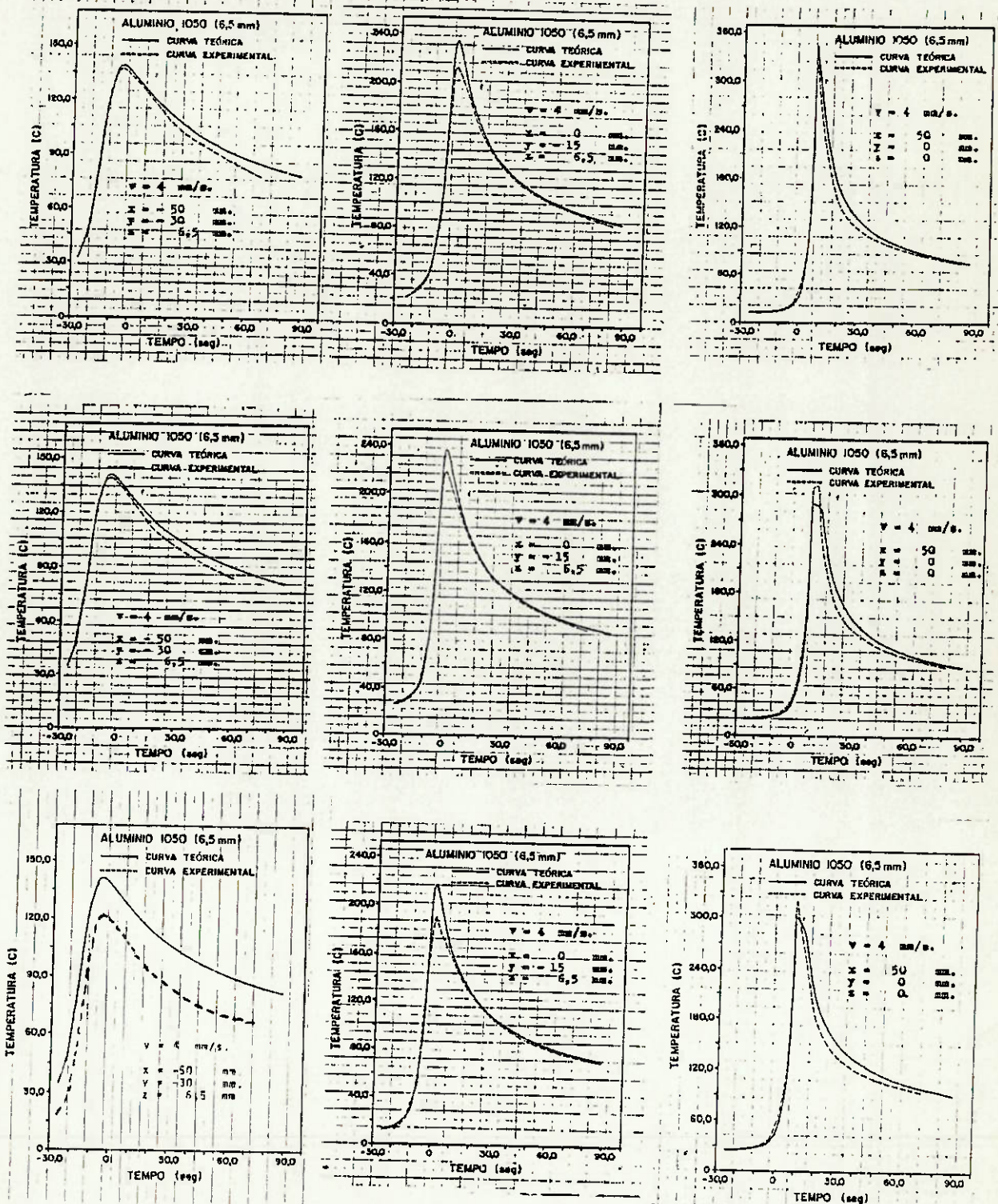


FIGURA 7.5-SUPERPOSIÇÃO DAS CURVAS TEÓRICA E EXPERIMENTAL DE DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA, OBTIDAS PARA UMA CHAPA DE ALUMÍNIO-PURO DE 6,5mm, AQUECIDA POR UMA FONTE MOVIMENTANDO-SE A 4,0mm/s

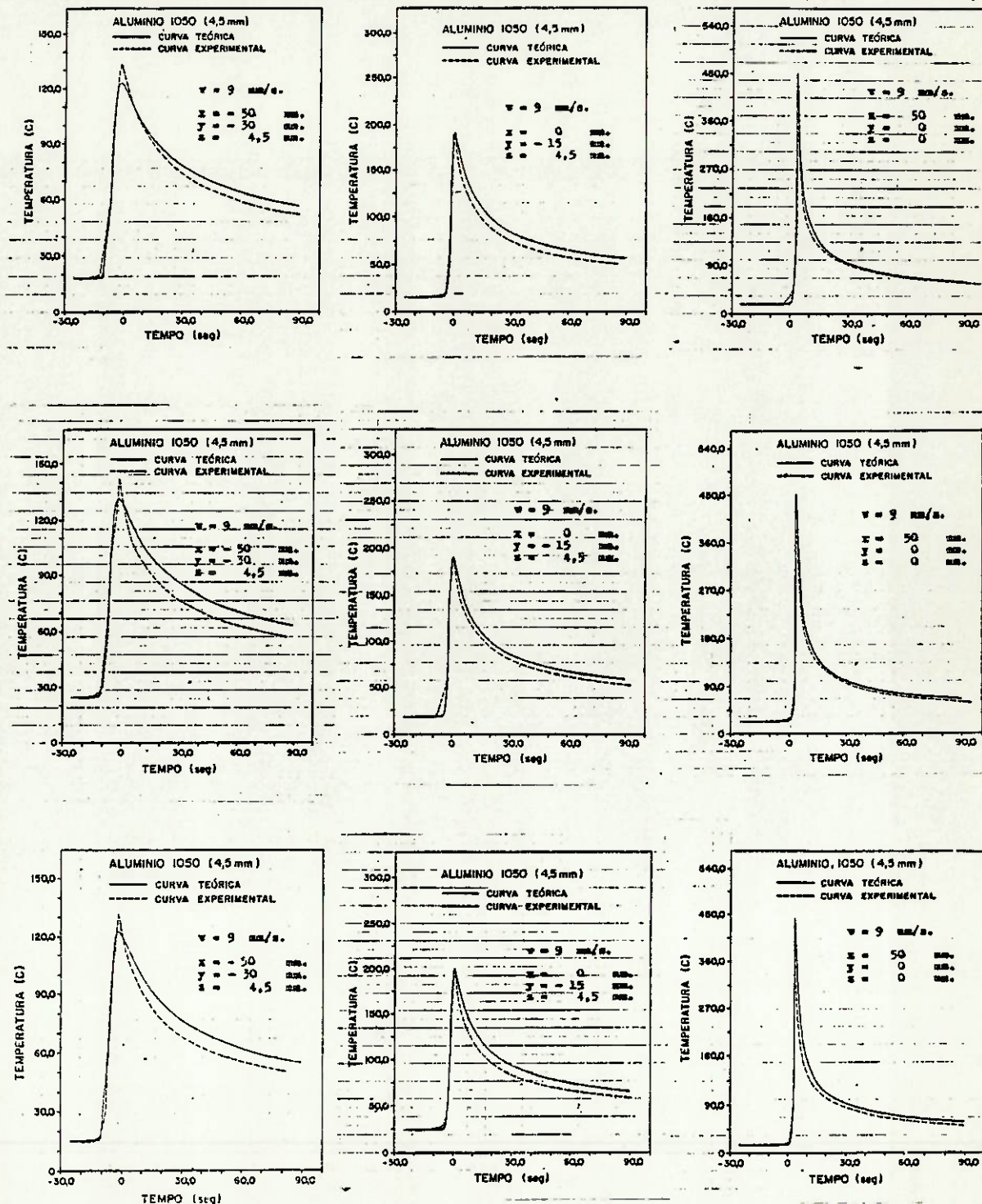


FIGURA 7.7-SUPERPOSIÇÃO DAS CURVAS TEÓRICA E EXPERIMENTAL DE DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA, OBTIDAS PARA UMA CHAPA DE ALUMÍNIO-PURO DE 4,5mm, AQUECIDA POR UMA FONTE MOVIMENTANDO-SE A 9,0mm/s

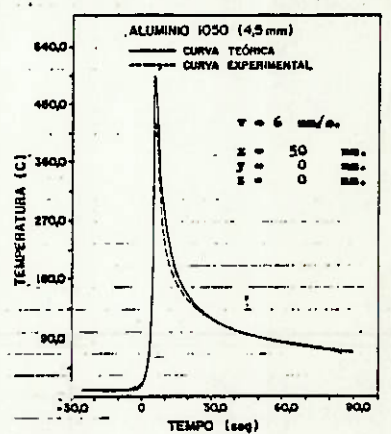
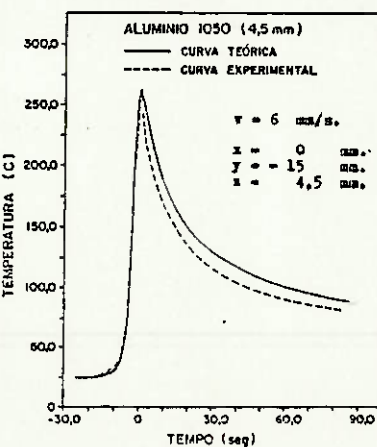
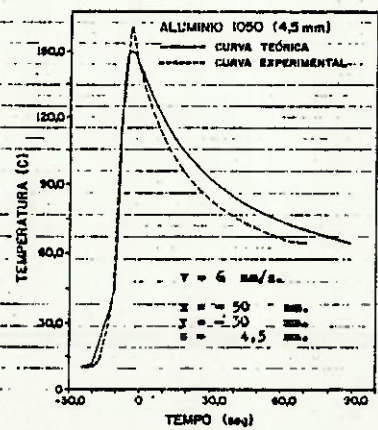
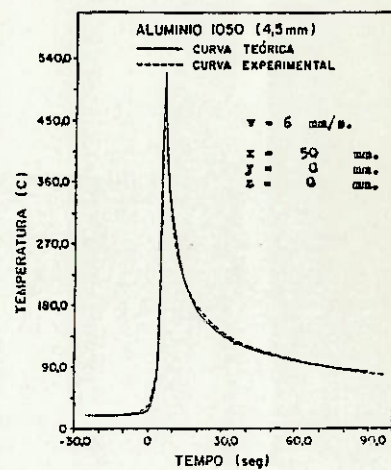
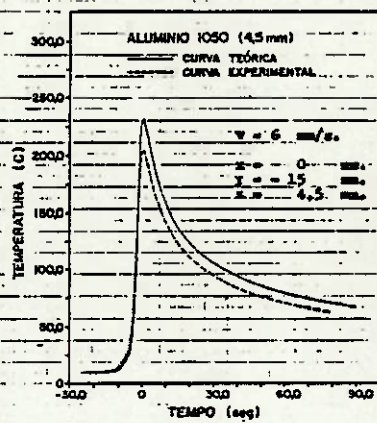
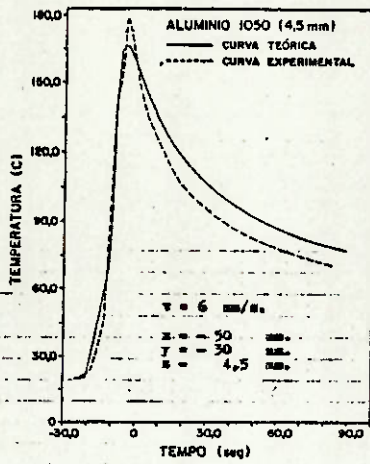
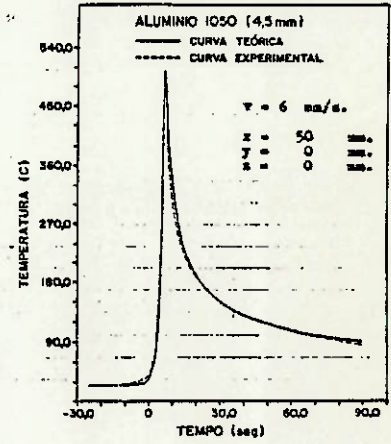
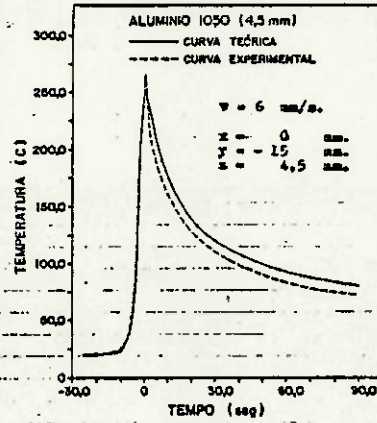
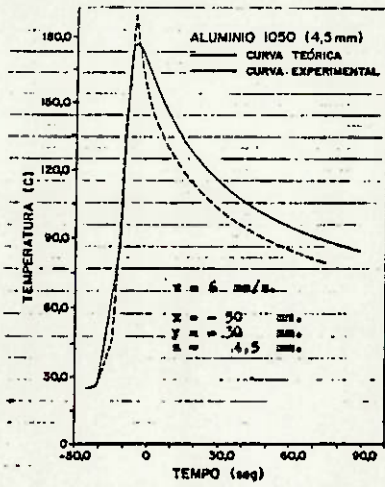


FIGURA 7.3-SUPERPOSIÇÃO DAS CURVAS TEÓRICA E EXPERIMENTAL DE DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA, OBTIDAS PARA UMA CHAPA DE ALUMÍNIO-PURO DE 4,5mm, AQUECIDA POR UMA FONTE MOVIMENTANDO-SE A 6,3mm/s

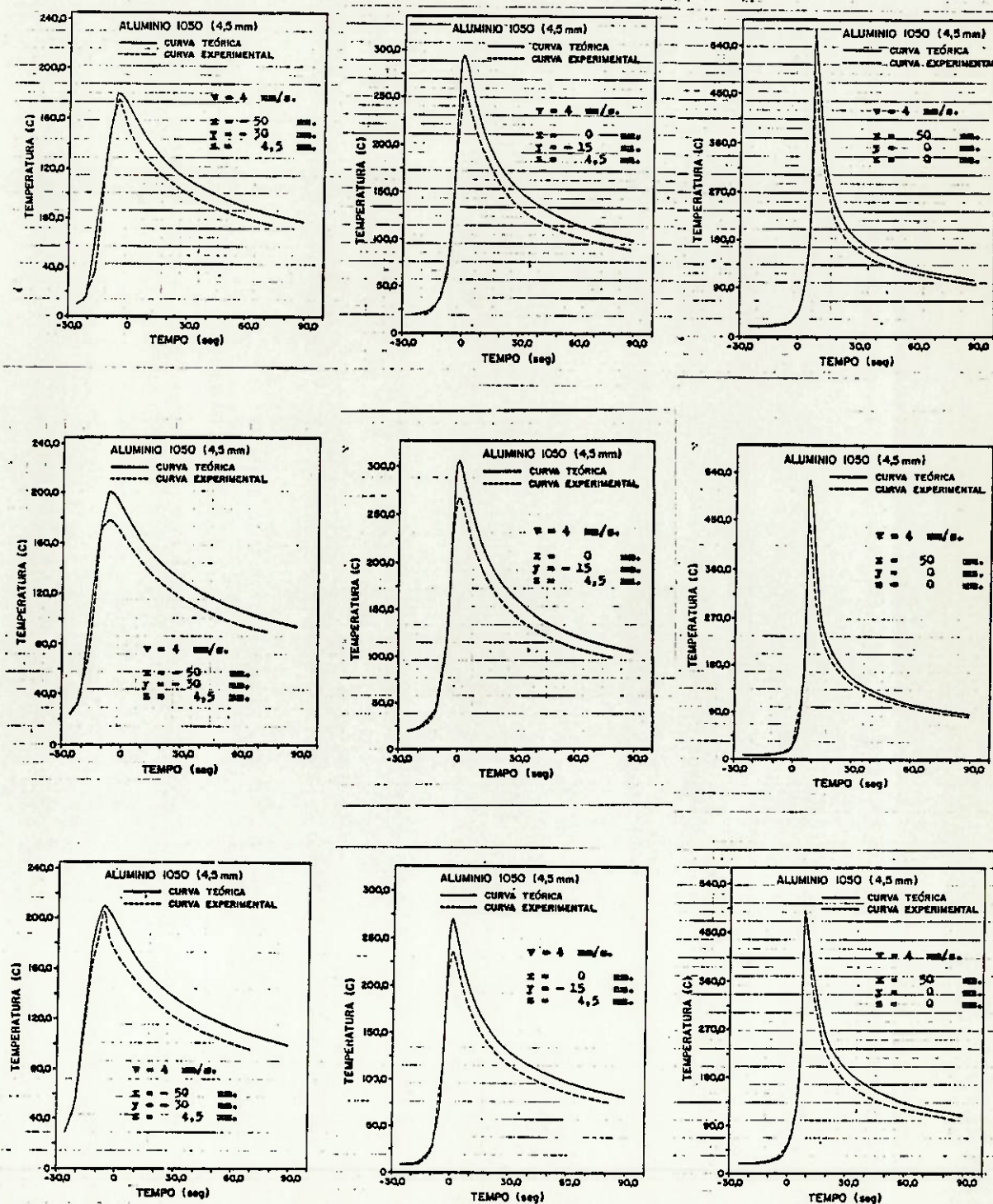


FIGURA 7.9-SUPERPOSIÇÃO DAS CURVAS TEÓRICA E EXPERIMENTAL DE DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA, OBTIDAS PARA UMA CHAPA DE ALUMÍNIO-PURO DE 4,5mm, AQUECIDA POR UMA FONTE MOVIMENTANDO-SE A 4,0mm/s

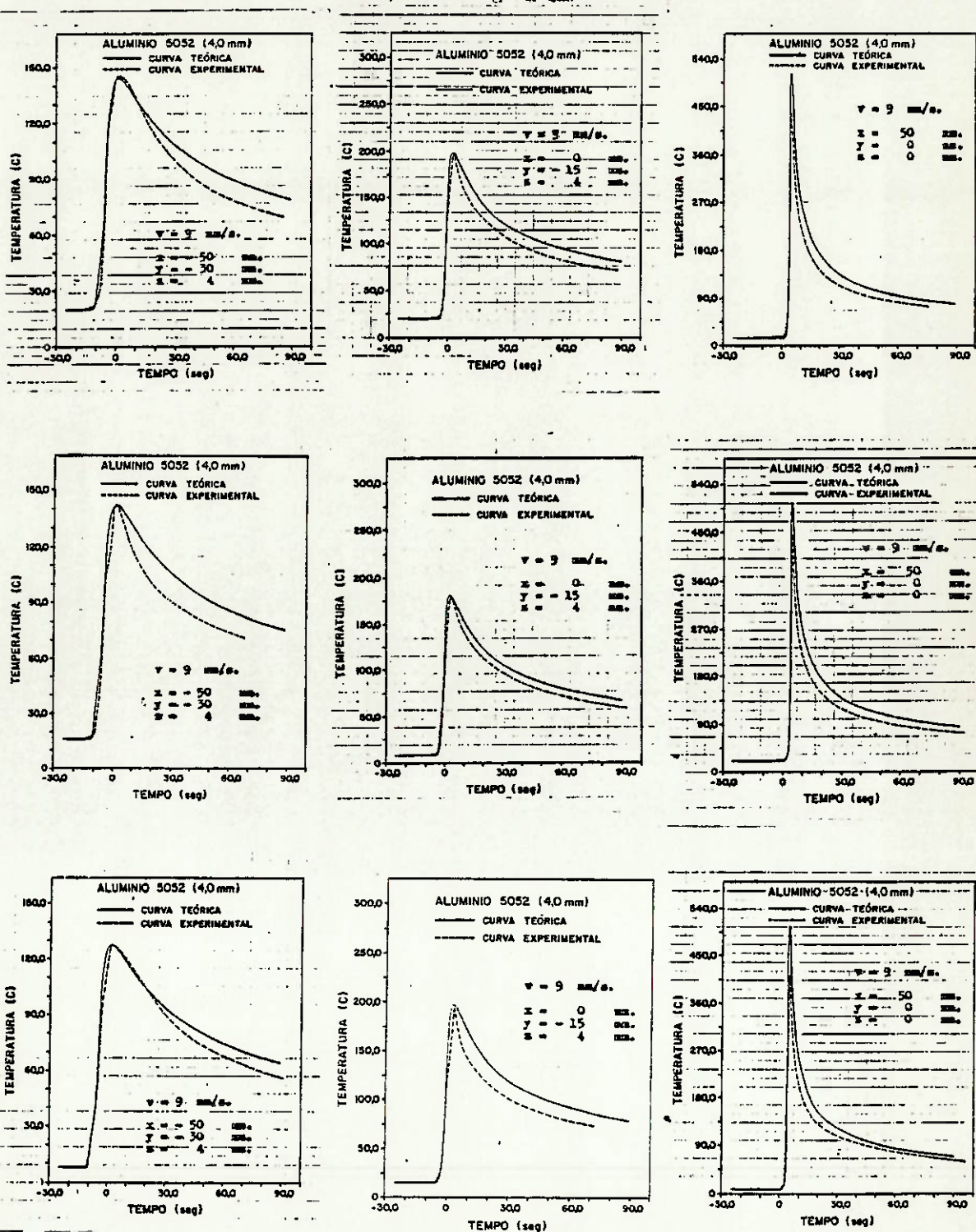


FIGURA 7.10-SUPERPOSIÇÃO DAS CURVAS TEÓRICA E EXPERIMENTAL DE DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA, OBTIDAS PARA UMA CHAPA DE ALUMÍNIO-MAGNÉSIO DE 4,0mm, AQUECIDA POR UMA FONTE MOVIMENTANDO-SE A 9,0mm/s

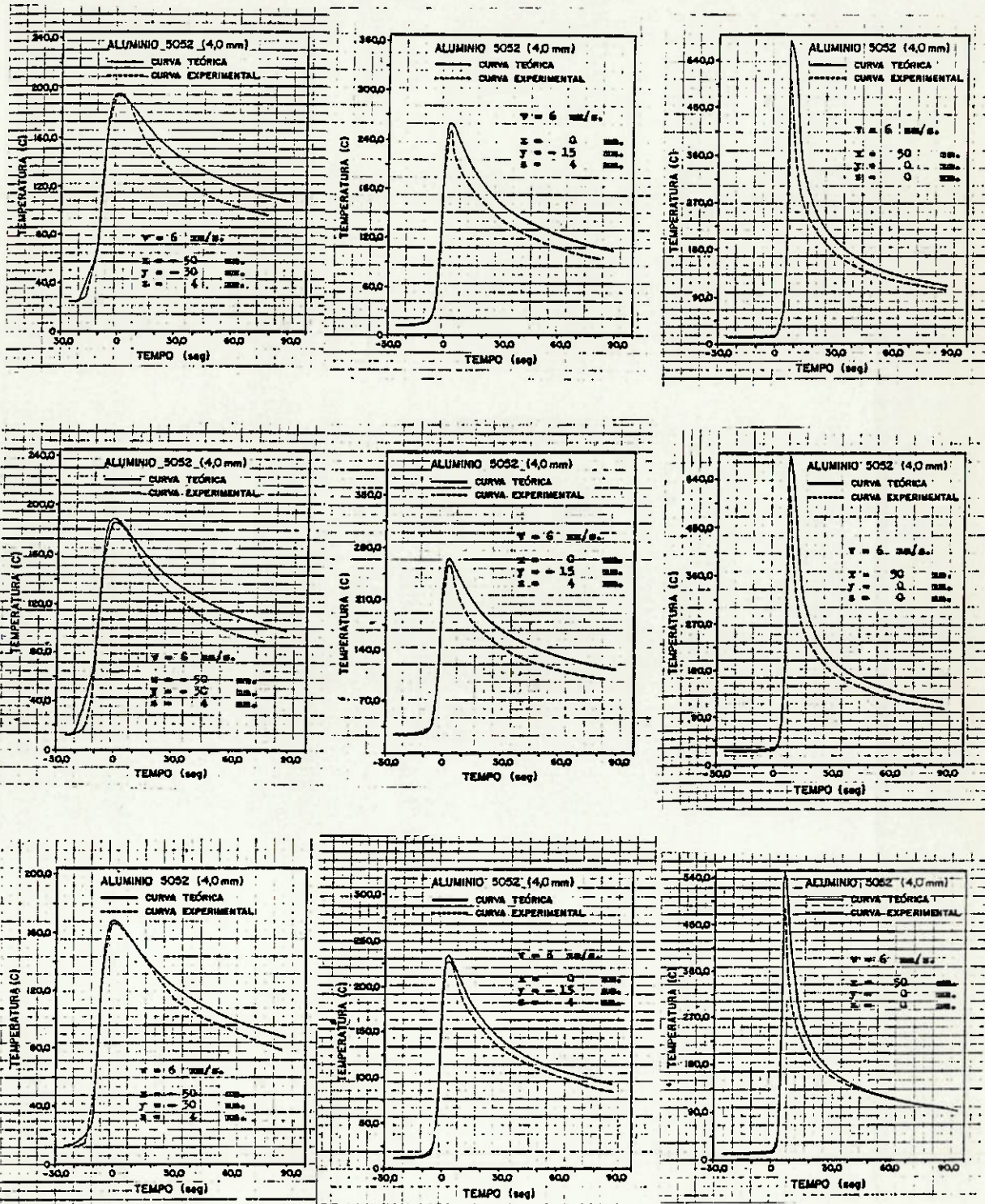


FIGURA 7.11-SUPERPOSIÇÃO DAS CURVAS TEÓRICA E EXPERIMENTAL DE DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA, OBTIDAS PARA UMA CHAPA DE ALUMÍNIO-MAGNÉSIO DE 4,0mm, AQUECIDA POR UMA FONTE MOVIMENTANDO-SE A 6,0mm/s

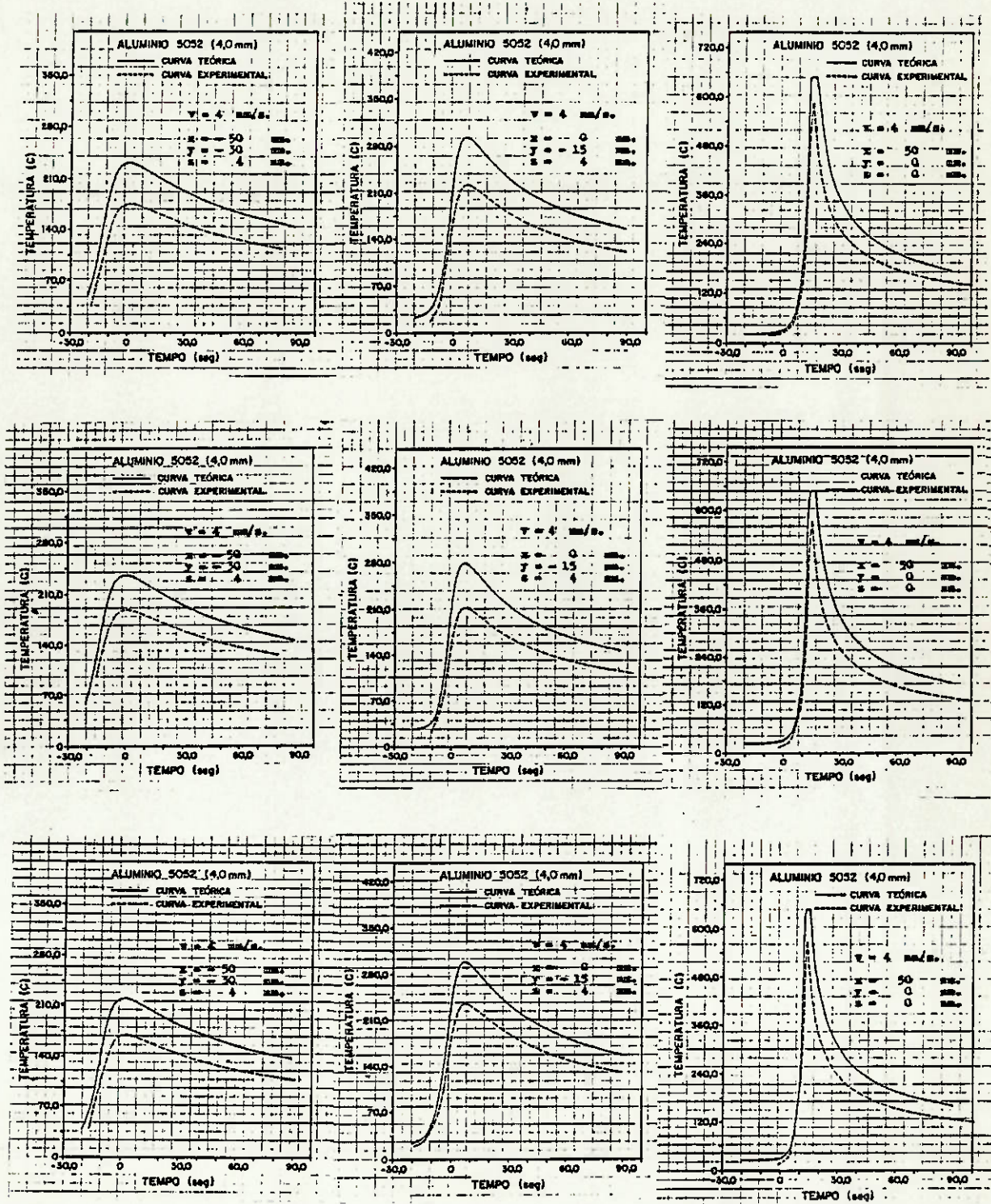


FIGURA 7.12-SUPERPOSIÇÃO DAS CURVAS TEÓRICA E EXPERIMENTAL DE DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA, OBTIDAS PARA UMA CHAPA DE ALUMÍNIO-MAGNÉSIO DE 4,0mm, AQUECIDA POR UMA FONTE MOVIMENTANDO-SE A 4,0mm/s

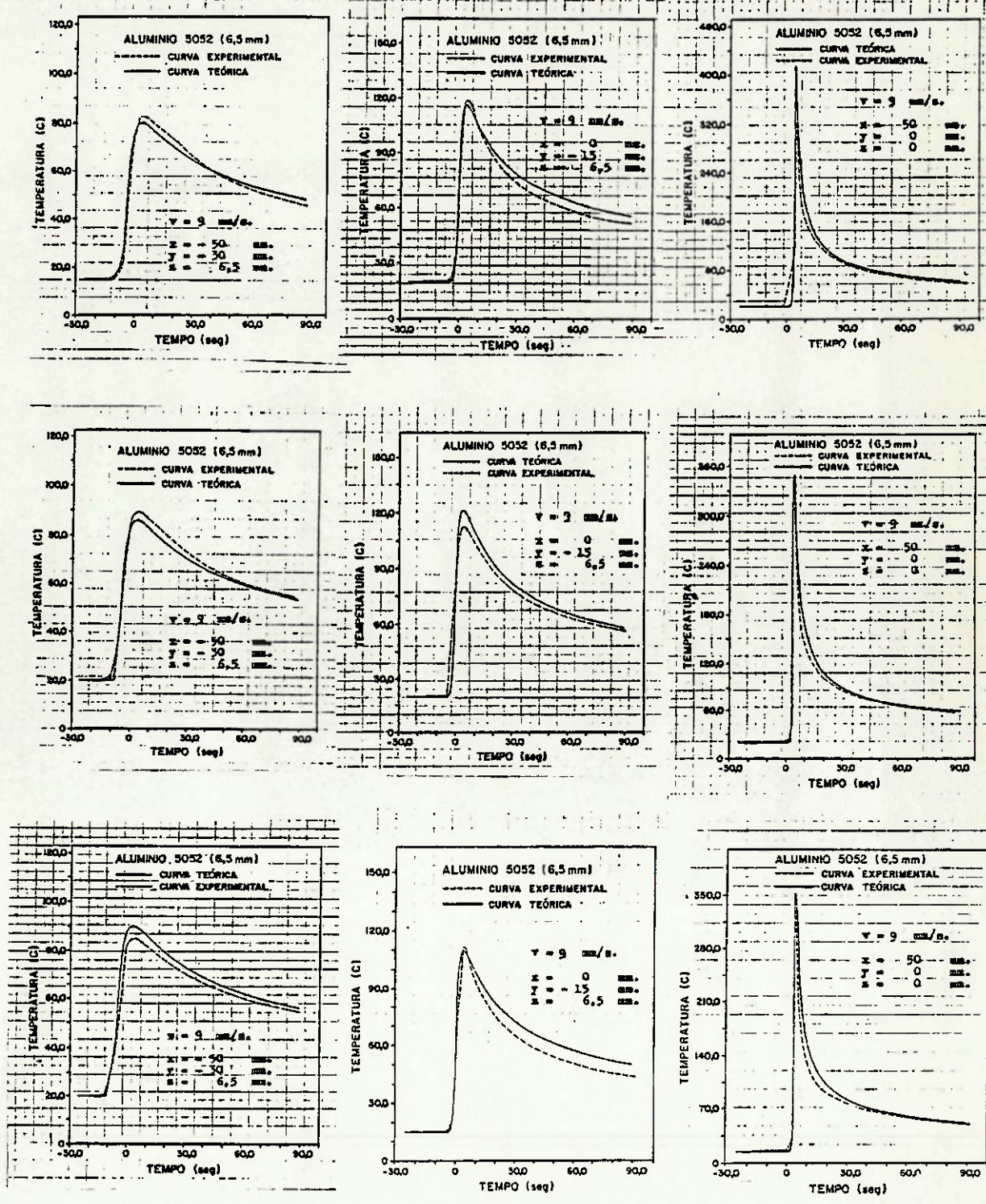


FIGURA 7.13-SUPERPOSIÇÃO DAS CURVAS TEÓRICA E EXPERIMENTAL DE DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA, OBTIDAS PARA UMA CHAPA DE ALUMÍNIO-MAGNÉSIO DE 6,5mm, AQUECIDA POR UMA FONTE MOVIMENTANDO-SE A 9,0mm/s

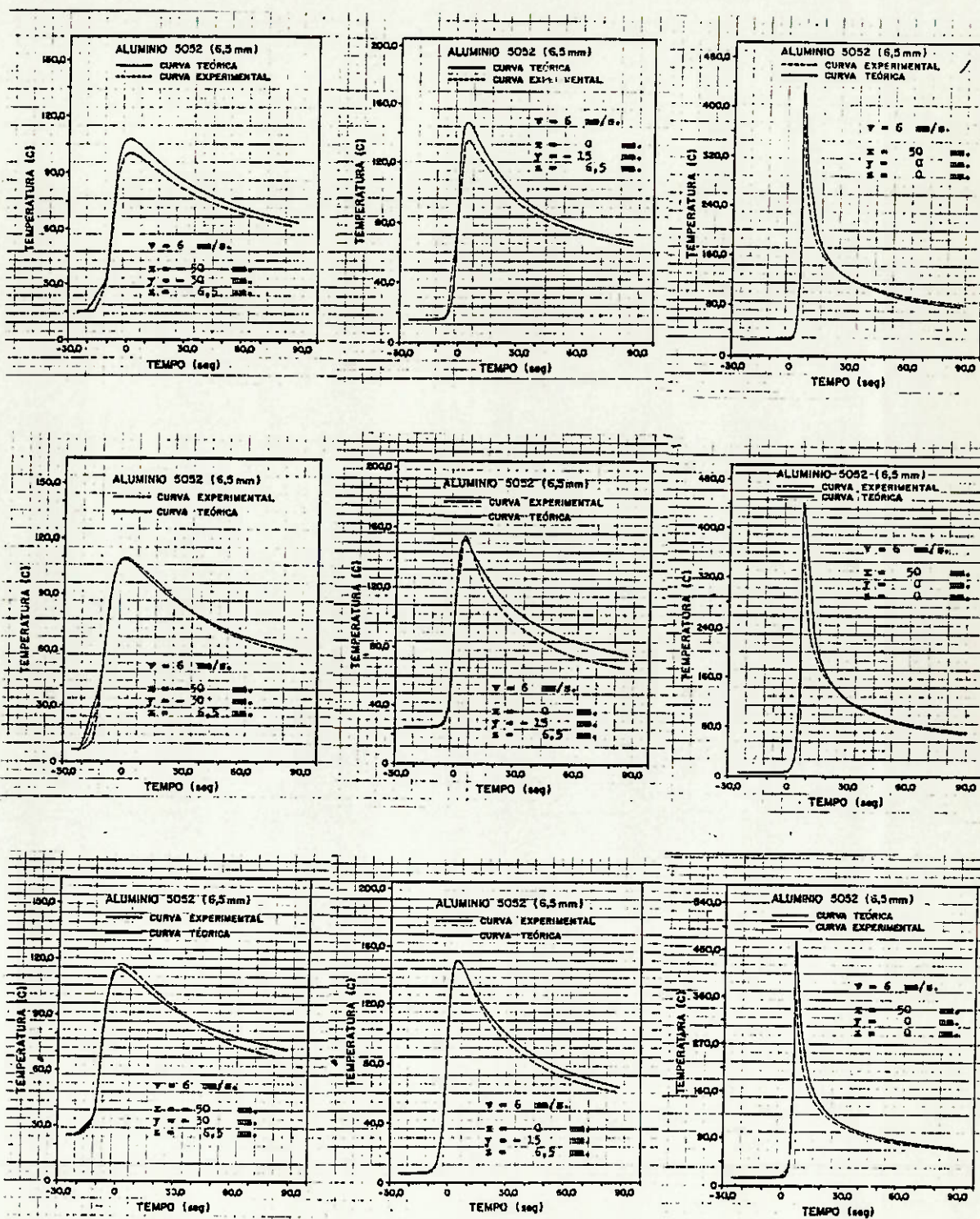


FIGURA 7.14-SUPERPOSIÇÃO DAS CURVAS TEÓRICA E EXPERIMENTAL DE DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA, OBTIDAS PARA UMA CHAPA DE ALUMÍNIO-MAGNÉSIO DE 6,5mm, AQUECIDA POR UMA FONTE MOVIMENTANDO-SE A 6,0mm/s

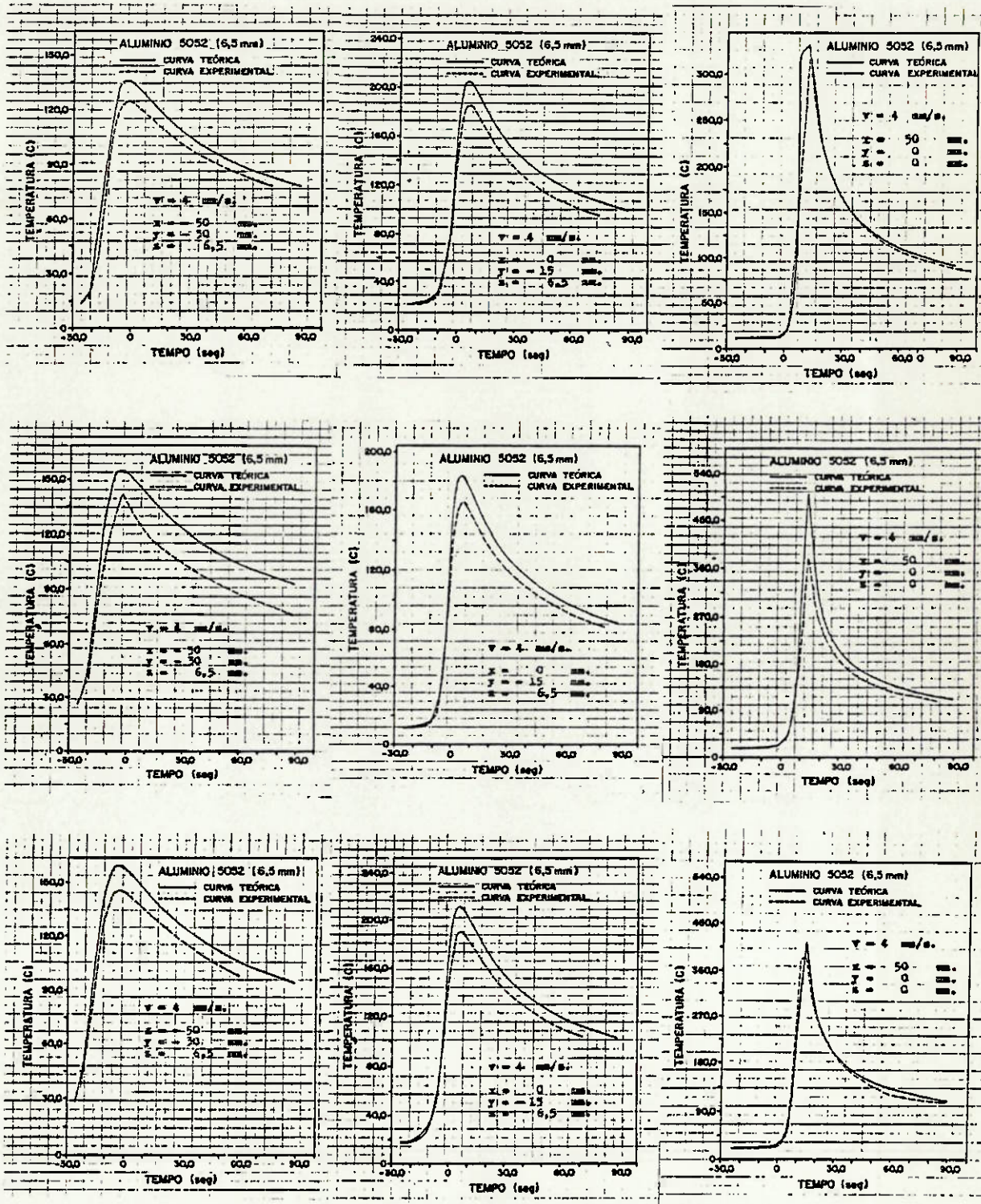


FIGURA 7.15-SUPERPOSIÇÃO DAS CURVAS TEÓRICA E EXPERIMENTAL DE DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA, OBTIDAS PARA UMA CHAPA DE ALUMÍNIO-MAGNÉSIO DE 3,5mm, AQUECIDA POR UMA FONTE MOVIMENTANDO-SE A 4,0mm/s

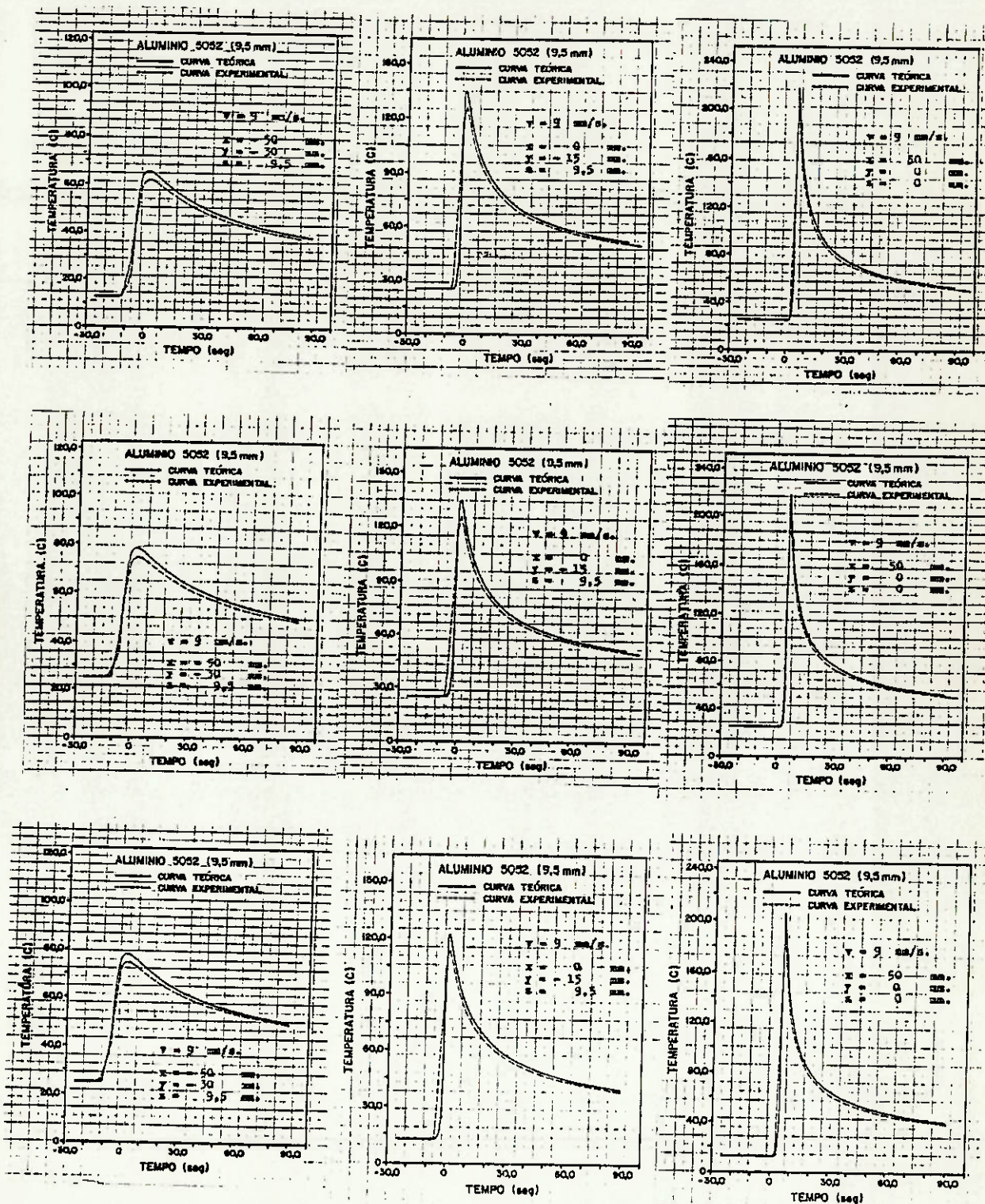


FIGURA 7.18-SUPERPOSIÇÃO DAS CURVAS TEÓRICA E EXPERIMENTAL DE DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA, OBTIDAS PARA UMA CHAPA DE ALUMÍNIO-MAGNÉSIO DE 9,5mm, AQUECIDA POR UMA FONTE MOVIMENTANDO-SE A 9,0mm/s

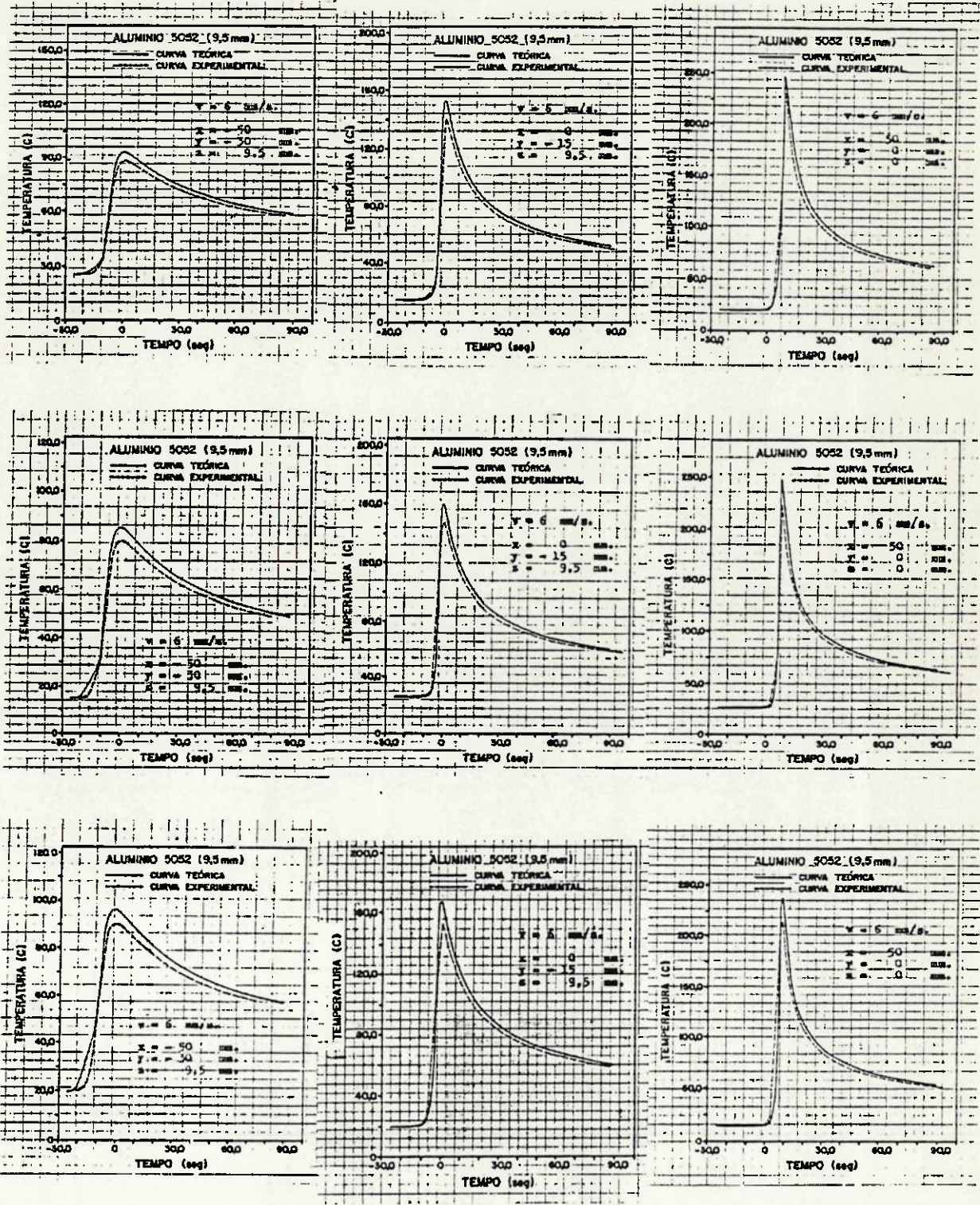


FIGURA 7.17-SUPERPOSIÇÃO DAS CURVAS TEÓRICA E EXPERIMENTAL DE DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA, OBTIDAS PARA UMA CHAPA DE ALUMÍNIO-MAGNÉSIO DE 9,5mm, AQUECIDA POR UMA FONTE MOVIMENTANDO-SE A 6,0mm/s

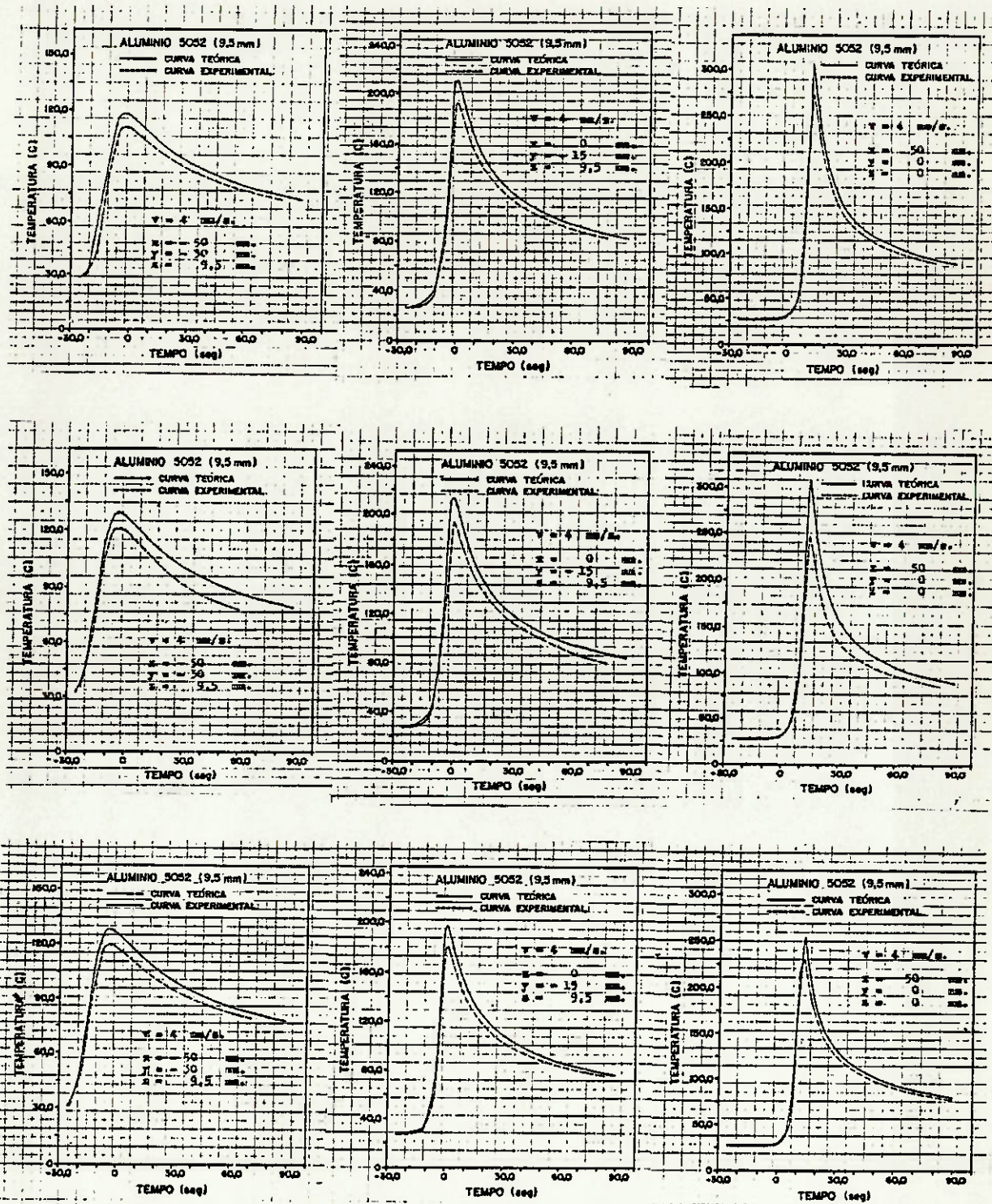


FIGURA 7.18-SUPERPOSIÇÃO DAS CURVAS TEÓRICA E EXPERIMENTAL DE DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA, OBTIDAS PARA UMA CHAPA DE ALUMÍNIO-MAGNÉSIO DE 9,5mm, AQUECIDA POR UMA FONTE MOVIMENTANDO-SE A 4,0mm/s

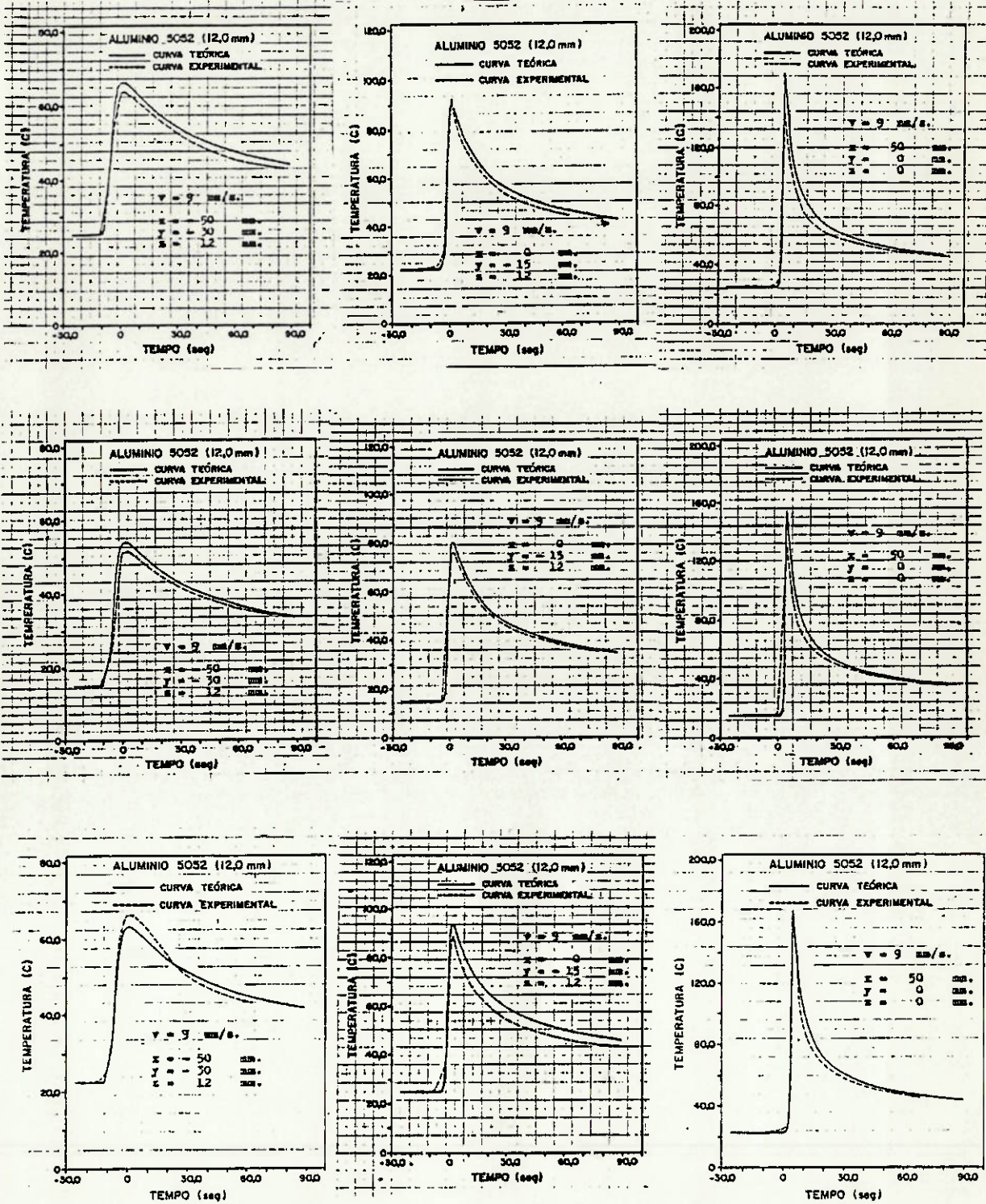


FIGURA 7.19-SUPERPOSIÇÃO DAS CURVAS TEÓRICA E EXPERIMENTAL DE DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA, OBTIDAS PARA UMA CHAPA DE ALUMÍNIO-MAGNÉSIO DE 12,0mm, AQUECIDA POR UMA FONTE MOVIMENTANDO-SE A 9,0mm/s

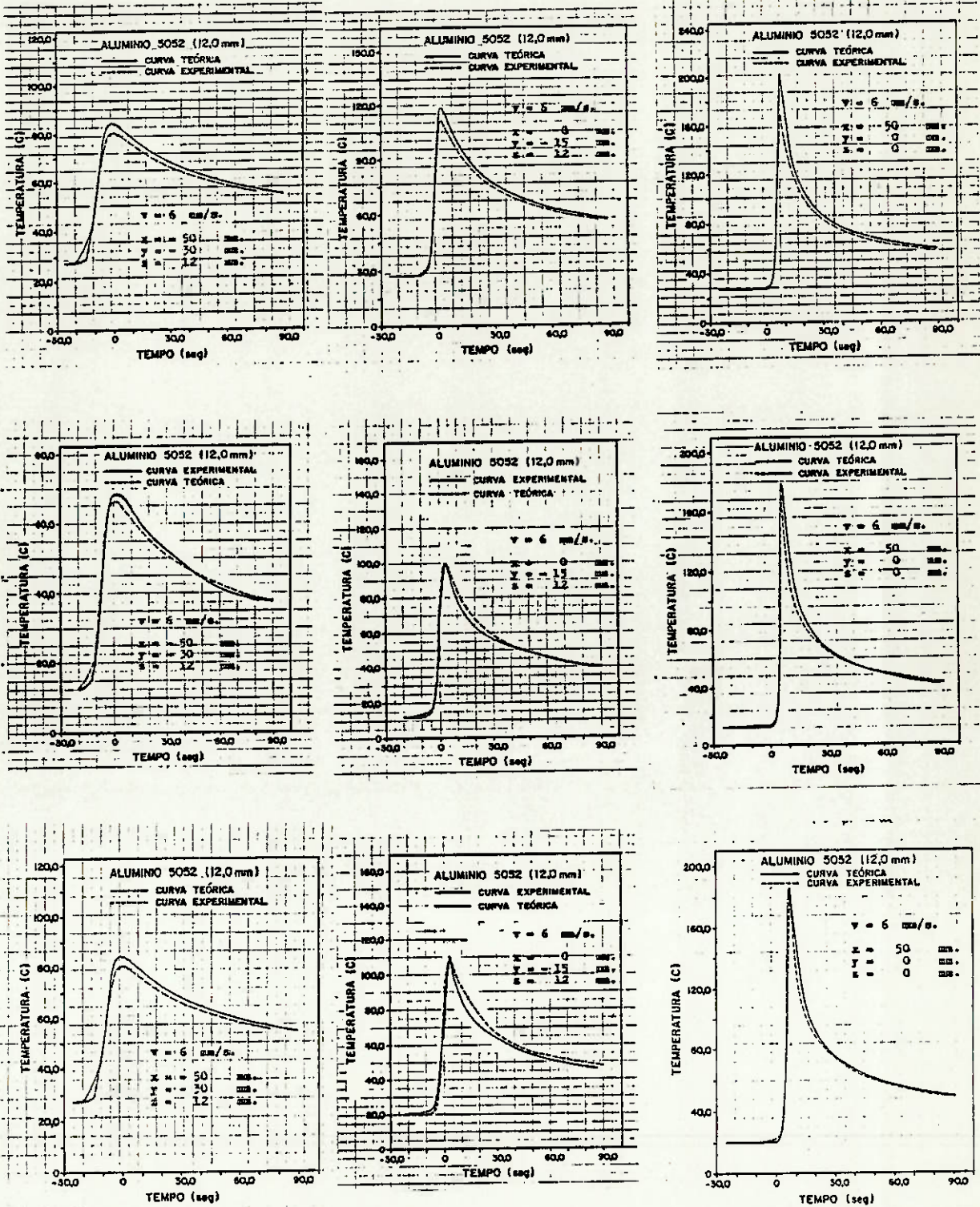


FIGURA 7.20-SUPERPOSIÇÃO DAS CURVAS TEÓRICA E EXPERIMENTAL DE DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA, OBTIDAS PARA UMA CHAPA DE ALUMÍNIO-MAGNÉSIO DE 12,0mm, AQUECIDA POR UMA FONTE MOVIMENTANDO-SE A 6,0mm/s

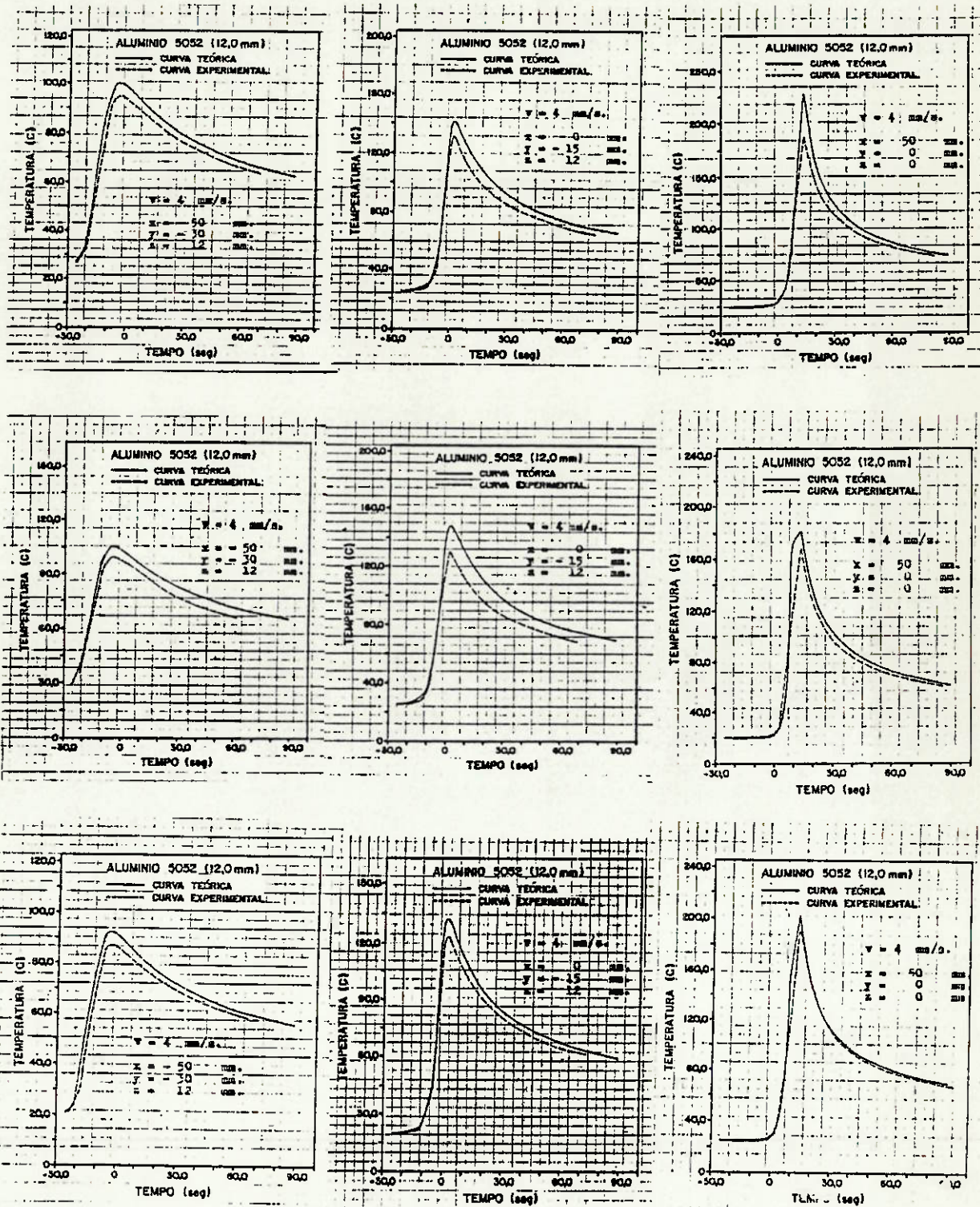


FIGURA 7.21-SUPERPOSIÇÃO DAS CURVAS TEÓRICA E EXPERIMENTAL DE DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA, OBTIDAS PARA UMA CHAPA DE ALUMÍNIO-MAGNÉSIO DE 12,0mm, AQUECIDA POR UMA FONTE MOVIMENTANDO-SE A 4,0mm/s

variação da condutibilidade térmica do material e dos coeficientes de transferência de calor ao meio circundante pelos fenômenos de convecção e radiação (foram admitidas condições adiabáticas).

7.2 - CONCLUSÕES

Apesar das hipóteses iniciais, pode-se concluir que o modelo matemático apresentado é capaz de traduzir, com boa fidelidade, a distribuição não uniforme de temperaturas que se desenvolve em um corpo de espessura constante e finita, submetido a algum processo industrial com chama ou soldagem.

Para que isto fosse possível, a solução levou em consideração as perdas de calor ao meio circundante, a dependência linear da temperatura com a condutibilidade térmica e os efeitos da magnitude e concentração da fonte de calor.

Cabe destacar também que a clássica hipótese de assumir a fonte de calor como sendo puntiforme foi modificada e que as propriedades físicas dos materiais utilizados no transcurso das experiências foram apresentadas como dependentes da temperatura.

7.3 - SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Embora a presente dissertação haja permitido extrair inúmeros resultados que traduzem com boa fidelidade as distribuições de temperaturas num corpo, futuros trabalhos poderiam ser abordados, tais como:

1. Adotar uma solução de distribuição de temperaturas que leve em consideração as variações na espessura do corpo, a dependência das perdas de calor com a temperatura, ou as transformações de fase do corpo.
2. Adotar uma solução numérica ao problema de fluxo de calor em um corpo (método dos elementos finitos).

3. Efetuar outras análises experimentais para comprovação ou mesmo calibração do modelo matemático proposto (extrapolado a outros materiais como por exemplo: latão, cobre e outros).

BIBLIOGRAFIA

1. NIKULIN, J.G. Distribuição de temperaturas nos processos de soldagem e operações com chama. Seminário, Universidade de São Paulo, EPUSP, 1983.
2. PAPAZOGLU, V.J. Analytical techniques for determining temperatures, thermal strains and residual stresses during welding. Tese de doutoramento, Massachusetts Institute of Technology, maio 1981.
3. HILDEBRAND, F.B. Advanced calculus for applications. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1962.
4. TANIGUCHI, C. Análise do mecanismo de deformações elasto-plásticas no processo de conformação à chama. Tese de doutoramento, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1974.
5. TANIGUCHI, C. Análise de problemas elasto-plásticos na engenharia de soldagem. Apostilha do curso de pós-graduação PNV-744, Departamento de Engenharia Naval da EPUSP.
6. TANIGUCHI, C. Princípios de engenharia de soldagem. Apostilha do curso de pós-graduação PNV-741, Departamento de Engenharia Naval da EPUSP.
7. TANIGUCHI, C. Determinação experimental do insumo de calor nos processos à chama oxiacetilênica. Departamento de Engenharia Naval da EPUSP.
8. TANIGUCHI, C. & GONÇALVES, E. Metodologia do processo de conformação à chama. V Congresso Nacional de Transportes Marítimos e Construção Naval, Rio de Janeiro, 1974.

9. RYKALIN, N.N. Calcul des processus thermiques de soudage. Soudage et Techniques Conneves, vol. 13, pg. 5-38, 1961.
10. ROSENTHAL, D. Mathematical theory of heat distribution during welding and cutting. Welding Journal, 20(5), pg. 220s-234s, 1941.
11. ROSENTHAL, D. The theory of moving sources of heat and its application to metal treatments. Transactions ASME, pg. 849-866, nov 1946.
12. METALS HANDBOOK. Properties and selection of metals. American Society for Metals, vol. 1, 8th edition.
13. METALS HANDBOOK. Properties and selection nonferrous alloys and pure metals. American Society for Metals, vol. 2, 9th edition.
14. SARABIA, J.C. Análise experimental da distribuição de temperaturas em chapas de aço aquecidas por fonte de calor móvel. Tese de mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1980.
15. ABRAMOWITZ, M. and STEGUN, I.A. Handbook of mathematical functions. National Bureau of Standards, 1970.
16. LARSEN, H.D. Rinchart mathematical tables, formulas and curves. Holt, Rinchart and Winston, March 1953.
17. SILVA, R.F. Manual de termodinâmica, transmissão de calor. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 5^a edição, 1972.

18. SCHNEIDER, P.J. Conduction heat transfer. Addison Wesley Publishing Company, Inc., Massachusetts, 2^a edição, 1957.
19. BERNARD, P. & GADEAU, R. Procesos de conformado del aluminio y sus aleaciones II. Enciclopédia del Aluminio, vol. 5, Ediciones Urno, S.A., España-Bilbao.
20. KALED, A.H., BELLACOSA, B., CAVALLINI, C., CHENG, A.K., CRUZ, J.M.de S., SILVA, J.M.B.P. & WALDOGEL, T.C. Laminação do alumínio à quente à frio e de folhas. Seminário, Departamento de Engenharia Metalúrgica da EPUSP, 1982.
21. KENT, R. Aluminum, properties, physical metallurgy and phase diagrams. American Society for Metals, Ohio, 1967.
22. MACHADO, G. Programa de computador para estima de temperaturas máximas e velocidades de resfriamento na zona termicamente afetada de uma solda - Programa TEMPER. Ministério da Marinha, Escritório Técnico de Construção Naval em São Paulo, Estudo Técnico nº 0418/1982, São Paulo, 1982.
23. MACHADO, G. Análise do desenvolvimento das tensões residuais longitudinais na soldagem a topo de chapas finas. Tese de mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1979.
24. HOLMAN, J.P. Experimental methods for engineers. International Student Edition, 2^a edition, chapter 8, pg. 237-285, 1966.

25. WELDING. Welding kaiser aluminum. Kaiser Aluminum & Chemical Sales, Inc., 1th edition, Oakland, California, 1967.
26. GULHÁEV, A.P. Metais e suas ligas. Editora Mir Moscovo, tomo 2, capítulo XXVI, pg. 260-294, URSS, 1981.
27. LANCKER, E.M.van. Metallurgy of aluminium alloys. Chapter XII, pg. 283-326, 1967.
28. HORN, K.R.van. Aluminum. Vol. I, 1967.
29. HORN, K.R.van. Design and application. Aluminum, vol. II, 1967.
30. HORN, K.R.van. Fabrication and finishing. Aluminum, vol. III, 1967.
31. AMBROZIO, F.F. Estruturas das ligas eutéticas. Tese de doutoramento, EPUSP, 1977.
32. PADILHA, A.F. Competição entre recuperação e recristalização em uma liga de alumínio contendo dispersão de precipitados. Tese de mestrado, EPUSP, 1977.
33. WEST, E.G. The welding of non-ferrous metals. First Published, Chapter II, pg. 7-32, London, 1951.
34. BAKER, R.G. Proceeding of the select conference of weldable Al-Zn-Mg alloys. The Welding Institute, Abington Hall, Cambridge, pg. 1-56, 1970.
35. RICHTER, Z. Welding of Al-Mg.Si alloys for repairs, with special regard to the fatigue strength of the weld. Report of 1959, Public Sesscion of the International Institute of Welding Opatija, Yugoslavia.

36. _____. Inert-gas arc welding. Institute of Welding, chapter 8, pg. 25-34, 1966.
37. QUITES, A.M. & DUTRA, J.C. Tecnologia da soldagem a arco voltaico. pg. 231-243, 1979.
38. TOULOUKIAN, Y.S. Thermo physical properties of high temperature solid materials. Nonferrous Alloys, vol.2, Part I e II, 1967.
39. ALCAN DO BRASIL. Ligas de extrusão. Folheto de Especificações, Brasil, abril de 1972.
40. MASUBUCHI, K. Analysis of welded structures. International Series of Materials Science and Technology, vol. 33, chapter 2, pg. 60-87, 1980.
41. CHRISTENSEN, N., DAVIS, V.L. & GJERMAUNSEN, K. Distribution of temperatures in arc welding. British Welding Journal, 12(2), pg.54-75, 1965.
42. THE LINCOLN ELECTRIC COMPANY. The procedure handbook of arc welding. 12th edition, 1973.
43. TOULOUKIAN, Y.S., POWELL, R.W., HO, C.Y. & KLEMENS, P.G. Thermal conductivity metallic elements and alloys. Thermophysical Properties of Matter the TPRC Data Series, vol. 1, 1969.
44. METAL HANDBOOK. Properties and selection : Irons and steel. vol. 1, 9th edition, 1978.

45. TOULOUKIAN, Y.S. & BUYCO, E.H. Specific heat metallic elements and alloys. Thermophysical Properties of Matter, Vol. 4, pg. 1-5 e 511-516, 1970.
46. TOULOUKIAN, Y.S., POWELL, R.W., HO, C.Y. & NICOLAOU, M.C. Thermal diffusivity. Thermophysical Properties of Matter, vol. 10, pg. 2-6, 224-225 e 270-283, 1973.
47. TOULOUKIAN, Y.S. KIRBY, R.K., TAYLOR, R.E. & DESAI, P.D. Thermal expansion metallic elements and alloys. Thermophysical Properties of Matter, vol. 12, pg. 2-12, 630-672 e 1006-1056, 1975.

APÊNDICE I

LISTAGEM DO PROGRAMA E SIMBOLOGIA USADA

A listagem completa do programa "DISTEMP" desenvolvido neste trabalho e a simbologia usada, são expostos nas páginas seguintes. Uma série de comentários têm sido inseridos nele, com o propósito de facilitar seu entendimento ao leitor.

CALOR PARA PROCESSOS DE OPERACAO COM CHAMA
(L/CM,CP)

EFF = RENDIMENTO TERMICO DA CHAMA
PESP = PESO ESPECIFICO DO GAS COMBUSTIVEL A
TEMPERATURA DE UTILIZACAO (G/L)
AMOL = MOLECULA GRAMA DO GAS COMBUSTIVEL (G)

CKO = VALOR DA CONDUTIBILIDADE TERMICA DO MATERIAL
PARA A TEMPERATURA DE ZERO GRAUS CELSIUS
(CAL/SEG.MM.C)
C = COEFICIENTE DE VARIACAO DA CONDUTIBILIDADE DO
MATERIAL
ALPHA = DIFUSIVIDADE TERMICA DO MATERIAL (MM.MM/SEG)
H1 = VALOR MEDIO DO COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE
CALOR AO MEIO CIRCUNDANTE, PELOS FENOMENOS
DE CONVECCAO E RADIACAO, NA SUPERFICIE
SUPERIOR DO CORPO (Z=H) (CAL/SEG.MM.MM.C)
H2 = VALOR MEDIO DO COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE
CALOR AO MEIO CIRCUNDANTE, PELOS FENOMENOS
DE CONVECCAO E RADIACAO, NA SUPERFICIE
INFERIOR DO CORPO (Z=0) (CAL/SEG.MM.MM.C)

HH = ESPESURA DO CORPO A SER PROCESSADO COM CHAMA
OU SOLDADO (MM)
TO = TEMPERATURA INICIAL DO CORPO A SER PROCESSADO
COM CHAMA OU SOLDADO (C)
TE = TEMPERATURA DO MEIO AMBIENTE (C)
TLC = TEMPERATURA DE FUSAO DO MATERIAL A SER
PROCESSADO COM CHAMA OU SOLDADO (C)
JNN = NUMERO DE PONTOS "X,Y,Z" A SEREM ESTUDADOS
KCCN = NUMERO (N) DE TERMOS PARA QUE A SERIE QUE
CALCULA OS COEFICIENTE "CN" CONVERJA
(MAXIMO PERMISSIVEL PCOM=100)
NOUT = NUMERO DE TERMOS PARA QUE A SERIE SOLUCAO,
DA REGIAO DENOMINADA EXTERNA, CONVERJA
(MAXIMO PERMISSIVEL, NOUT=100)
MINT = NUMERO DE TERMOS PARA QUE A SERIE SOLUCAO,
DA REGIAO DENOMINADA INTERNA, CONVERJA
(MAXIMO PERMISSIVEL, MINT=100)

XNLI = COORDENADA CARTESIANA "X" DOS PONTOS A SEREM
ESTUDADOS (MM)
YNLI = COORDENADA CARTESIANA "Y" DOS PONTOS A SEREM
ESTUDADOS (MM)
ZNLI = COORDENADA CARTESIANA "Z" DOS PONTOS A SEREM
ESTUDADOS (MM)

ISTOP = VARIAVEL DE DECISAO:
I = SE FOR O ULTIMO TEMPO A SER FORNECIDO
TM = INSTANTE DE TEMPO NO QUAL SERAO ESTIPADAS AS
TEMPERATURAS NOS PONTOS "X,Y,Z" JADOS
(SEG)

- 9.
10.
11.
12.
13.
14.
15.
16.
17.
18.
19.
20.
21.
22.
23.
24.
25.
26.

SIMBOLOGIA USADA NO PROGRAMA "DISTEMP".

1. ANAPL(I) = NOMI DO PROGRAMA
2. IVERF = VARIAVEL DE DECISAO:
I = VERIFICA DADOS DE ENTRADA (II)
3. IGRAP = VARIAVEL DE DECISAO:
I = GRAFICA PARA CADA PONTO DE COORDENADAS
"X,Y,Z" DADO, TEMPERATURA VS. TEMPO (II)
4. N6 = ESPECIFICA O NUMERO DE COLUNAS DO GRAFICO (III):
N6 = 0, 60 COLUNAS
N6 = 1, 90 COLUNAS
N6 = 2, 100 COLUNAS
N6 = 3, 120 COLUNAS
5. ABS(I) = VETOR DE COMPRIMENTO 4, QUE ESPECIFICA
MINIMOS E MAXIMOS DOS EIXOS DAS ABCISSAS
E DAS ORDENADAS (AF10.4).
TEM-SE : ABS(1) = MIN NO EIXO DAS ABCISSAS
ABS(2) = MAX NO EIXO DAS ABCISSAS
ABS(3) = MIN NO EIXO DAS ORDENADAS
ABS(4) = MAX NO EIXO DAS ORDENADAS
OBS : O PROGRAMA CALCULA OS MAXIMOS E MINIMOS
DOS EIXOS, SE AMBOS MAXIMOS E MINIMOS
NAO FOREM DECLARADOS.

6. LLLL(I) = VARIAVEL DE DECISAO:
0 = SOLDAGEM
1 = OPERACAO COM CHAMA
7. SOLDACEM :
AV = VOLTAZEN DO ARCO (VOLTS)
AI = CORRENTE DO ARCO (AMPERES)
V = VELOCIDADE DE AVANCO DO ARCO (MM/SEG)
CCIC = COEFICIENTE DE CONCENTRACAO DA INTENSIDADE
CALOR PARA PROCESSOS DE SOLDAGEM
(L/CM.CM)
EFF = EFICIENCIA DO ARCO
8. OPERACAO COM CHAMA :

AV = VAZAO DO GAS COMBUSTIVEL (L/H)
AI = CALOR RESULTANTE DA COMBUSTAO PRIMARIA DO GAS
COMBUSTIVEL, POR MOLECULA GRAMA DE GAS,
SEGUNDO A EQUACAO ESTEQUIOMETRICA
(CAL/G.POL)
V = VELOCIDADE DE AVANCO DO MACRICO (MM/SEG)
CCIC = COEFICIENTE DE CONCENTRACAO DA INTENSIDADE DE

=====


```

100 C-RIIYUC
C
IF(LMAX.LE.20) GO TO 190
ZZERO=0.
JZERO=4.D+C3*VZER0B**2
C
DO 170 M=2,LMAX
  BETAZ=(CFLJAI(MS)+1.D+0072.D+00*VZER0B-1.D+00/4.D+00)*PI
  CNI02=8.E60*BETAZE
  CNT011=VZER0-1.D+00
  CAT022=7.D+00*UBZCF0-1.D+01
  CJT032=6.30*G1*WYZER0**2-9.E23+32*UBZLRO*3.779D+03
  CNI=6.449*UBZLRO**3-153855.*UBZLRO**2+1585743.*UBZLRO-6277217.
  CNT01=CHT011/CNT00
  CAT32=4.D+00*CNT011-CNT022/13.D+00*CNT00**3
  CNT03=3.20*31*CHT011*CNT032/(1.5D+01*CNT00**5)
  CNT04=6.40*31*CHT011*CNT1/(1.05D+02*CAT00**7)
  ZLFO(MS)=BETAZE-CNT01-CNT02-CNT03-CNT04
  CONTINUE
170 C
DC 195 J=1,LPAX
  DM(J)=ZERO(J)/RH
  CHN(J)=DSOPT(CONCJ)**2+PA6
  CONTINUE
190 C
=====
CALCULO DA INTEGRAL KA
=====
C
CALL KNC(N)*LMAX,P)
=====
CALCULO DO MAXIMO FLUXO DE CALOR
=====
C
IF(LLLL.EQ.C) GO TO 200
J=(AV*AI*PE*SP)/(CANOL*3.6D*J33)*EFF
GO TO 210
J=EFF*AV*AI*2.389D-01
C
CALL QMAX(G,RH,OC,CL,V,PINJ,CO)
C
CLVA=CL*V*RT
C
=====
CALCULO DOS COEFICIENTES GR
PARA AS SERIES SOLUCOES
=====
C
DO 0.D+00
  IF(HT.EQ.0..AND.H2.EG.0.) GO TO 220
  GO TO 221
C
200 CALL KHL5(CLVA*SINK)
C
CO=0/(2.D+00*CK0+CLVA*HH*BIKI*PIENT)
C
DO 280 MNCN=1,KMAX
  ZRO=ZET(MNCN)*RH
  CALL K0BES(ZRO,BIKO)
  CALL K1BES(ZRO,B2K1)
  CALL I0BES(ZRO,B1I0)
  CALL I1BES(ZRO,B1I1)
  BN=ZET(MNCN)*(B2K1+BIK0+B1I1+B1I0)
  V1=H2/CK0/HH(MNCN)**2
  V2=H2*V1/CK0
  V3=HH(MNCN)*HH
  V35=V1*(DS INCV3)**2
  CN1CN=5.D-01*H1*(1.D+00*V2)
  CN2CN=(1.D+00*V2)*DSIK(2.D+00*V3)/(4.D+00*HH(MNCN))
  CMCN=CN1CN+CN2CN+V35
  AN=BN*CMCN
  MNKO=CKO*HH(MNCN)
  SEND=DSIN(V3)
  COSE=DCOSEC(V3)
  SUM=0.
  DO 250 MCM=1,MCON
    CH2=CFN(MCM)**2
    MW1=CKO*CHN(MCM)
    RI=H2*LMN(MNCN)+CM2/HH(MNCN))*SEND
    R2=(CK0*CH2-H2**2/CK0)*COSE
    RMW=R1+R2
    SMN=CFN(MCM)*(MNKO*H2**2/MNKO)*SENO
    DM*HH1*(H1*H2)
    EN=MM1**2*H1*H2
    WM2=CFN(MCM)*HH
    WS=DM*CHN(MCM)*RH
    EX1=DEXP(LM2)
    EX2=1./EX1
    TMGH=(EX1-EX2)/(EX1+EX2)
    CALL J1BE(CMW3,B1J1)
    DNUMER=2.D+00*00*PCMCN)=DN(MCM)*(RHN+TMGH*SMH)
    VCH=CF2+HH(MNCN)**2
    DENOM I=VCH*B1J1*(DN+EM*TMGN)
    SUM=SUM+DNUMBER/DENOM1
    CONTINUE
  CC(MNCN)=SUM/AN
  CONTINUE
=====
LEITURA DA VARIÁVEL TEMPO, PARA O QUAL
AS TEMPERATURAS SERAO CALCULADAS
=====

```



```

C
UI1=DN(N)*RH
UI1=ZET(N)*RA10
UI2=ZET(N)*RH
C
CALL JOBES('UT',B1JO)
C
CALL JIBES('UI0',B3J1)
C
CALL JOBES('UI2',B5K0)
C
CALL JOBES('UI1',B4I0)
C
CALL JOBES('UI2',B5I0)
C
CKII=CC(N)*B5K0*B4I0/U5I0
OKJ=2-D*0*0*0*P(N)*B1JO
XNZ=CFM(N)*ZN(IC00)
XNH=CFM(N)*HH
XNZ=HM(N)*ZN(IC00)
SENOHZ=DSINC(HNZ)
COSEHZ=DCOS(HNZ)
EXXZ=EXP(XNZ)
SENHXZ=(EXXZ-1-D*00/EXXZ)/2-D*00
COSHXZ=(EXXZ+1-D*00/EXXZ)/2-D*00
EXH=EXP(XNH)
SEMHX=(EXXH-1-D*00/EXXH)/2-D*00
COSHX=(EXXH+1-D*00/EXXH)/2-D*00
FACT1=HZ*SEMHXZ*CKO*CHN(N)*COSHX
FACT2=CKO*CHN(N)*(H1+H2)*COSHX
FACT3=(CKO*CHN(N))*2*(H1*H2)*SEMHX
PWJHE=OKJ*FACT1
PZNDP=B3J1*2*(FACT2+FACT3)
PTERM=PWJHE/PDENOM
STERM=CKII*(H2*SENOHZ/HN(N)/CKO+COSEHZ)
ZUSUM=ZUSUM+PTERM+SIERM0
CONTINUE
370
C
EXP=1-D*00/DEXP(CLVXI)
UT=EXP*ZUSUM
C
C
C
CALCULO DAS TEMPERATURAS
C
C
C
C
C
C
IF(G.EQ.0.) GO TO 430
RAIZG=1-C*00*(2-D*00*G*UT)
IF(RAIZG.LI.0.) GO TO 450
TEMP(IC00)=10*(COSQRT(RAIZG))-1-D*00)/G
GO TO 440
TEMP(IC00)=T0*UT
430
440
IF(TEMP(IC00).GE.-11I0) TEMP(IC00)=11I0
VALOR(JOB,IC00)=TEMP(IC00)
C
C
C
C
C
C
*****
* * * IMPRESSAO DE RESULTADOS * * *
*****
IF(JNN.NE.1) GO TO 503
WRITE(6,600) TM,XN(IC00),YN(IC00),ZN(IC00),TEMP(IC00)
GO TO 460
IF(IC00.NE.1) GO TO 504
WRITE(6,602) TM,XN(IC00),YN(IC00),ZN(IC00),TEMP(IC00)
GO TO 460
IF(IC00.EQ.JNN) GO TO 507
WRITE(6,606) XN(IC00),YN(IC00),ZN(IC00),TEMP(IC00)
GO TO 460
WRITE(6,608) XN(IC00),YN(IC00),ZN(IC00),TEMP(IC00)
GO TO 460
WRITE(6,620) IC00,XN(IC00),YN(IC00),ZN(IC00)
CONTINUE
C
461
IF(ISTOP.NE.1) GO TO 290
IF(IVERF.EQ.1) GO TO 630
C
C
C
C
* * * REPRESENTACAO GRAFICA DOS RESULTADOS * * *
C
C
C
C
C
C
IF(IGRAF.EQ.0) GO TO 630
JOB=JOB
IS=JOB
JLI=VALOR(JOE-1)
IF(CULT.LI.VALOR(IS-1,1)) GO TO 4
GO TO 1
JLI=VALOR(IS-1,1)
C
DO 7 L=1,JNN+1
FIM(L)=VALOR(IS-1,L)
CONTINUE
C
DO 5 KK=IS-(JOE-1)
DO 5 LL=L,JNN+1
VALOR(KK,LL)=VALOR(KK+1,LL)
CONTINUE
C
DO 6 L=1,JNN+1
VALOR(JOE,L)=FIM(L)
CONTINUE
C
IS=IS-1
IF(IS.GT.1) GO TO 2
JOB=JOB-1
IF(JOE.GT.1) GO TO 3
DO 491 IC=1,JNN
XT=SNGL(XN(IC))
YT=SNGL(YN(IC))
ZT=SNGL(ZN(IC))
IF(H1.EQ.0.0..AND.H2.EQ.0.0.) GO TO 701

```

```

1547 29MMOS CUAIS SERAO CALCULADAS AS./
2156 12HTEMPERATURAS.//
314 46(1H-)/T42-1HI,T57-1HI,T72-1HI,T87-1HI//
4142 1HI,T48-6HX (MM),T57-1HI,T63-6NY (MM),T72-1HI,T75-61Z (MM),
5187 1HI,T736-52(1H-))
565 FORMAT(15,1HI,T42-1HI,T57-1HI,T72-1HI,T87-1HI,
1136,1HI,T42-1HI,T48-6HX (MM),T57-1HI,T63-6NY (MM),T72-1HI,
FORMAT(15,1HI,T42-1HI,T48-6HX (MM),T57-1HI,
1153,19(1H-))//
580 FORMAT(11,F9.4)
590 FORMAT(10, //T39,8HIEMPO = ,F10.4,1X,5H(SEG))//
591 FORMAT(10, //T39,8HIEMPO = ,F10.4,1X,5H(SEG))//
595 FORMAT(10, //T49,28HIDISTRIBUICAO DE TEMPERATURAS,T49,28(1H-)//
1/T27,75(1H-),/T27,1HI,T41,1HI,T56,1HI,T71,1HI,T86,1HI,T101,
21HI, //T27,1HI,T29,1HIEMPO (SEG),T41,1HI,T46-6HX (MM),T56-1HI,
3161,6HY (MM),T71,1HI,T76-6HZ (MM),T86,1HI,T92-5HT (C),T101,1HI,
4T27,75(1H-))//
600 FORMAT(12,1HI,T41,1HI,T56,1HI,T71,1HI,T86,1HI,T101,1HI,
1T27,1HI,T41,1HI,T46,1HI,T56,1HI,T71,1HI,T86,1HI,T101,1HI,
602 FORMAT(12,1HI,T41,1HI,T46,1HI,T56,1HI,T71,1HI,T86,1HI,T101,1HI,
1T27,1HI,T41,1HI,T46,1HI,T56,1HI,T71,1HI,T86,1HI,T101,1HI,
606 FORMAT(12,1HI,T41,1HI,T56,1HI,T71,1HI,T86,1HI,T101,1HI,
1T27,1HI,T41,1HI,T46,1HI,T56,1HI,T71,1HI,T86,1HI,T101,1HI,
608 FORMAT(12,1HI,T41,1HI,T56,1HI,T71,1HI,T86,1HI,T101,1HI,
1T27,1HI,T41,1HI,T46,1HI,T56,1HI,T71,1HI,T86,1HI,T101,1HI,
610 FORMAT(10, //T40,35HCONDICIONES PARA A OPERACAO COM CHAMA.//
2130,28HTEMPERATURA DE UTILIZACAO, ,16(1H-),1X,F12.5,6H (G/L),/
3130,13HVAZAO DO GAS ,29(1H-),1X,F12.5,7H (L/HR),/
4133,41HCALOR RESULTANTE DA COMBUSTAO PRIMARIA DO,
5130,38HCAL SECUNDO A EQUACAO ESTEQUIOMETRICA ,4(1H-),1X,F12.5,
612H (CAL/G.MOL),/
7130,32HVELOCIDADE FERICO DO PROCESSO ,10(1H-),1X,F12.5,5,
9(CM/SEG),/
8130,39HVELOCIDADE DE AVANCO DO FONTE DE CALOR ,3(1H-),1X,F12.5,9H
9(CM/SEG),/
9130,28HCOEFICIENTE DE CONCENTRACAO ,16(1H-),1X,F12.5,10H (1/CM.CH)
9, /
C130,22HMOLECULA GRAMA DE GAS ,20(1H-),1X,F12.5,4H (G),//
620 FORMAT(10, //T39,15,1H-),T310-4,1X,3(1H-),2X,15H(6AIZ NEGATIVA))
509 FORMAT(10, //15X,5HIEMPO,//
192 FORMAT(10, //10X,1L,3X,F9.4)
10HPONTO: X = ,F6,2,9H (MM) //
1 10H Y = ,F6,2,9H (MM) //
2 10H Z = ,F6,2,9H (MM) //
3 10H //
195 FORMAT(25HCONDICIONES ADIABATICAS //
1 10HPONTO: X = ,F6,2,9H (MM) //
2 10H Y = ,F6,2,9H (MM) //
3 10H Z = ,F6,2,9H (MM) //
702 FORMAT(25AI)
971 FORMAT(2F10.4)
C
C
630 CALL EXIT
END
C

```

```

REWIND (7)
WRITE(7,192) XT,YT,ZT
CO TO 705
REWIND (7)
WRITE(7,195) XT,YT,ZT
REWIND (7)
READ(7,702) ((HR(10,30),J0=1,25),I0=1,4)
C
DO 194 JR=1, JOR
A11(JR)=SNGL(VALOR(JR,1))
A22(JR,1)=SNGL(VALOR(JR,10+1))
CONTINUE
CALL DSEMH(CALL, A22, JOR, 1, A33, A4, 100, 6, N55, N6, NR)
CONTINUE
C
=====
FORMATOS DE LEITURA E IMPRESSAO
=====
C
470 FORMAT(11,F10.5)
473 FORMAT(3I1,4F10.4)
475 FORMAT(5E12.5)
480 FORMAT(4F10.4,4I3)
490 FORMAT(2I3F10.4)
500 FORMAT(3I1)
510 FORMAT(10, //T23,21(1H-),/T22,1H ,*,*,80X,*,*,
1122,1H ,*,*,80AI,*,*,/T22,1H ,*,*,80X,*,*,
2122,1H ,21(1H-),//128(1H-),//)
520 PROBLEMA DE CONDUCAO DE CALOR ,190,6(1H-),54H SOLUCAO ANALITICA DO P
2130-6H*****T90-6H*****/
3130-6(1H-),146-34H FONTE DE CALOR TRI-DIMENSIONAL ,T90,6(1H-),/
4130-6H*****T90-6H*****/
5133-6(1H-),T52,22H REGIME PERMANENTE ,T90,6(1H-),/
62(130-66(1H-),//)
530 FORMAT(10, //T40,21HCONDICIONES DE SOLDAGEM//
1130,35HVJLTAJEN DO ARCO ----- ,F12.5,8H (VOLTS),/
2130,35HCORRENTE DO ARCO ----- ,F12.5,10H (AMPERES),/
3130,35HVELOCIDADE DO ARCO ----- ,F12.5, /
4133,35HVELOCIDADE DE AVANCO DO ARCO ----- ,F12.5,9H (MM/SEG),/
5130,35HCOEFICIENTE DE CONCENTRACAO ----- ,F12.5,10H (1/CM/CM),//
540 FORMAT(10, //T40,33HPRPRIIDADES TERMICAS DO MATERIAL,//
115H (CAL/MM/SEG/C),/
2150,21HVELOCIDADE FERICA ,18(1H-),1X,F12.5,12H (MM.MM/SEG),/
3130,34HCOEFICIENTE DE CONVECCAO-SUPERIOR ,5(1H-),1X,E12.5,
518H (CAL/SEC/MM/HR/C),/
713H (CAL/SEC/MM/HR/C),/
8130,31HCOEFICIENTE DE CONVECCAO-INFERIOR ,5(1H-),1X,E12.5,
8130,31HCOEFICIENTE DE CONDUTIBILIDADE ,8(1H-),1X,E12.5,//
FORMAT(10, //T40,23HOUTROS DADOS FORNECIDOS,//
1130,22HTEMPERATURA DO MATERIAL ,17(1H-),1X,F12.5,5H (MM),/
2130,32HTEMPERATURA INICIAL DO MATERIAL ,7(1H-),1X,F12.5,4H (C),/
3130,33HTEMPERATURA DE FUSAO DO MATERIAL ,6(1H-),1X,F12.5,4H (C),/
4130,29HTEMPERATURA DO FEIO AMEINTE ,10(1H-),1X,F12.5,4H (C),/
FORMAT(10, //T42,40H*** COORDENADAS (X,Y,Z) DOS PUNTOS ****)
560

```

```

C      SUBROUTINE CHEGA(A,B,HESP,KMAX,NN)
C
C      *****
C      * ESTA SUB-ROUINA CALCULA OS VALORES *
C      * CARACTERISTICOS (AUTOVALORES), "HN" *
C      * *****
C
C      IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,D-Z)
C      REAL R
C      DIMENSION NC(100)
C
C      PI=4.0*(6.0)*DATAN(1.0+0.0)
C      R=2.0*0.0*0.0*ASCRT(E/A)/PI
C      I=FIXCR)+1
C      IF(I.NE.1) GO TO 5
C      A=0
C      PRZL=(DFLOAT(I)-1.0+0.0)*PI/2.0+0.0
C      FINZL=(DFLOAT(I))*PI/2.0+0.0
C      COMECO=PRZL-PI/2.0+0.0
C      FIN=FINZL
C
C      CALL RAIZ(PRZL,COMECO,FIN,U)
C
C      HNC(1)=U/HESP
C      K=KMAX-1
C
C      DO 30 J=1,K
C      PRZL=(DFLOAT(J)+2.0+0.0)*PI/2.0+0.0
C      FINZL=(DFLOAT(J))-1.0+0.0)*PI/2.0+0.0
C      COMECO=PRZL-PI/2.0+0.0
C      FIN=FINZL
C
C      CALL RAIZ(PRZL,COMECO,FIN,U)
C
C      HNC(J)=U/HESP
C      CONTINUE
C
C      GO TO 100
C
C      IF(I.NE.2) GO TO 40
C      A=0
C      PRZL=(DFLOAT(I)-1.0+0.0)*PI/2.0+0.0
C      FINZL=(DFLOAT(I))*PI/2.0+0.0
C      COMECO=PRZL
C      FIN=FINZL+PI/2.0+0.0
C
C      CALL RAIZ(PRZL,COMECO,FIN,U)
C
C      HNC(M)=U/HESP
C      IF(M.GE.KMAX) GO TO 100
C      K=KMAX-1/2
C
C      DO 10 N=1,K
C      PRZL=(DFLOAT(N)/2.0+0.0)*PI
C      FINZL=(DFLOAT(N)+2.0+0.0)*PI/2.0+0.0
C      COMECO=PRZL-PI/2.0+0.0
C      FIN=FINZL
C
C      CALL RAIZ(PRZL,COMECO,FIN,U)
C
C      HNC(N)=U/HESP
C      CONTINUE
C
C      GO TO 100

```

```

COMECO=PRZL-PI/2.0+0.0
FIN=FINZL
CALL RAIZ(PRZL,COMECO,FIN,U)
M=J+1
HNC(M)=U/HESP
CONTINUE
GO TO 100
IF(I.EQ.IMP4R) GO TO 90
IF(I.EQ.NPAR) GO TO 20
IMP4R=IMP4R+2
NPAR=NPAR+2
GO TO 45
X=0
KMAXH=KMAX+2+2
IF(I.GE.KMAXH) GO TO 70
DO 50 J=4,I/2
PRZL=(DFLOAT(J)-3.0+0.0)*PI/2.0+0.0
FINZL=(DFLOAT(J))-2.0+0.0)*PI/2.0+0.0
COMECO=PRZL
FIN=FINZL+PI/2.0+0.0
CALL RAIZ(PRZL,COMECO,FIN,U)
M=(J-2)/2
HNC(M)=U/HESP
CONTINUE
IF(M.GE.KMAX) GO TO 100
PRZL=(DFLOAT(I)-1.0+0.0)*PI/2.0+0.0
FINZL=(DFLOAT(I))*PI/2.0+0.0
COMECO=PRZL
FIN=FINZL+PI/2.0+0.0
CALL RAIZ(PRZL,COMECO,FIN,U)
M=I/2
HNC(M)=U/HESP
IF(M.GE.KMAX) GO TO 100
K=KMAX-1/2
DO 10 N=1,K
PRZL=(DFLOAT(N)/2.0+0.0)*PI
FINZL=(DFLOAT(N)+2.0+0.0)*PI/2.0+0.0
COMECO=PRZL-PI/2.0+0.0
FIN=FINZL
CALL RAIZ(PRZL,COMECO,FIN,U)
HNC(N)=U/HESP
CONTINUE
GO TO 100

```



```

C      REAL FUNCTION FNY=3(CAAAAA,BBBBB,CCCCC)
C
C      IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
C      COMMON/S2/GC
C      REXP=-QC+AAAAA=2/BBBBB**2
C      FNY=AAAAA*CCCCC*DEXP(REXP)
C      RETURN
C      END
C
C      BLOCK DATA
C
C      * ESTE BLOCO DATA, CONTEM OS VINHE PRIMEIROS *
C      * VALORES ZERO DA FUNCAO DE BESSEL DE *
C      * PRIMEIRA ESPECIE E ORDEN ZERO, *
C      * (AUTOSVALORES) "DN" *
C      * *****
C      IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
C      COMMON/S1/ZERO(100)
C      DATA ZERO/2.404825577,5.5200781103,8.6537279129,11.7915344391,14
C      1.9309177086,18.0710639679,21.21163365299,24.3524715108,27.493479132
C      2.30,6346064484,33.7758202136,36.9170983537,40.0584257646,43.194791
C      37832.46,-3411883717.49,4826098974.52,6240518411.55,765510755.58,906
C      49839261.62,0.004691902,80*0.0*007
C      END
C
C

```

APÊNDICE II

MANUAL DO USUÁRIO DO PROGRAMA "DISTEMP"

Neste apêndice descreve-se a seqüência em que se processam os dados de entrada do programa, especificando os seus respectivos formatos.

1º cartão (formato 80 A1).

coluna 1 - 80 : Escreva o nome, especificação ou identificação dada ao programa.

2º cartão (formato 2 I1).

coluna 1 : Coloque o número 1 (um), se for verificar os dados de entrada. Se não deixe em branco.

coluna 2 : Coloque o número 1 (um), se deseja que o computador entregue os gráficos temperatura vs tempo. Se não deixe em branco.

3º cartão (formato I1, 8 F10.5).

(a) Se o processo for soldagem, este cartão deve ser preenchido da seguinte forma:

coluna 1 : Deixe em branco.

coluna 2 - 11 : Voltagem do arco em volts.

coluna 12 - 21 : Corrente do arco em ampères.

coluna 22 - 31 : Velocidade do avanço do arco em mm/seg.

coluna 32 - 41 : Coeficiente de concentração da intensidade de calor em 1/cm./cm. (tabelas 2.3 e 5.2).

coluna 42 - 51 : Eficiência do arco (tabelas 2.2 e 5.2).

(b) Se o processo for operação com chama, este cartão será completado assim:

- coluna 1 : Por o número 1 (um).
- coluna 2 - 11 : Vazão de gás combustível em l/h.
- coluna 12 - 21 : Valor do calor resultante da com
bustão primária, por molécula gra
ma de gás, segundo a equação estequi
ométrica em cal/g/mol.
- coluna 22 - 31 : Velocidade de avanço do maçarico
em mm/seg.
- coluna 32 - 41 : Coeficiente de concentração da in
tensidade de calor para processos
de operação com chama em l/cm/cm.
(tabela 2.4).
- coluna 42 - 51 : Rendimento térmico da chama. (ta
bela 2.1 e gráfico 2.1 e 2.2).
- coluna 52 - 61 : Peso específico do gás combustível
à temperatura de utilização em g/l.
- coluna 62 - 71 : Molécula grama de gás combustível
em g.

4º cartão (formato 5 E12.5).

- coluna 1 - 12 : Valor da condutividade térmica do
material em cal/s/mm/C.
- coluna 13 - 24 : Coeficiente de variação da condu
tividade térmica do material.
- coluna 25 - 36 : Difusividade térmica do material
em mm.mm/s.
- coluna 37 - 48 : Valor médio do coeficiente de trans
ferência de calor ao meio circun
dante, pelos fenômenos de radiação

e convecção, na superfície superior do corpo em cal/s/mm/mm/ C.

coluna 49 - 60 : Valor médio do coeficiente de transferência de calor ao meio circundante, pelos fenômenos de convecção e radiação, na superfície inferior do corpo em cal/s/mm/mm/ C.

5º cartão (formato 4 F10.4, I3).

coluna 1 - 10 : Espessura do corpo em mm.

coluna 11 - 20 : Temperatura inicial do corpo em C.

coluna 21 - 30 : Temperatura do meio ambiente em C.

coluna 31 - 40 : Temperatura de fusão do material em C.

coluna 41 - 50 : Número de pontos "x,y,z" a serem estudados.

6º cartão (formato 2 | 3 F10.4|).

coluna 1 - 10 : Coordenada cartesiana "x" do primeiro ponto em mm.

coluna 11 - 20 : Coordenada cartesiana "y" do primeiro ponto em mm.

coluna 21 - 30 : Coordenada cartesiana "z" do primeiro ponto em mm.

coluna 31 - 40 : Coordenada cartesiana "x" do segundo ponto em mm.

coluna 41 - 50 : Coordenada cartesiana "y" do segundo ponto em mm.

coluna 51 - 60 : Coordenada cartesiana "z" do segundo ponto em mm.

O sexto (6º) cartão será repetido quantas vezes for necessário, até que sejam fornecidos ao computador todas as coordenadas "x,y,z" dos pontos, onde as temperaturas serão estimadas.

7º cartão (formato II, F9.4).

coluna 1 : Coloque o número 1 (um), se for o último tempo a ser lido pelo computador. Se não deixe em branco.

coluna 2 - 10 : Instante de tempo no qual serão estimadas as temperaturas para os pontos de coordenadas "x,y,z". Velores em seg.

O sétimo (7º) cartão será repetido tantas vezes quanto instantes de tempo se tiverem.

Um esquema da ordenação dos cartões de leitura exhibe-se na figura II.1.

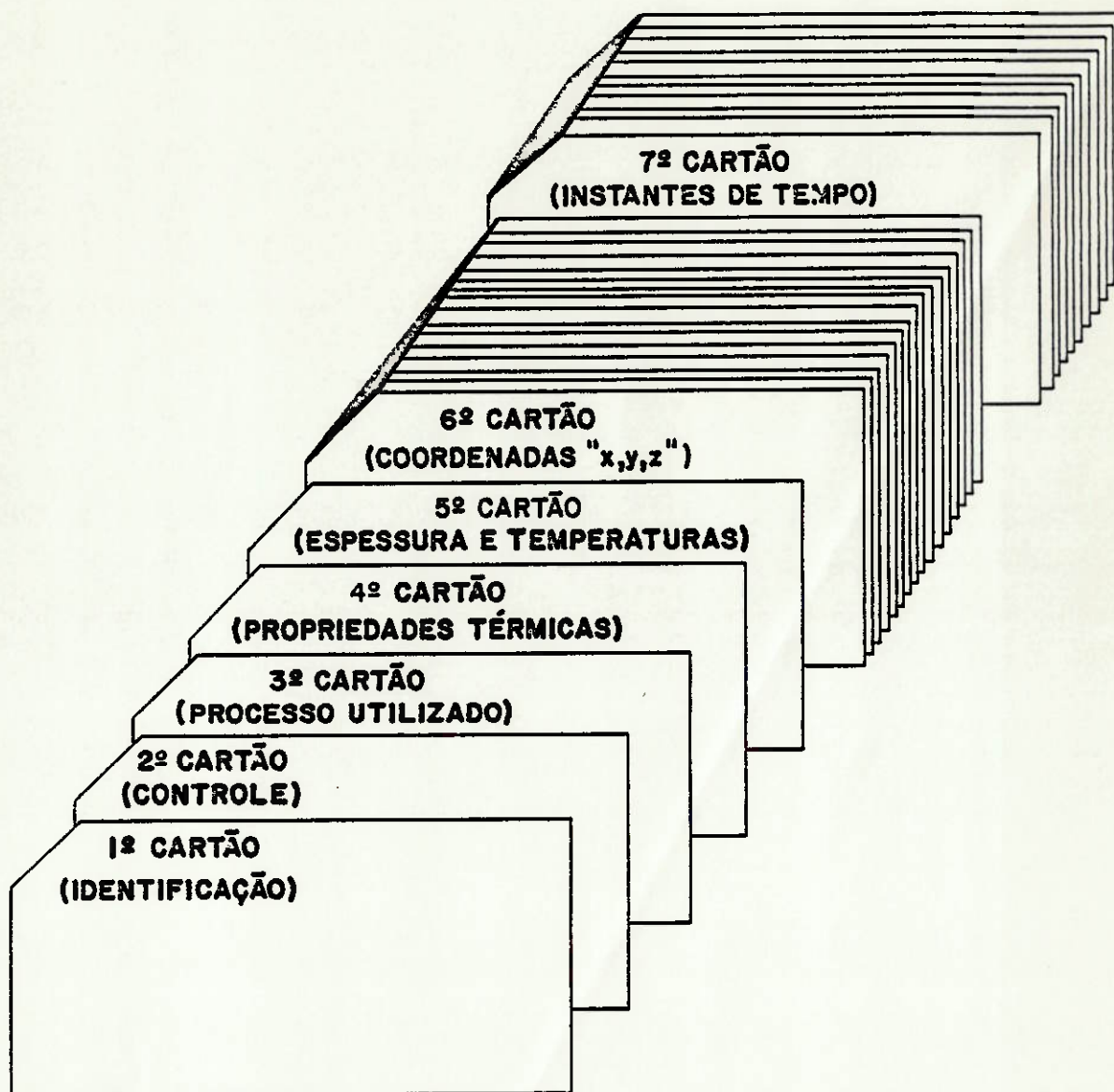


FIGURA II.1 - ESQUEMA DA ORDENAÇÃO DOS CARTÕES DE LEITURA

APÊNDICE III

PROBLEMA-EXEMPLO PARA A UTILIZAÇÃO
DO PROGRAMA "DISTEMP"


```

.....
SOLUCION ANALITICA DE PROBLEMA DE CONDUCCION DE CALOR
.....
FUENTE DE CALOR TRIDIMENSIONAL
.....
REGIME PERMANENTE
.....
    
```

```

.....
PROGRAMA ESTE
.....
    
```

CONDICIONES DE SOLDADURA

```

VOLTAJE DE ARCO ----- 14.20000 (VOLT)
CORRIENTE DE ARCO ----- 136.00000 (AMPERES)
EFICIENCIA DE ARCO ----- 0.90000
VELOCIDAD DE AVANCE DE ARCO ----- 86.70000 (MM/SEG)
COEFICIENTE DE CONDUCTIVIDAD ----- 1.00000 (1/CM/CM)
    
```

PROPIEDADES TERMICAS DE MATERIAL

```

CONDUCTIVIDAD TERMICA ----- 8.1000E-01 (CAL/CM/SEG/CM)
DIFUSIVIDAD TERMICA ----- 5.8000E-02 (CM/CM/SEG)
COEFICIENTE DE CONVECCION SUPERFICIE ----- 1.0000E-04 (CAL/SEG/CM/CM/CM)
COEFICIENTE DE CONVECCION INTERIORES ----- 5.0000E-05 (CAL/SEG/CM/CM/CM)
COEFICIENTE DE CONDUCTIVIDAD ----- 9.0000E-03
    
```

OTROS DATOS PROPORCIONADOS

```

TEMPERATURA DE MATERIAL ----- 3.00000 (MM)
TEMPERATURA INICIAL DE MATERIAL ----- 10.00000 (C)
TEMPERATURA DE FUSION DE MATERIAL ----- 460.00000 (C)
TEMPERATURA DE PUNTO APLICADO ----- 20.00000 (C)
    
```

*** DEPENDENCIAS EXISTEN LAS SIGUIENTES
 LAS SIGUIENTES SERAN CALCULADAS AS
 TEMPERATURAS

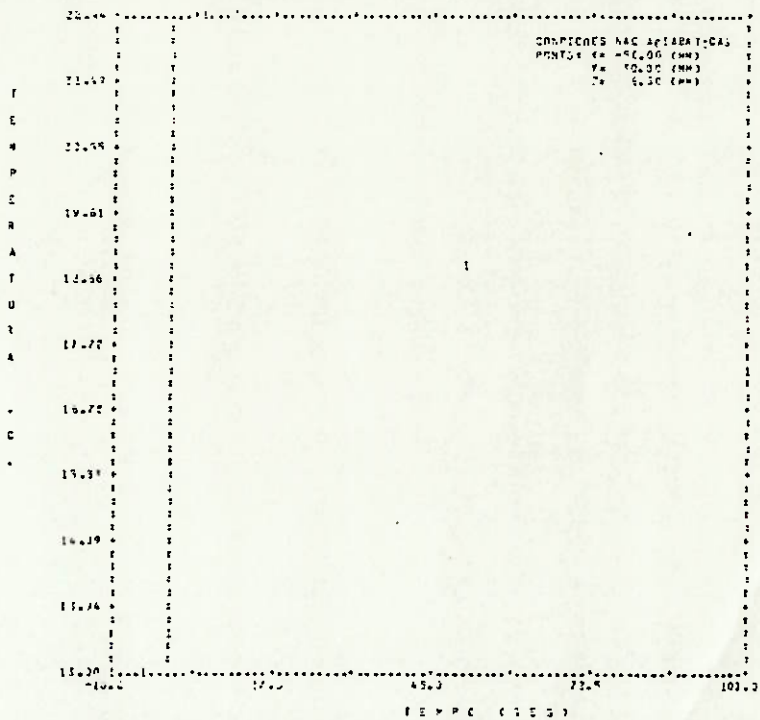
	1 (MM)	2 (MM)	3 (MM)
1	45.00000	20.00000	6.50000
2	0.00000	15.00000	6.50000
3	50.00000	0.00000	0.00000
4	0.00000	0.00000	1.00000
5	0.00000	15.00000	0.50000

***** P O S U L * * * * *

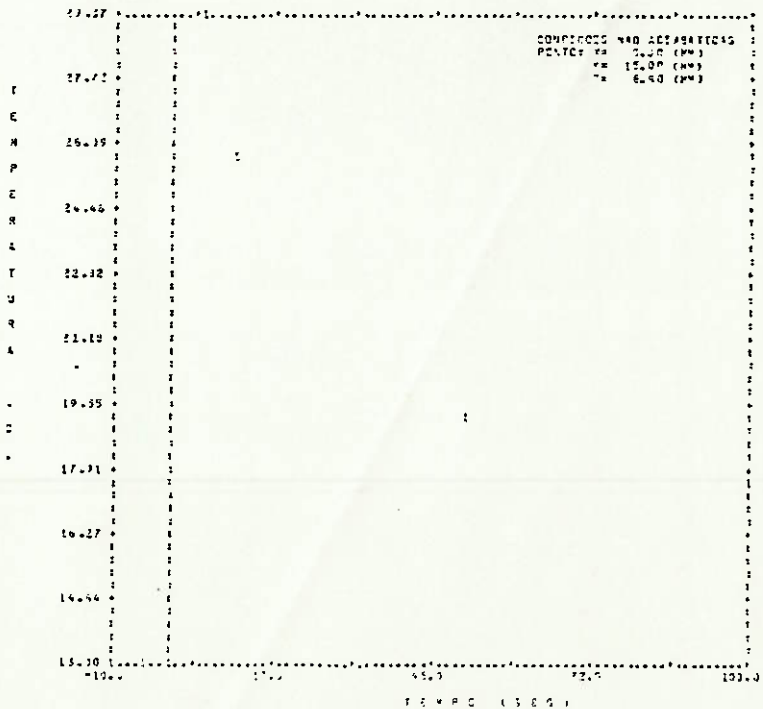
DISTRIBUCION DE TEMPERATURAS

TEMPO (SEG)	X (MM)	Y (MM)	Z (MM)	T (C)
-10.000	-50.000	10.000	6.5000	11.2000
	0.0000	15.0000	6.5000	11.2000
	50.0000	0.0000	6.5000	11.1000
	1.0000	0.0000	1.0000	11.3000
	0.0000	-15.0000	-6.5000	11.2000
-5.0000	-50.0000	10.0000	6.5000	11.1000
	0.0000	15.0000	6.5000	11.0000
	50.0000	0.0000	6.5000	11.3000
	0.0000	0.0000	1.0000	11.3000
	0.0000	-15.0000	6.5000	11.1000
0.0000	-50.0000	10.0000	6.5000	11.5644
	0.0000	15.0000	6.5000	11.3174
	50.0000	0.0000	6.5000	11.0000
	0.0000	0.0000	1.0000	11.1112
	0.0000	-15.0000	6.5000	11.2174
5.0000	-50.0000	10.0000	6.5000	22.1971
	0.0000	15.0000	6.5000	21.1647
	50.0000	0.0000	6.5000	18.7165
	0.0000	0.0000	1.0000	12.7114
	0.0000	-15.0000	6.5000	21.1647
10.0000	-50.0000	10.0000	6.5000	22.4116
	0.0000	15.0000	6.5000	21.1077
	50.0000	0.0000	6.5000	21.7473
	0.0000	0.0000	1.0000	21.1219
	0.0000	-15.0000	6.5000	21.1077
15.0000	-50.0000	10.0000	6.5000	19.1224
	0.0000	15.0000	6.5000	11.2211
	50.0000	0.0000	6.5000	19.3118
	0.0000	0.0000	1.0000	19.1115
	0.0000	-15.0000	6.5000	19.2211
20.0000	-50.0000	10.0000	6.5000	17.1996
	0.0000	15.0000	6.5000	17.4462
	50.0000	0.0000	6.5000	17.5044
	0.0000	0.0000	1.0000	17.4254
	0.0000	-15.0000	6.5000	17.4462

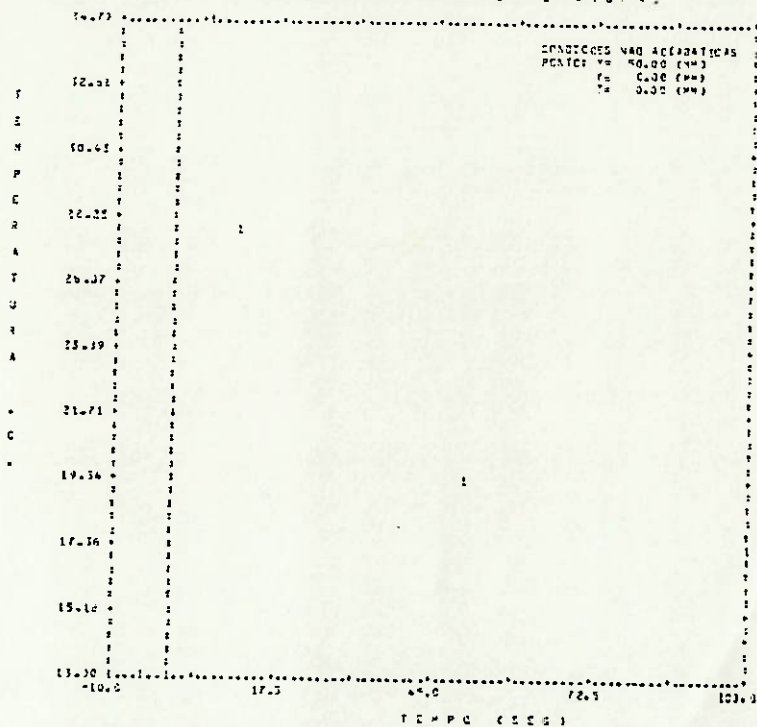
DISTRIBUCION DE TEMPERATURAS



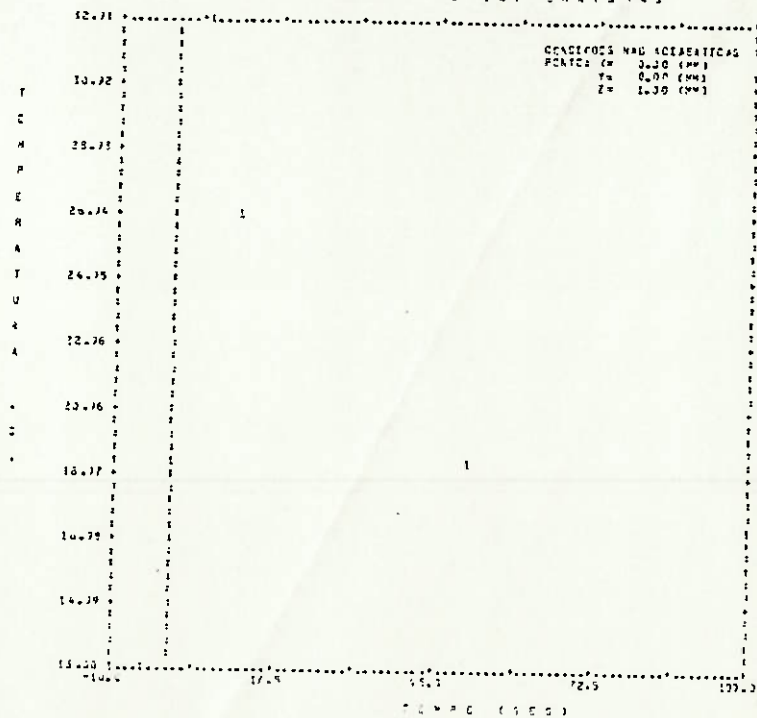
DISTRIBUCION DE TEMPERATURAS



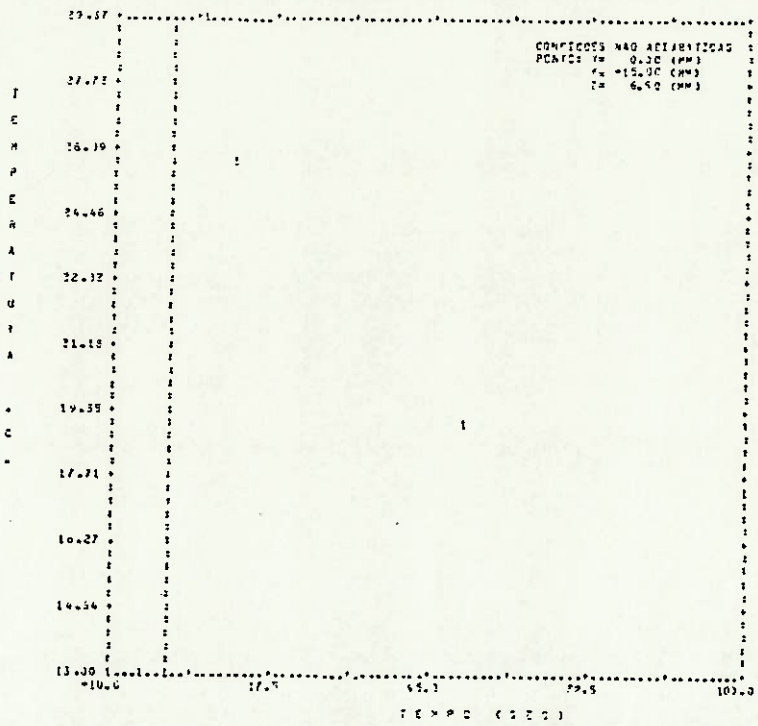
DISTRIBUCION DE TEMPERATURAS



DISTRIBUCION DE TEMPERATURAS



DIAGRAMAS DE TEMPERATURAS



APÊNDICE IV
ANÁLISE DE REGRESSÃO

A dependência linear entre a temperatura e a condutibilidade térmica dos materiais foi avaliada, neste estudo, através da equação:

$$k(T) = k_0(1 + \gamma T) \quad (2.16)$$

Assim, para determinar os valores dos coeficientes " k_0 " e " γ ", foram efetuadas três análises de regressão, utilizando-se os dados expostos nas referências que seguem:

1. Para o aço HY-80:

a) Referência [44], pág. 652, fig. 17, curva 1 Cr 1/2 Mo.

2. Para o alumínio puro (liga 1050):

a) Referência [43], pág. 925, curva 4.

3. Para a liga alumínio-magnésio (liga 5052):

a) Referência [43], pág. 908-910, curvas 6, 7 e 8.

b) Referência [38], pág. 767.

c) Referência [38], pág. 17.

Os resultados dessas análises foram os seguintes:

1. Para o aço HY-80:

$$k_0 = 0,0110121 \text{ (cal/mm/seg/}^\circ\text{C)}$$

$$\gamma = -0,0005224001$$

$$\text{coeficiente de correlação} = 0,99$$

2. Para o alumínio puro (liga 1050):

$$k_0 = 0,0474443 \text{ (cal/mm/seg/}^\circ\text{C)}$$

$$\gamma = 0,000298568$$

coeficiente de correlação = 0,93

3. Para a liga de alumínio-magnésio (liga 5052):

$$k_0 = 0,0311167 \text{ (cal/mm/seg/}^{\circ}\text{C)}$$

$$\gamma = 0,000912198$$

coeficiente de correlação = 0,99