

JOSE CAROLLO SARABIA

ANÁLISE EXPERIMENTAL DA DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURAS
EM CHAPAS DE AÇO AQUECIDAS POR FONTE DE CALOR MÓVEL

DISSERTAÇÃO APRESENTADA À ESCOLA
POLITÉCNICA DA USP PARA A OBTEN-
ÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGE-
NHARIA.

SÃO PAULO, 1980

CONSULTA
FD-373

JOSE CAROLLO SARABIA
Licenciado em Físico-Química
Engenheiro de Construção



ANÁLISE EXPERIMENTAL DA DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURAS EM CHAPAS DE AÇO AQUECIDAS POR FONTE DE CALOR MÓVEL.

DISSERTAÇÃO APRESENTADA À ESCOLA POLITECNICA DA USP PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA.

ORIENTADOR:
PROF.DR. CÉLIO TANIGUCHI; PROFESSOR LIVRE-DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA NAVAL DA USP.

SÃO PAULO, 1980

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Célio Taniguchi, nosso agradecimento pela orientação recebida para este trabalho e cessão do laboratório de solda para os ensaios experimentais.

Ao Sr. Laelcio Alves pela valiosa ajuda na operação do equipamento e preparo das amostras.

Ao Sr. Nelio R. Nunes do IPT pelo levantamento dos registros de temperatura.

Ao assistente aluno Fábio Gaboardi pela ajuda na modificação do programa de computador.

R E S U M O

Propusemo-nos neste trabalho a determinar experimentalmente a distribuição de temperaturas em chapas de aço carbono de 12,7 mm (1/2") e 19,05 mm (3/4"), aquecidas com fonte de calor móvel puntiforme. Para isto escolhemos os pontos superior e inferior das superfícies das chapas, bem como sua superfície intermediária para efetuarmos os estudos.

Com os resultados obtidos foi possível efetuar verificações numéricas das equações correspondentes, uma das quais com auxílio de programa de computador. Todas as equações apresentaram discrepâncias em relação aos resultados obtidos no laboratório, porém verificou-se que em alguns casos, podem ser introduzidas correções, de modo que os resultados numéricos se aproximem daqueles obtidos experimentalmente.

A B S T R A C T

In this paper, we have proposed to determine an experimental distribution of temperature in carbon steel plates of $1/2''$ (12,7 mm) and $3/4''$ (19,05 mm), heated up by a moving heat source. We selected the upper and lower points as well as an intermediate point to carry out the experiments.

Further, we calculate by means of analytical equations the temperature distribution, to find out that those values are usually higher than obtained by experiments. In some equations, corrections can be introduced, in order to obtain approximate values to those experimental results.

INDICE GERAL

| | |
|-------------------------|------|
| AGRADECIMENTOS..... | I |
| RESUMO..... | II |
| ABSTRACT..... | III |
| INDICE GERAL..... | IV |
| INDICE DAS FIGURAS..... | VI |
| INDICE DAS TABELAS..... | VIII |
| NOMENCLATURA..... | X |

CAPITULO I - INTRODUÇÃO

| | |
|---|---|
| 1.1 Explicações gerais | 1 |
| 1.2 Processo de conformação à chama das chapas de aço | 2 |
| 1.3 Objetivos do estudo | 3 |
| 1.4 Equipamentos utilizados | 4 |
| 1.5 Variáveis do processo | 4 |

CAPITULO II- REALIZAÇÃO DE ENSAIOS EXPERIMENTAIS

| | |
|--|----|
| 2.1 Medição de temperaturas | 6 |
| 2.2 Características do termopar NiCr-Ni | 6 |
| 2.3 Confeção da junta do termopar | 8 |
| 2.4 Montagem do termo-par para medição | 8 |
| 2.5 Leitura de temperaturas com fonte de calor fixa. | 10 |
| 2.6 Leitura de temperaturas com fonte de calor móvel | 15 |
| 2.7 Medição de temperaturas utilizando aparelho registrador. | 21 |
| 2.8 Procedimento de medição com registrador | 23 |
| 2.9 Considerações finais sobre o trabalho de laboratório. | 26 |

| | |
|--|----|
| CAPITULO III- CONSIDERAÇÕES SOBRE OS TRABALHOS EXISTENTES | |
| 3.1 Pesquisa bibliográfica | 27 |
| 3.2 Fonte de calor linear em movimento em chapa de aço | 28 |
| 3.2.1 Cálculos numéricos utilizando a equação de distribuição de temperaturas para fonte linear. | 29 |
| 3.3 Distribuição de temperaturas para fonte puntiforme, segundo Carslaw. | 32 |
| 3.3.1 Comentários sobre a equação de Carslaw | 36 |
| 3.4 Distribuição da temperatura segundo Rosenthal. | 37 |
| 3.5 Campo de temperaturas levantado por Beyer | 38 |
| CAPITULO IV- PROGRAMA DE COMPUTADOR PARA A DETERMINAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURAS | |
| 4.1 Introdução | 43 |
| 4.2 Programa de computador | 43 |
| 4.3 Exemplos calculados | 44 |
| 4.4 Desdobramento da equação nº 8 | 51 |
| 4.5 Alterações no programa do computador | 53 |
| CAPITULO V - CONCLUSÕES E SUGESTÕES | |
| 5.1 Conclusões finais | 56 |
| 5.2 Sugestões para pesquisas futuras | 57 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 58 |
| APÊNDICE I | |
| LISTA DE SÍMBOLOS UTILIZADOS NO PROGRAMA LISTAGEM DO PROGRAMA. | 59 |

INDICE DE FIGURAS

| | | |
|-----------|---|----|
| FIG. 1.1 | -Conformação à chama de chapas. | 2 |
| Fig. 2.1 | -Montagem da bancada para medição . | 9 |
| FIG. 2.2 | -Temperaturas devidas ao aquecimento com fonte de calor fixa, chapa de 12,7 mm (1/2"). | 11 |
| FIG. 2.3 | -Temperatura devida ao aquecimento com fonte de calor fixa, chapa de 19,05 mm (3/4") . | 13 |
| FIG. 2.4 | -Temperaturas originadas pelo aquecimento com fonte de calor móvel, chapa de 12,7 mm (1/2") . | 16 |
| FIG 2.5 | -Temperaturas originadas pelo aquecimento com fonte móvel, chapa de 19 mm (3/4"). | 18 |
| FIG. 2.6 | -Distribuição de temperaturas na chapa de 12,7 mm (1/2"). | 20 |
| FIG. 2.7 | -Distribuição de temperaturas na chapa de 19,05 mm (3/4"). | 20 |
| FIG 2.8 | -Posição dos pontos levantados por meio de registrador. | 21 |
| FIG 2.9 | -Montagem da bancada para utilização de registrador. | 22 |
| FIG. 2.10 | -Vista da bancada para medição com registrador | 22 |
| FIG. 2.11 | -Curvas de temperaturas para os pontos 3, 4 e 5. | 24 |
| FIG. 2.12 | -Curvas de temperaturas nos pontos 1, 2 e 6. | 25 |
| FIG. 3.1 | -Posição do sistema de coordenadas. | 38 |

| | | |
|-----------|--|----|
| FIG. 3.2 | -Distribuição de temperaturas, em função da espessura, em chapa de 25 mm, $y=0$, $x=0$ (Beyer). | 39 |
| FIG. 3.3 | -Distribuição de temperaturas, em função da espessura, chapa de 10 mm, $y=0$, $x=Cte.$ | 39 |
| FIG. 3.4 | -Distribuição de temperaturas ao longo de y , $z=10,7$, $x=Cte.$, chapa de 25 mm. | 40 |
| FIG. 3.5 | -Distribuição de temperaturas ao longo de y , $z=-10,7$, $x=Cte.$, chapa de 25 mm. | 40 |
| FIG. 4.1 | -Modelo discretizado para determinação de temperaturas. | 45 |
| FIG. 4.2 | -Temperaturas calculadas e experimentais. | 47 |
| FIG. 4.3 | -Gráfico da tabela 2.5, chapa de 19,05 mm (3/4"). | 48 |
| FIG. 4.4 | -Diagrama de blocos. | 49 |
| FIG. 4.5 | -Diagrama de blocos. | 50 |
| FIG. 4.6 | -Temperaturas no ponto superior da chapa com as parcelas direta e refletida. | 51 |
| FIG. 4.7 | -Temperaturas no ponto médio da chapa de 12,7 mm (1/2"), com as parcelas direta e refletida. | 52 |
| FIG. 4.8 | -Temperaturas no ponto inferior da chapa de 12,7 mm (1/2"), com as parcelas direta e refletida. | 52 |
| FIG. 4.9 | -Temperaturas com o coeficiente de condutibilidade. C4 | 54 |
| FIG. 4.10 | -Temperaturas com o coeficiente de condutibilidade, C4 e $t=0,9$ s. | 55 |
| FIG. 4.11 | -Temperaturas com o coeficiente de condutibilidade, C4 e $t=5$ s. | 55 |

INDICE DE TABELAS

| | | |
|------------|---|----|
| TABELA 1.1 | -Valores recomendados para as variáveis operacionais durante o processo de aquecimento. | 5 |
| TABELA 2.1 | -Especificação dos equipamentos utilizados nos ensaios experimentais. | 7 |
| TABELA 2.2 | -Temperaturas determinadas pelo aquecimento com fonte de calor fixa, chapa de 12,7 mm (1/2"). | 12 |
| TABELA 2.3 | -Temperaturas determinadas pelo aquecimento através de fonte de calor fixa, chapa de 19,05 mm (3/4"). | 14 |
| TABELA 2.4 | -Temperaturas obtidas experimentalmente pelo aquecimento com fonte de calor móvel, chapa de 12,7 mm (1/2"). | 17 |
| TABELA 2.5 | -Temperaturas obtidas experimentalmente pelo aquecimento com fonte de calor móvel, chapa de 19,05 mm (3/4"). | 19 |
| TABELA 3.1 | -Temperaturas nos segmentos de linha unitários. | 30 |
| TABELA 3.2 | -Temperatura nos segmentos de linha unitários, separados por 12,7 mm (1/2") daqueles pelos quais passa a fonte de calor linear. | 31 |
| TABELA 3.3 | -Temperaturas calculadas pela equação de Carslaw, em chapa de aço de 12,7 mm (1/2") de espessura no lado da chama. | 34 |

| | | |
|------------|--|----|
| TABELA 3.4 | -Temperaturas calculadas pela equação de Carslaw, em chapa de aço de 12,7 mm (1/2") de espessura no lado oposto ao da chama. | 35 |
| TABELA 3.5 | -Temperaturas extraídas dos gráficos de Beyer. | 41 |
| TABELA 4.1 | -Dados de entrada para processamento numérico. | 44 |
| TABELA 4.2 | -Temperaturas dadas pela equação nº 8 . | 46 |

NOMENCLATURA

C = Calor específico do material (cal/g. °C)

e = Base do logaritmo neperiano

h = Espessura da chapa (mm)

K = Número de trechos em que é dividido o modelo

k = trecho genérico do modelo

l = Número de pontos em que é dividido cada seção do modelo

Mol_{ac} = Molécula grama do acetileno

q = quantidade de calor transferida na unidade de tempo (cal/s)

Q_{est} = Quantidade de calor resultante da reação estequiométrica de 1 g/mol de acetileno.

R = Módulo do vetor posição dos pontos da chapa em relação ao sistema de coordenadas (w, y, z)

T = Temperatura (°C)

T_0 = Temperatura inicial da chapa a ser processada.

t = Tempo

V_{ac} = Vazão do acetileno (l/hora)

V = Velocidade de avanço da fonte de calor (mm/s)

$w = x - vt$ = Coordenada móvel na direção do eixo x

x, y, z = Coordenadas fixas na chapa (mm)

γ_{ac} = Peso específico do acetileno na temperatura utilizada (g/l)

η = Rendimento térmico do processo de conformação

λ = Condutibilidade térmica do material (cal/s. mm. °C)

ρ = Densidade do material (g/mm³)

χ = Difusividade térmica do mat. ($\chi = \lambda / \rho C$) (mm²/s)

1

CAPITULO I
INTRODUÇÃO

1.1 EXPLANAÇÕES GERAIS

A transferência de calor devida a uma fonte móvel, não tem merecido a atenção dos pesquisadores no tratamento dos problemas relativos ao fluxo de calor em metais, embora ela tenha sido tratada teoricamente já a algum tempo. No entanto, ele desempenha um papel importante em vários processos metalúrgicos, notadamente na soldagem elétrica e na conformação à chama de chapas de aço para a construção naval, o que determinou a retomada das pesquisas relativas a estes fenômenos.

O problema tem sido apresentado de maneira geral, visando determinar por meios analíticos, as deformações e tensões que se desenvolvem nas chapas por ação de fontes de calor, causadoras da distribuição não uniforme de temperaturas, cujo conhecimento torna-se necessário para a solução de tal problema.

O estudo das deformações também tem sido tratado experimentalmente, por medição direta das grandezas, tanto na soldagem como na conformação à chama, chegando-se a formulações que fornecem uma previsão do que acontecerá em casos semelhantes. O mesmo já não acontece com as tensões, que por apresentarem maiores dificuldades na sua determinação experimental, principalmente no interior do material, tem sido tratadas na maioria das vezes por meios analíticos, o que nem sempre tem conduzido a resultados confiáveis.

Do exposto, segue-se que o conhecimento da evolução de distribuição de temperaturas constitui-se em uma das etapas fundamentais do problema global, de modo que o seu estudo constituir-se-á no tópico principal deste trabalho

Neste estudo o tipo de distribuição de temperaturas na chapa de aço, resultantes do aquecimento com fonte de calor móvel, é assemelhado ao existente na conformação à chama nos estaleiros, cujo método é conhecido como " Line Heating Method ".

1.2 PROCESSO DE CONFORMAÇÃO À CHAMA DAS CHAPAS DE AÇO

O processo consiste basicamente em submeter as chapas de aço à ação da chama do maçarico oxi-acetilênico, o qual movimentando-se sucessivamente sobre linhas retas regularmente espaçadas, provoca em consequência a curvatura das mesmas. Se o processo também for executado na direção normal à inicial, teremos uma dupla curvatura. A fig. 1.1 mostra, à esquerda, a posição do bico de chama e uma linha reta na superfície da chapa, sobre a qual ele se movimentará, causando a deformação angular vista na mesma figura à direita.

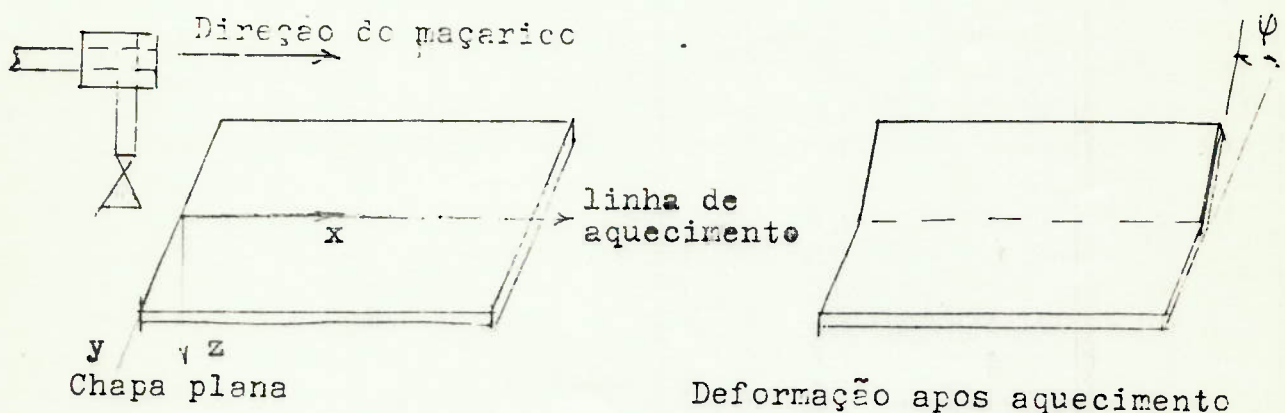


Fig. 1.1 - Conformação de chapas pela chama

O movimento da chama à velocidade constante sobre a superfície da chapa, provoca nesta última gradientes de temperatura que induzem o aparecimento de deformações residuais na zona aquecida (1), tendo como resultado a distorção angular.

Convém, porém, notar que não é a deformação o tema de nosso trabalho, e sim a distribuição de temperaturas que a origina.

1.3 OBJETIVO DO ESTUDO

Iniciamos este trabalho com uma série de experiências destinadas ao levantamento de temperaturas numa chapa, causadas por fonte de calor nível idealmente puntiforme. Para isto utilizamos chapas de 12,7 mm (1/2") e 19,05 mm (3/4"), e termopares colocados em pontos da superfície inferior e superior, bem como na superfície intermediária, no sentido da espessura. Com os valores obtidos levantamos os gráficos respectivos, e apontamos as diferenças nos comportamentos existentes entre os mesmos. Também efetuamos a medição de temperaturas por meio de aparelhos registradores, obtendo gráficos cujas curvas se mostram semelhantes às levantadas por leitura direta de galvanômetro.

A seguir, efetuamos uma análise da bibliografia existente sobre o tema ou a ele relacionado, onde se encontram equações de distribuição de temperaturas. Estas equações foram particularizadas para os nossos exemplos, onde substituímos as constantes pelos valores correspondentes aos ensaios e os resultados organizados em tabelas. No caso da equação de Rosenthal, utilizamos o programa de computador que consta na referência (1), o qual nos ajudou na análise do problema.

Os valores numéricos obtidos pelas equações afastam-se dos dados experimentais, sendo possível, em alguns casos, efetuar-se correções nas constantes das equações, de modo a reproduzir temperaturas próximas das encontradas no laboratório.

Neste trabalho, portanto, efetuamos uma análise comparativa, entre os resultados do laboratório e os valores obtidos por cálculos através de equações, que se mostraram úteis na análise de fenômenos semelhantes.

1.4- EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

O conjunto experimental constitui-se de um maçarico montado em um dispositivo móvel e equipamentos periféricos, tais como garrafas de oxigênio e acetileno, reguladores de fluxo, válvulas de operação, mangueiras e dispositivos de segurança.

O gás combustível utilizado foi o acetileno, que possui excelentes características de combustão, como indicamos a seguir:

1) Altas temperaturas de chama, de cerca de 3100°C , com fácil regulagem dos volumes de oxigênio e acetileno.

2) Chama regulável, isto é, redutora, neutra ou oxidante, segundo o material a ser processado

3) Potência da chama bastante alta, da ordem de $11 \text{ kcal/cm}^2 \cdot \text{s}$.

1.5- VARIÁVEIS DO PROCESSO

Segundo a classificação utilizada por Taniguchi (1), existem variáveis fundamentais e secundárias.

As fundamentais são as que influem diretamente nas condições de aquecimento e resfriamento do material e, portanto, sobre a distribuição de temperaturas na zona de aquecimento. Elas são enumeradas a seguir:

1) Espessura da chapa: mantendo-se constantes as outras variáveis, a distribuição da temperatura fica condicionada à espessura da chapa. As mais finas atingem o equilíbrio térmico antes do que as mais grossas.

2) Velocidade da fonte de calor: é a variável de maior influência, por estar diretamente relacionada com a quantidade de calor transferido.

As variáveis secundárias são assim chamadas pela sua relação direta com o insumo de calor, podendo portanto ser controladas pela velocidade de avanço da fonte. Elas são relacionadas a seguir:

- 1) Vazão de oxigênio e acetileno.
- 2) Inclinação do bico do maçarico em relação à chapa.
- 3) Pressão de alimentação do acetileno e oxigênio.
- 4) Distância do bico à chapa.
- 5) Diâmetro nominal do maçarico.

As variáveis operacionais foram fixadas de acordo com os dados práticos indicados na tabela 1.1, extraído da referência (1)

TABELA 1.1 - VALORES RECOMENDADOS PARA AS VARIÁVEIS OPERACIONAIS DURANTE O PROCESSO DE AQUECIMENTO.

| VARIÁVEIS DO PROCESSO | | ESPESURA DA CHAPA | |
|---------------------------------------|-----------|-------------------|----------|
| | | 12,7 mm | 19,05 mm |
| Bicos Utilizados \varnothing (mm) | | 5 | 6 |
| Vazão a 0°C l/h | Oxigênio | 1500 | 2000 |
| | acetileno | 1000 | 1500 |
| Pressão 0°C kg/cm ² | Oxigênio | 2,5 | 2,5 |
| | acetileno | 0,5 | 0,5 |
| Ângulo do bico em relação à chapa (°) | | 70-110 | 70-110 |
| Velocidade de avanço (mm/s) | | 5 | 5 |
| Distância do bico à chapa (mm) | | 16 | 16 |

REALIZAÇÃO DE ENSAIOS EXPERIMENTAIS

2.1 MEDIÇÃO DE TEMPERATURAS

Na execução dos ensaios de laboratório para medição das temperaturas, utilizamos termopares de NiCr-Ni para a medição de temperaturas, e como instrumentos indicadores, galvanômetro analógico ou registrador. Com esta instrumentação e mais o maçarico oxiacetilênico deslocável sobre a chapa de aço de acordo com a relação de equipamentos da tabela 2.1, temos os elementos para a série de experiências que foram efetuadas para levantamento dos gráficos experimentais.

2.2 CARACTERÍSTICAS DO TERMOPAR NiCr-Ni (Cromel-Alumel)

O níquel e mais ainda suas ligas com o cromo, alumínio ou silício, possuem uma grande estabilidade estrutural e elevada resistência à corrosão, sobretudo à oxidação a altas temperaturas. Além do mais, eles podem formar pares de potência termoelétrica elevada e praticamente constante de cerca de $40 \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$. Por isto são muito utilizados em temperaturas de até 1000°C , onde os pares de Constantan não ofereceriam a precisão necessária.

Diversas ligas estão padronizadas e referidas nas normas, mas apenas a norma DIN(alemã) será citada, por ser dessa origem o arame utilizado para confecção do termopar. A norma DIN 47.710 estabelece a composição para o termopar níquel-cromo (85% de níquel, 10% de cromo, 3,3% manganês) / níquel ligado (95% níquel, 4% manganês, 2% alumínio). Juntamente com o termopar utiliza-se a tabela correspondente para conversão de milivolts em $^{\circ}\text{C}$, no caso de se dispor de milivoltímetro e um registrador para medir a escala de ordenadas

TABELA 2.1 - ESPECIFICAÇÕES DOS EQUIPAMENTOS UTILIZADOS
NOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS

| Nº | Item | Especificações gerais |
|----|--------------------------|--|
| 1 | Maçarico oxi-acetilênico | Oxigênio do Brasil - Tipo AMG 12-Vazões até 3000 l/h |
| 2 | Bico de solda | Oxigênio do Brasil - Tipo AM 1000 - Vazões de até 1000 l/h de acetileno |
| 3 | Carro porta-maçarico | ESAB- Tipo IBA 750. Com caixa de comando tipo A2 - Velocidades de até 200 cm/min |
| 4 | Medidor de fluxo | Omel - Tipo R 3A - Vazões de até 5000 l/h de acetileno |
| 5 | Regulador p/ Oxigênio | Oxigênio do Brasil - Tipo AV 31 - Pressões de até 15,0 kg/cm ² |
| 6 | Cronômetro | Excelsior Park-Precisão de 0,2 seg. |
| 7 | Termopar | Chromel-Alumel AW Nº 14 |
| 8 | Indicador analógico | Engro Alcance 20º a 1200ºC |
| 9 | Regulador p/ Acetileno | Oxigênio do Brasil - Tipo AV 69 - Pressões de até 3,0 kg/cm ² |

Nota: Esta tabela foi extraída da referência bibliográfica (1), adicionando-se os equipamentos utilizados no laboratório.

2.3 CONFEÇÃO DA JUNTA DO TERMOPAR

Pela torção das extremidades dos dois arames, correspondentes aos polos positivo e negativo, e sua posterior fusão pela chama oxiacetilênica, consegue-se uma boa união, evitando a possível formação de uma película isolante, que ocorre por oxidação a elevadas temperaturas. Esta união é ensaiada com o aquecimento feito por uma chama de fósforo que atinge a temperatura média de 240°C.

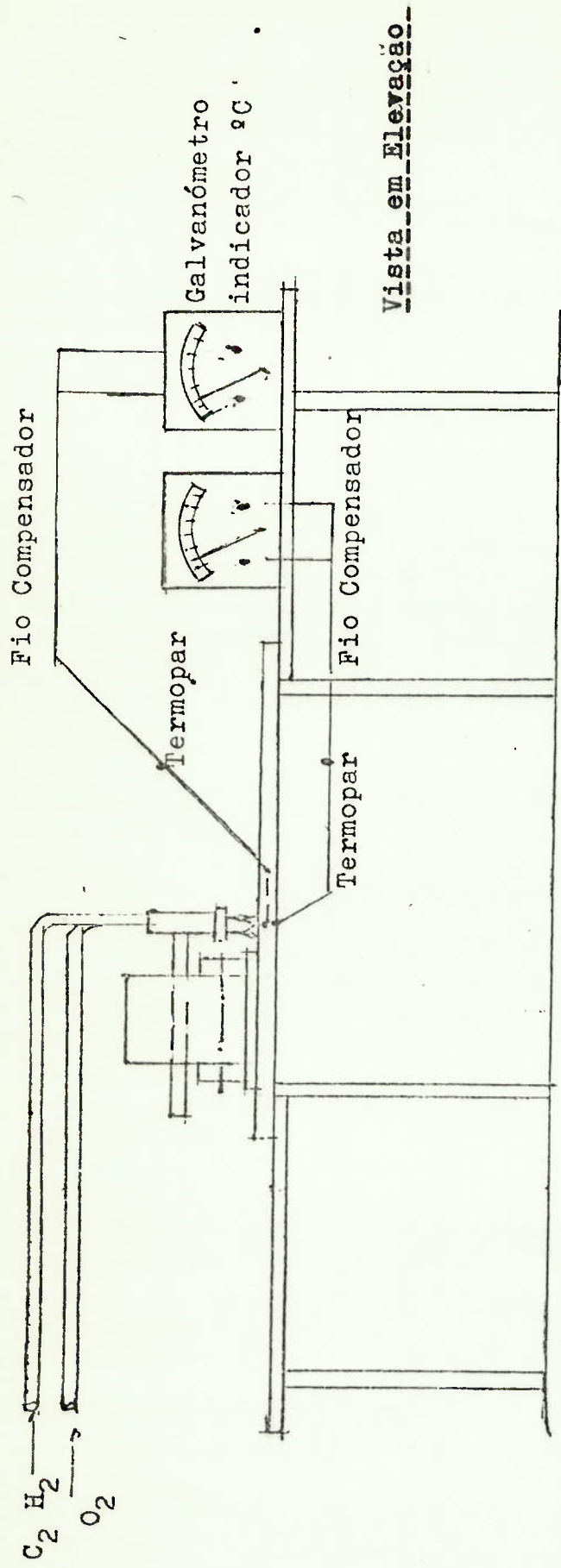
2.4 MONTAGEM DO TERMOPAR PARA MEDIÇÃO

A fig. (2.1) mostra o tipo de montagem para medição, utilizando dois galvanômetros analógicos. A colocação dos termopares na chapa envolve algumas características particulares descritas a seguir:

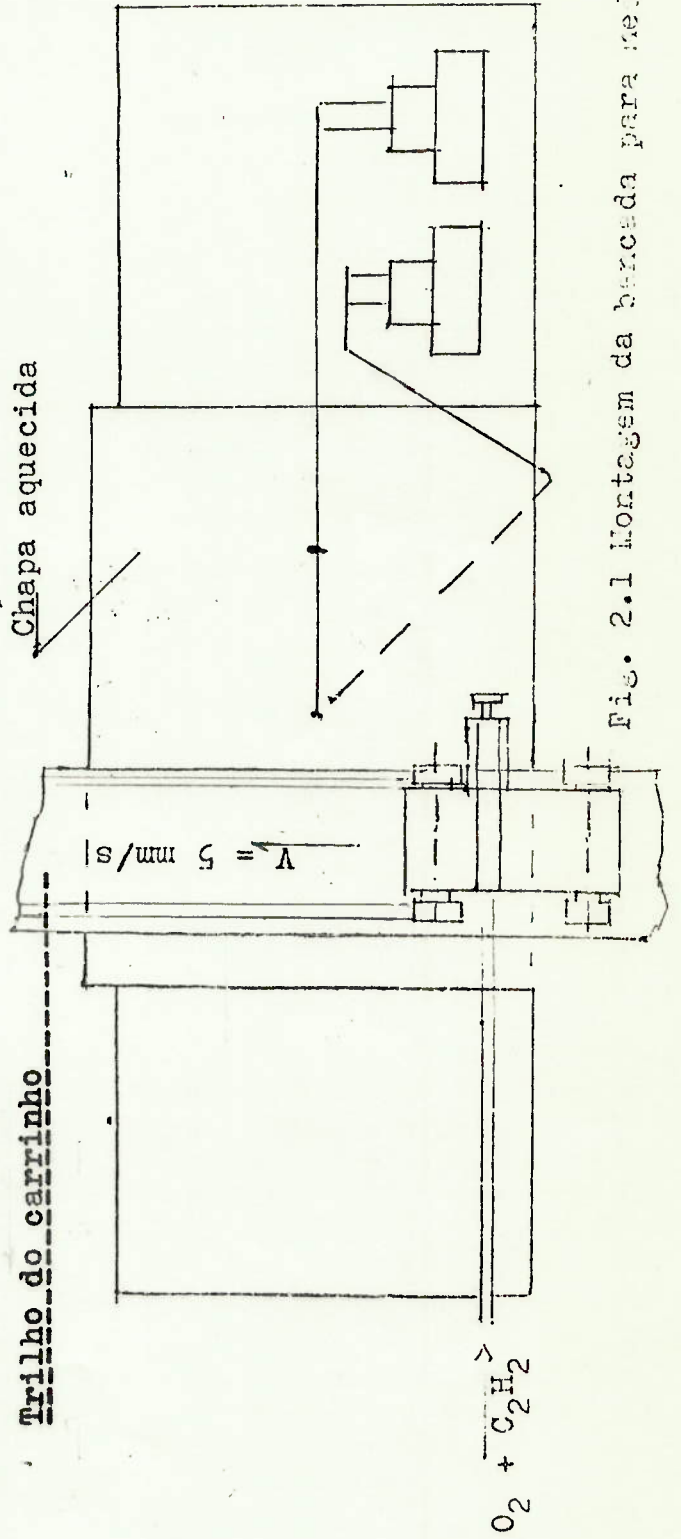
a) O arame do termopar tem aproximadamente 3mm de diâmetro na extremidade soldada, e este deve ser alojado em um furo com a mesma profundidade. A colocação do termopar seguinte deve ter profundidade de 6mm, a fim de evitar leituras similares e obter temperaturas bem características no sentido da espessura da chapa. Com a utilização de arames mais finos é possível diminuir essas distâncias.

b) A obtenção de temperaturas no lado da chama é bastante crítica, pois a chama tem diâmetro de 20 mm ou mais, e aquece os arames do termopar até fundi-los. Somente com isolante refratário foi possível a medição da mesma.

c) A fixação do termopar por solda com latão na chapa tem relativa confiabilidade, sendo necessário ensaiar o mesmo através de aquecimento localizado, antes de realizar as leituras, para averiguar se o contato produzido pela solda não é defeituoso.



Vista em Elevação



Vista em Planta

Fig. 2.1 Montagem da bancada para medição

2.5 LEITURA DE TEMPERATURA COM FONTE DE CALOR FIXA

Esta série de ensaios para a medição de temperaturas utilizando fonte de calor fixa, precedeu aos de fonte móvel em chapas de 500 x 500 x 12,7 mm e de 520 x 500 x 19,05 mm .

Ela teve por finalidade levantar as temperaturas dos pontos S (Superior), M (Médio) e I (Inferior), cujos valores encontram-se nas tabelas 2.2 e 2.3 .

A experiência foi iniciada por uma sequência de ensaios, medindo-se as temperaturas nos pontos M e I. Estes ensaios foram repetidos posteriormente, porém com a chapa virada, de modo que o novo ponto I se situasse do lado simetricamente oposto ao anterior. Os dados mostram que os valores da temperatura em I, em ambos os lados da chapa, são praticamente os mesmos, pois estão submetidos às mesmas condições de aquecimento. Os valores em M também coincidem nas duas posições da chapa, confirmando assim que M se situava no ponto médio e que não há diferenças perceptíveis na condução do calor em torno daquele ponto.

As leituras foram tomadas a 30 , 90, 150, 270 e 390 segundos após o contato inicial da chama com o corpo de prova ensaiado. As fontes de calor, providas através do maçarico WM 40 da White Martins com bicos nº 5 e 6, foram mantidas fixas durante 20 e 30 segundos respectivamente, na vertical que liga os pontos onde se situam os termopares.

Os valores de temperaturas em S, quando medidos no lado da chama (tabelas 2.2 e 2.3), foram obtidos colocando-se o termopar em um furo de \varnothing de 4 mm, com 3 mm de profundidade, protegendo os fios na saída com tubos de material refratário. As temperaturas em S correspondem ao ponto situado a 1,5 mm de profundidade em relação à superfície.

Os valores da temperatura dados na tabela 2.3 para 58, 60, e 70 segundos são aproximados, devido às rápidas variações da temperatura, prejudicando as leituras simultâneas do galvanômetro e do cronômetro.

As figuras 2.2 e 2.3 representam as curvas de temperatura dos pontos em que foi realizada a medição e a parte superior ilustra a posição dos termopares.

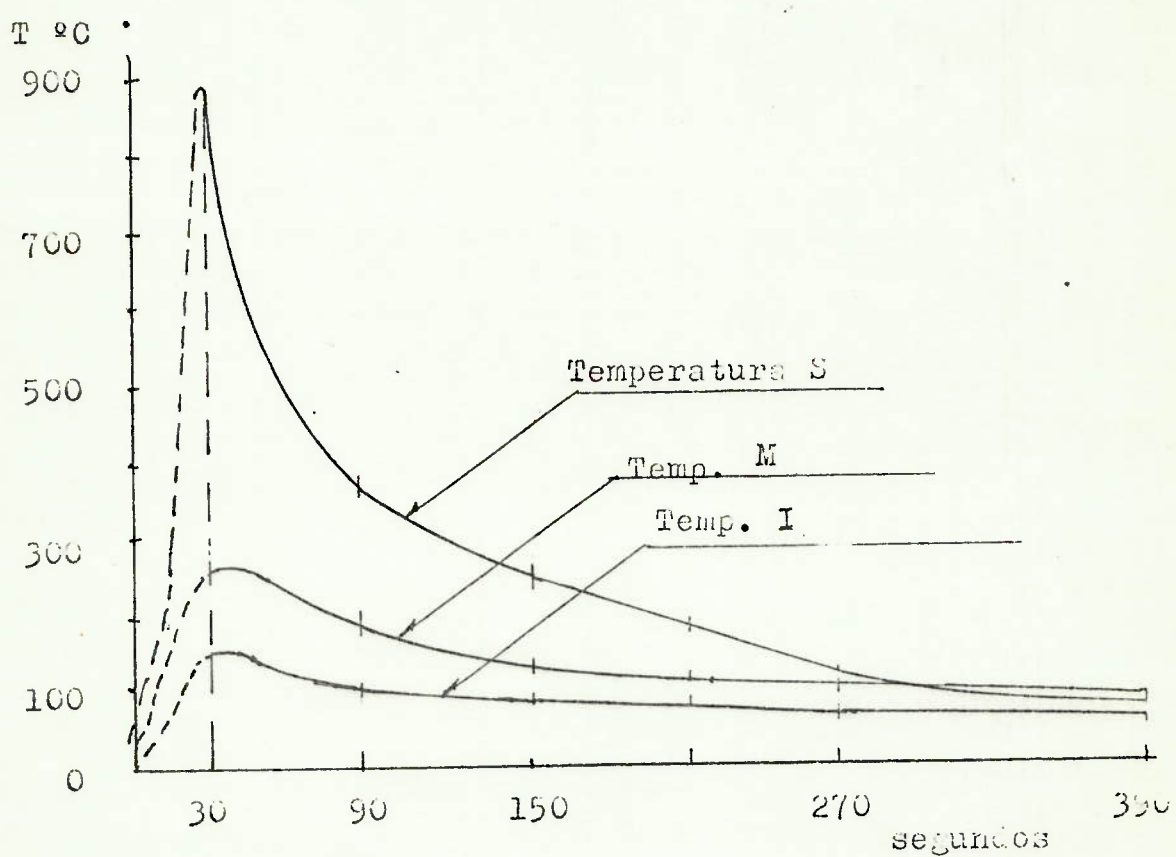
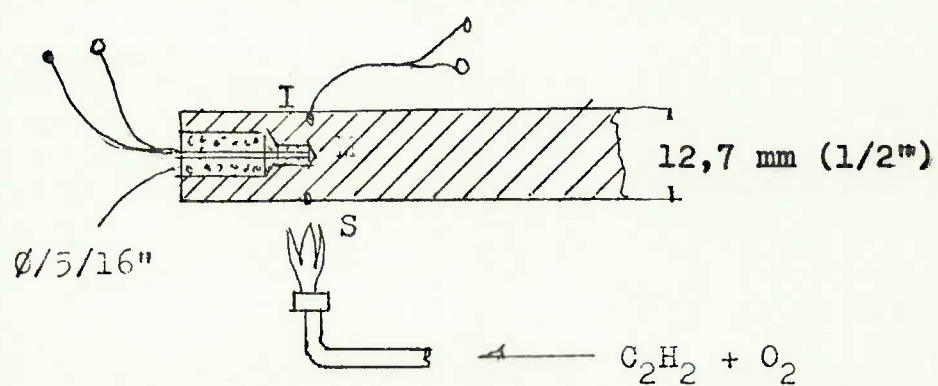
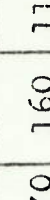

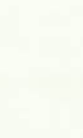


Fig. 2.2 - Temperaturas devidas ao aquecimento com fonte de calor fixa em chapa de $12,7 \text{ mm (1/2")}$ e intervalo de aquecimento de 20 segundos.

Tabela 2.2 - TEMPERATURAS OBTIDAS EXPERIMENTALMENTE PELO AQUECIMENTO ATRAVÉS DE FONTE DE CALOR FIXA, EM CHAPAS DE 12,7 mm (1/2"), UTILIZANDO O QUEIMADOR Nº 5 NO MAÇARICO OXI-ACETILENICO. INTER-VALO DE AQUECIMENTO 20 s .

| Ensaio nº | Condição do Ensaio | Temperaturas nos pontos M e I no instante t (seg.) | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------|--|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|-----|--|--|
| | | 30 | | | 90 | | | 150 | | | 270 | | | 390 | | |
| | | M | I | M | M | I | M | I | M | I | M | I | M | I | | |
| 1 |  | 260 | 170 | 160 | 110 | 130 | 95 | 110 | 85 | 110 | 85 | 110 | 85 | 70 | | |
| 2 | | 220 | 160 | 155 | 105 | 120 | 90 | 100 | 75 | 100 | 90 | 100 | 75 | 65 | | |
| 3 | | 250 | 165 | 145 | 110 | 110 | 80 | 95 | 70 | 110 | 75 | 110 | 75 | 65 | | |
| 4 |  | 235 | 125 | 170 | 110 | 130 | 100 | 105 | 75 | 130 | 80 | 105 | 75 | 60 | | |
| 5 | | 260 | 150 | 180 | 100 | 140 | 90 | 110 | 80 | 140 | 90 | 110 | 80 | 65 | | |
| 6 | | 240 | 130 | 175 | 105 | 125 | 85 | 100 | 70 | 125 | 75 | 100 | 70 | 60 | | |
| Temperaturas médias | | 245 | 150 | 165 | 110 | 125 | 90 | 105 | 75 | 125 | 80 | 105 | 75 | 65 | | |

| Ensaio nº | Condição do ensaio | Temperaturas no ponto S no instante t (seg.) | | | | |
|-----------|--|--|-----|-----|-----|-----|
| | | 30 | 90 | 150 | 270 | 390 |
| 7 |  | 850 | 380 | 250 | 150 | 70 |

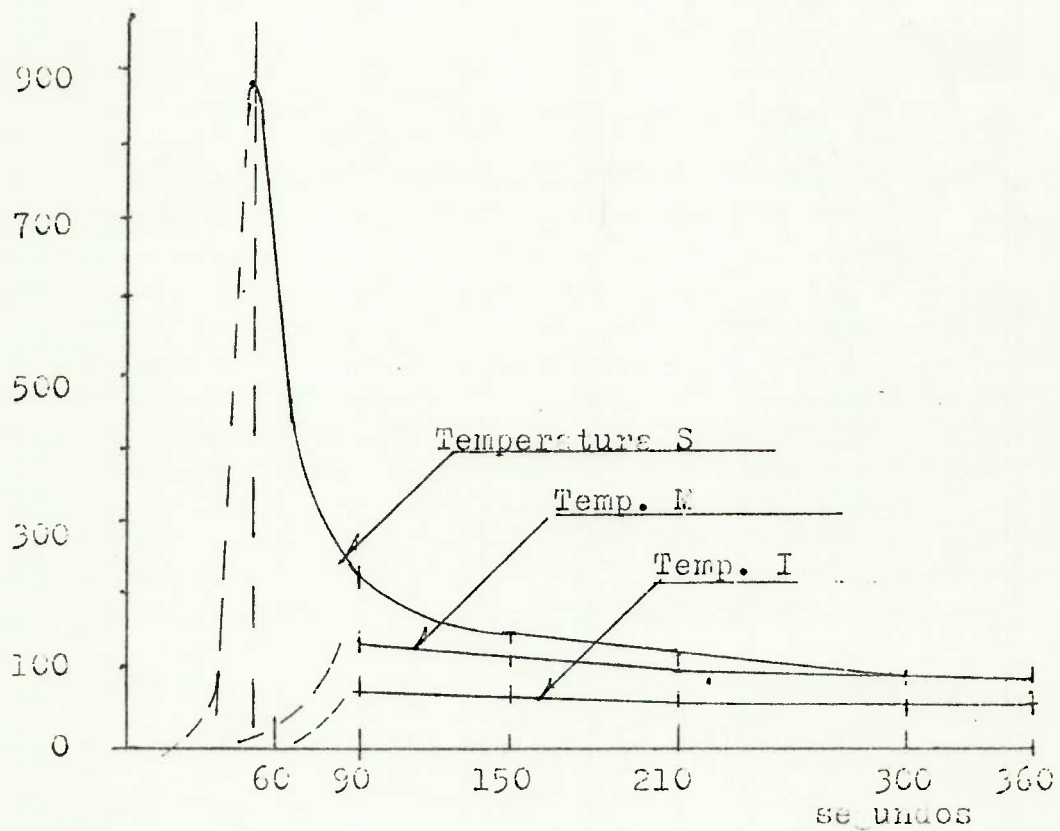
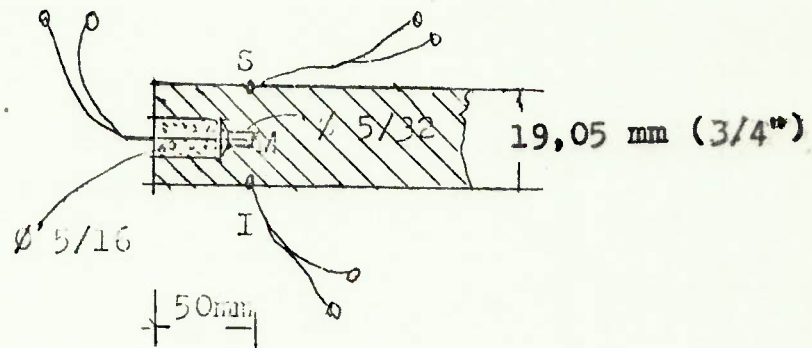
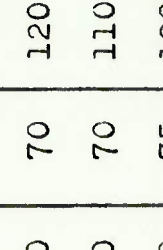
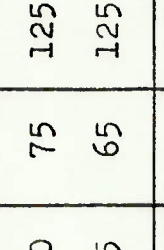
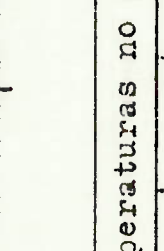
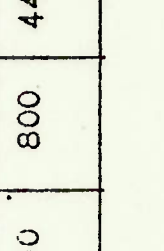
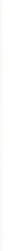



Fig.2 .3 - Temperaturas devidas ao aquecimento com fonte de calor fixa em chapa de 19,05 mm (3/4") e intervalo de aquecimento de 30 segundos.

Tabela 2.3 - TEMPERATURAS OBTIDAS EXPERIMENTALMENTE PELO AQUECIMENTO ATRAVÉS DE FONTE DE CALOR FIXA, EM CHAPAS DE 19,05 mm (3/4"), UTILIZANDO O QUEIMADOR Nº 6 NO MAÇARICO OXI-ACETILENICO. INTERVALO DE AQUECIMENTO 30 s .

| Ensaio Nº | Condição do ensaio | Temperaturas nos pontos M e I no instante t (seg.) | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------|---|---|----|--|-----|----|--|-----|----|--|-----|----|--|-----|----|--|
| | | 90 | | | 150 | | | 210 | | | 300 | | | 360 | | |
| | | M | I | | M | I | | M | I | | M | I | | M | I | |
| 1 |  | 130 | 70 | | 120 | 70 | | 105 | 65 | | 190 | 65 | | 80 | 60 | |
| 2 |  | 120 | 70 | | 110 | 70 | | 100 | 65 | | 96 | 60 | | 80 | 60 | |
| 3 |  | 130 | 75 | | 120 | 70 | | 105 | 65 | | 100 | 62 | | 85 | 60 | |
| 4 |  | 140 | 75 | | 125 | 75 | | 110 | 70 | | 105 | 70 | | 95 | 55 | |
| 5 |  | 135 | 65 | | 125 | 75 | | 115 | 60 | | 105 | 60 | | 95 | 55 | |
| Temperaturas medias 130 | | 70 | | | 120 | 70 | | 105 | 65 | | 100 | 60 | | 85 | 60 | |

| Ensaio Nº | Condição do ensaio | Temperaturas no ponto S no instante t (seg.) | | | | | | | | | |
|-----------|--|---|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|--|--|
| | | 58 | 60 | 70 | 90 | 150 | 210 | 300 | 360 | | |
| 6 |  | 890 | 800 | 440 | 230 | 140 | 120 | 95 | 85 | | |

2.6 LEITURA DAS TEMPERATURAS COM FONTE DE CALOR MÓVEL

Com o auxílio de um cronômetro, disparado no momento em que o bico do maçarico iniciava o contato com a chapa, procedeu-se a leitura nos instantes 70, 120, 180, 240 e 360 segundos, para as experiências com a fonte móvel de calor. A leitura das temperaturas começou no instante em que o bico do maçarico estava na vertical que passava pelos pontos pesquisados, e onde estavam colocados os termopares. O carrinho levou 140 segundos para percorrer os 520 mm da chapa com dimensões de 520 x 500 mm. Inicialmente procedeu-se a leitura para os pontos M (médio) e I (inferior, lado oposto da chama) e depois para os pontos S (superior) e M (médio). Os dados estão nas tabelas (2.4) e (2.5), para as chapas de 12,7 mm (1/2") e 19,05 (3/4") mm, respectivamente, com as médias arredondadas para $\pm 5^{\circ}\text{C}$, pelo fato de se dispor de uma escala de temperaturas cujo alcance era de 0°C a 1200°C e as divisões de 20°C não permitirem mais que 10°C na sensibilidade de leitura.

Entre cada aquecimento há um intervalo de 40 a 60 minutos para o esfriamento da chapa, para se poder iniciar o processo de medição feito anteriormente.

No gráfico da fig. (2.4) nota-se que a curva do ponto S no lado da chama, após 180 segundos, fornece valores para a temperatura inferiores ao ponto M no meio da chapa.

Observou-se também que a temperatura máxima do ponto M é atingida com atraso de 25 e 35 segundos em relação ao ponto S nas chapas de 12,7 (1/2") e 19,05 (3/4"), respectivamente. Neste tipo de ensaio o cronômetro era disparado no momento em que o bico do maçarico passava na vertical que continha o ponto M. A defasagem das temperaturas máximas do ponto I em relação ao ponto S não pôde ser medida por deficiências do equipamento utilizado, sendo esse atraso bem maior que o anterior.

As figs. 2.6 e 2.7 mostram a distribuição de temperaturas através da espessura da chapa nos instantes indicados pelos respectivos números sobre as curvas.

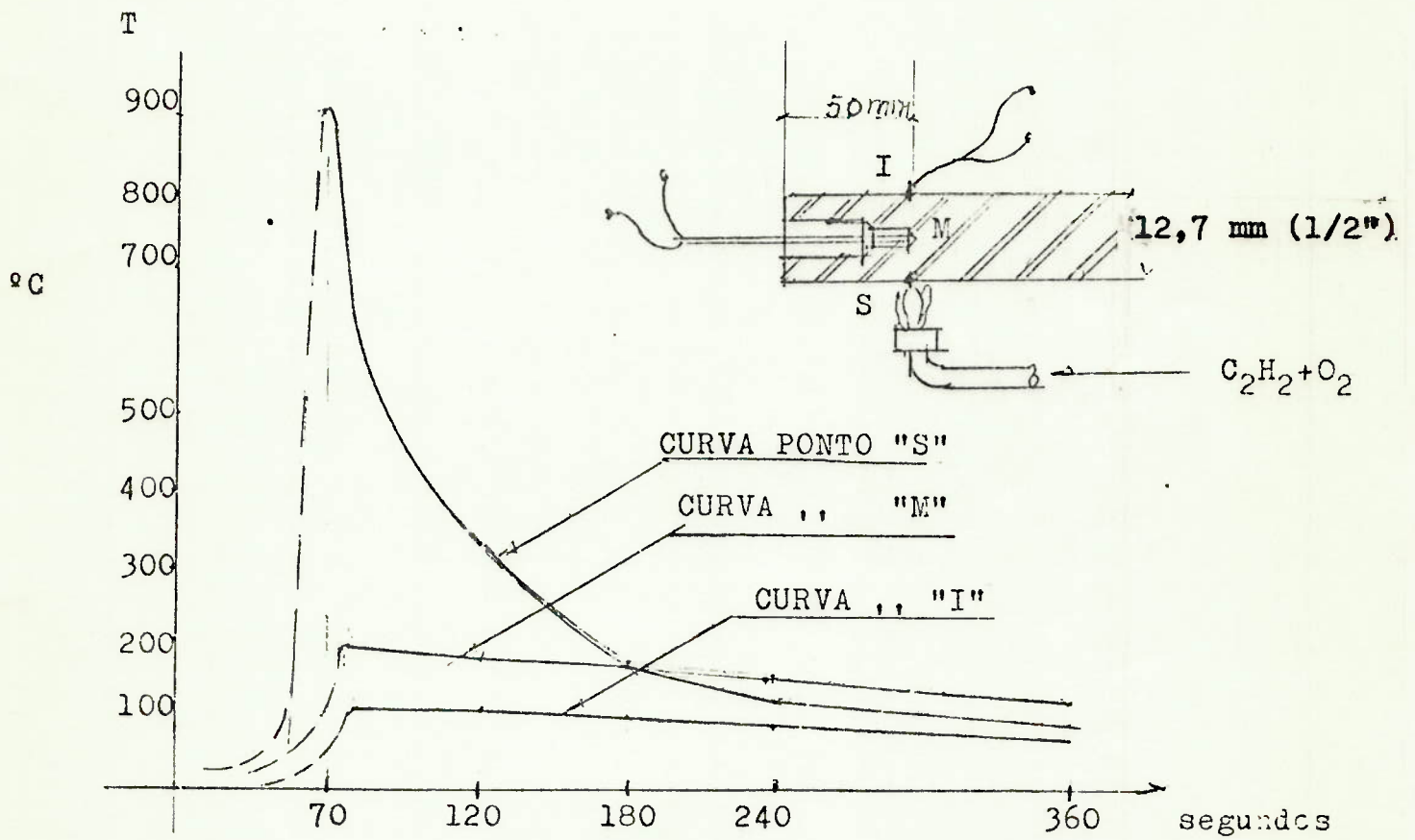
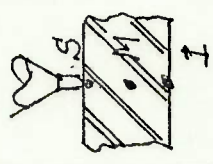
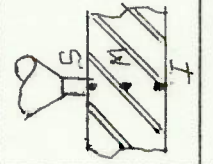


Fig. 2.4 - Temperaturas resultantes do aquecimento com fonte de calor móvel em chapa de 12,7 mm (1/2")

Tabela 2.4 - TEMPERATURAS OBTIDAS EXPERIMENTALMENTE PELO AQUECIMENTO COM FONTE DE CALOR MÓVEL EM CHAPA DE 12,7 mm (1/2"), UTILIZANDO O QUEIMADOR Nº 5 NO MAÇARICO OXI-ACETILENICO, A UMA VELOCIDADE DE 5 mm/s

| Ensaio Nº | Condição do Ensaio | Temperaturas nos pontos S, M, I no instante t (seg.) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------|--|--|---|---|-----|-----|---|-----|-----|---|-----|-----|---|-----|-----|---|-----|---|---|-----|-----|--|
| | | 65 | | | 70 | | | 120 | | | 180 | | | 240 | | | 360 | | | | | |
| | | S | M | S | M | S | I | S | M | I | S | M | I | S | M | I | S | M | I | | | |
| 1 |  | | | | 160 | 90 | | 150 | 90 | | 120 | 80 | | 120 | 80 | | | | | 90 | 65 | |
| 2 | | | | | 155 | 75 | | 150 | 80 | | 115 | 75 | | 115 | 75 | | | | | 85 | 70 | |
| 3 | | | | | 175 | 100 | | 170 | 110 | | 150 | 95 | | 150 | 95 | | | | | 115 | 85 | |
| 4 | | | | | 175 | 100 | | 170 | 105 | | 155 | 100 | | 155 | 100 | | | | | 110 | 85 | |
| 5 | | | | | 180 | 105 | | 170 | 110 | | 165 | 110 | | 165 | 110 | | | | | 110 | 85 | |
| 6 | | | | | 180 | 100 | | 175 | 105 | | 145 | 95 | | 145 | 95 | | | | | 120 | 85 | |
| 7 |  | 900 | | | 600 | 190 | | 320 | 180 | | 160 | 175 | | 160 | 175 | | | | | 95 | 115 | |
| 8 | | 800 | | | 550 | 180 | | 280 | 175 | | 150 | 160 | | 150 | 160 | | | | | 80 | 110 | |
| 9 | | 1100 | | | 750 | 180 | | 300 | 180 | | 140 | 155 | | 140 | 155 | | | | | 80 | 110 | |
| Temperaturas médias | | 900 | | | 650 | 180 | | 300 | 170 | | 150 | 150 | | 150 | 150 | | | | | 85 | 110 | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

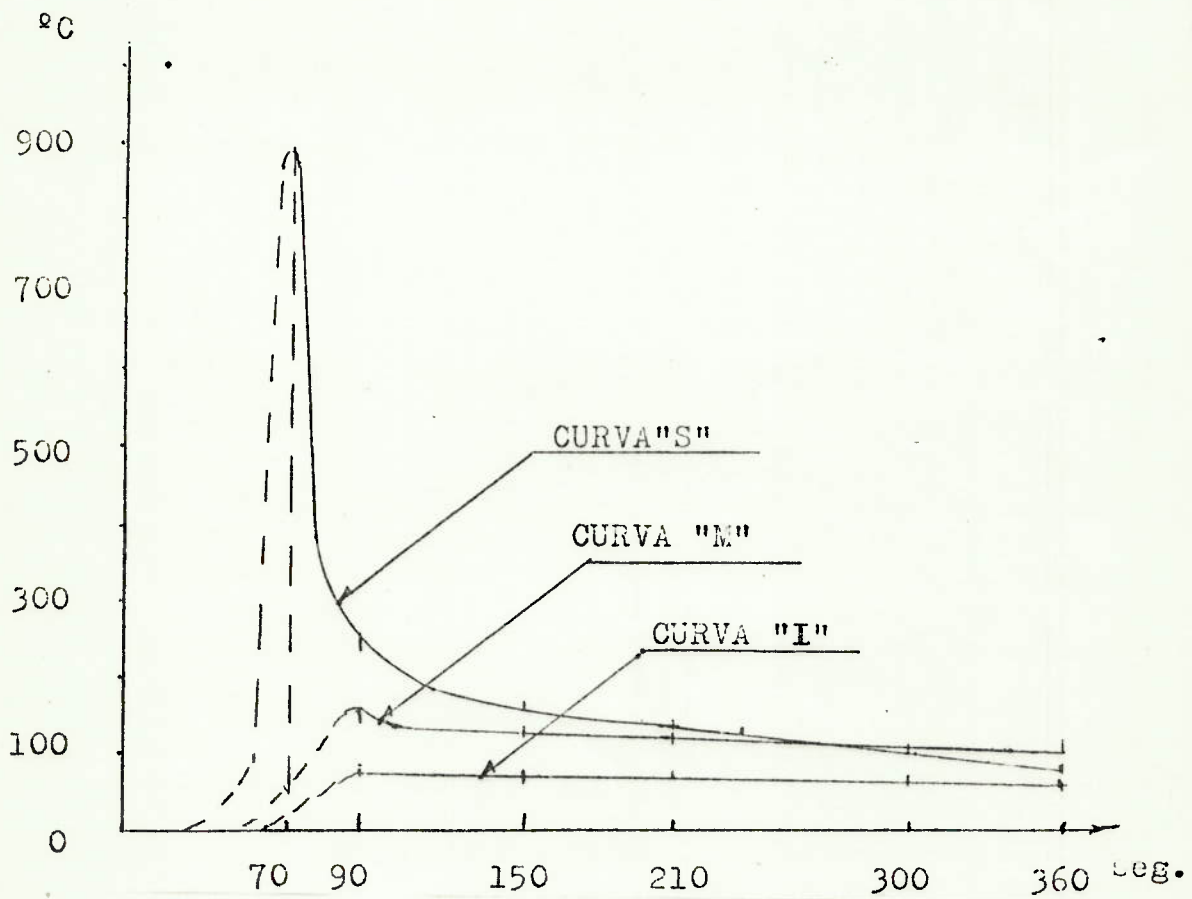
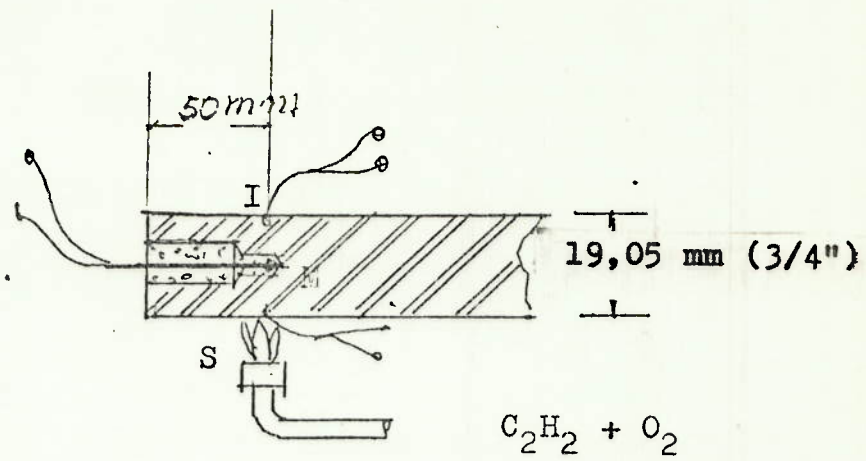
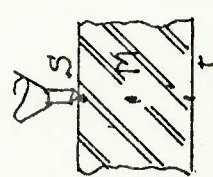


Fig. 2.5 - Temperaturas resultantes do aquecimento com fonte móvel em chapa de 19,05 mm (3/4") .

Tabela 2.5 - TEMPERATURAS OBTIDAS EXPERIMENTALMENTE PELO AQUECIMENTO COM FONTE DE CALOR MÓVEL EM CHAPA DE 19,05 mm (3/4"), UTILIZANDO O QUEIMADOR Nº 6 NO MAÇARICO OXI-ACETILENICO, A UMA VELOCIDADE DE 5 mm/s

| Ensaio Nº | Condição do ensaio | Temperaturas nos pontos S, M e I no instante t (seg.) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------------|---|---|----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|-----|-----|----|-----|-----|----|-----|-----|----|----|----|----|
| | | 65 | | | 90 | | | 150 | | | 210 | | | 300 | | | 360 | | | | | |
| | | S | M | S | S | M | I | S | M | I | S | M | I | S | M | I | S | M | I | | | |
| 1 |  | | | | 130 | 70 | 70 | 120 | 70 | 70 | 105 | 65 | 65 | 100 | 65 | 65 | | | | 80 | 60 | 60 |
| 2 | | | | | 120 | 70 | 70 | 110 | 65 | 65 | 100 | 65 | 65 | 95 | 60 | 60 | | | | 85 | 60 | 60 |
| 3 | | | | | 130 | 75 | 75 | 120 | 70 | 70 | 105 | 65 | 65 | 100 | 65 | 65 | | | | 85 | 60 | 60 |
| 4 | | | | | 140 | 75 | 75 | 125 | 75 | 75 | 110 | 70 | 70 | 105 | 70 | 70 | | | | 95 | 65 | 65 |
| 5 | | | | | 135 | 65 | 65 | 125 | 65 | 65 | 115 | 60 | 60 | 105 | 60 | 60 | | | | 95 | 65 | 65 |
| 6 | | 890 | 45 | 230 | 145 | | | 140 | 130 | | 120 | 125 | | 95 | 120 | | 85 | 110 | | | | |
| Temperaturas medi- das | | 890 | 45 | 230 | 135 | 70 | 140 | 140 | 120 | 70 | 120 | 110 | 65 | 95 | 105 | 65 | 85 | 90 | 60 | | | |

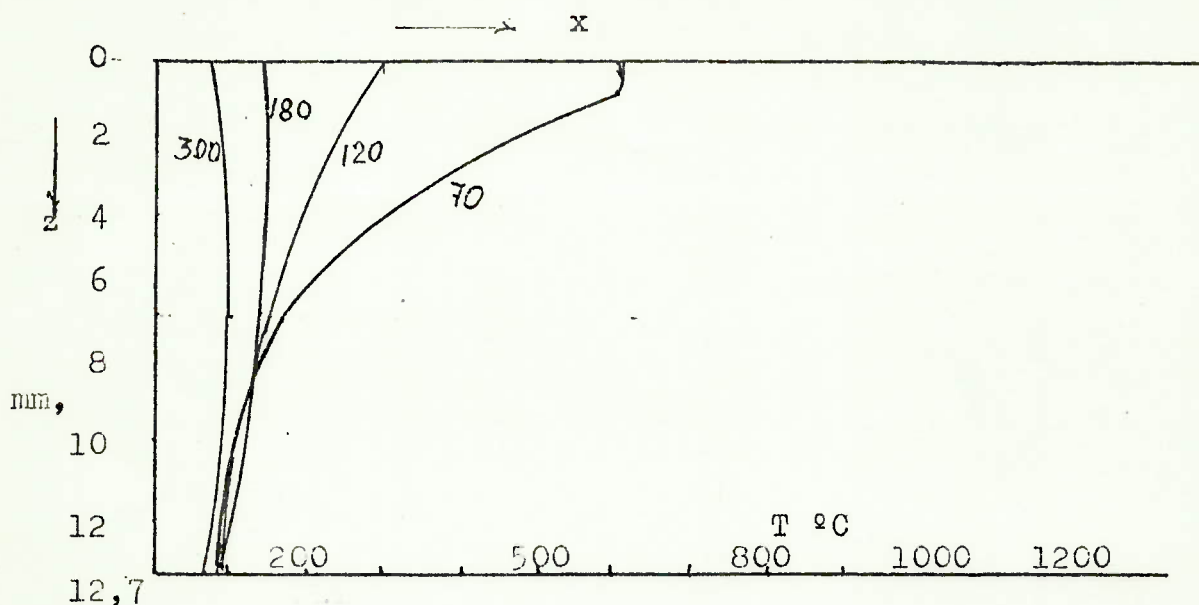


Fig. 2.6 - Distribuição de temperaturas na chapa de 12,7 mm (1/2") ao longo do eixo z, para $x = \text{Cte.}$ e $y = 0$ nos instantes 70, 120, 180 e 360 segundos. Dados extraídos da tabela 2.4 .

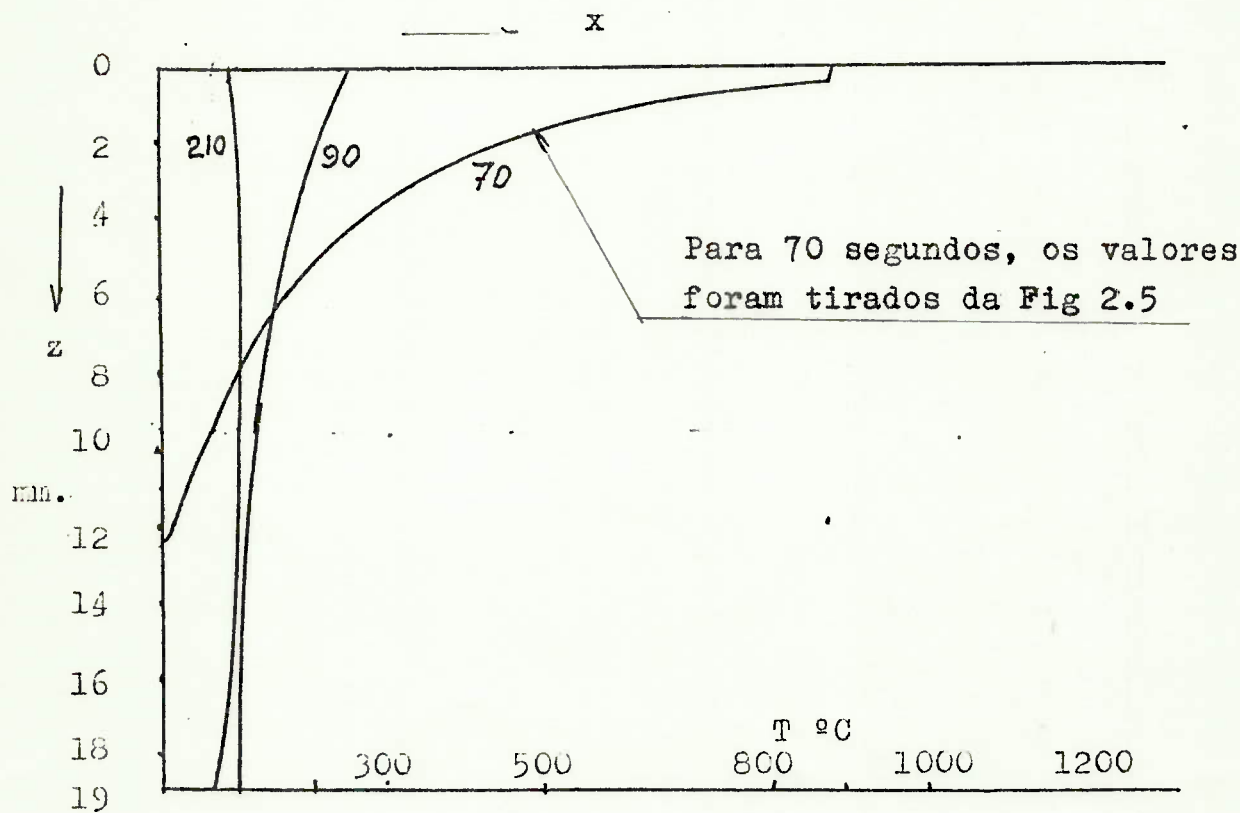


Fig. 2.7 - Distribuição de temperaturas na chapa de 19,05 mm (3/4"), ao longo do eixo z, para $x = \text{Cte.}$ e $y = 0$ nos instantes 70, 90 e 210 segundos. Dados extraídos da tabela 2.5 .

N.B. : $x = \text{Constante}$, designa qualquer ponto do eixo x, os quais apresentam sucessivamente a mesma temperatura.

2.7 MEDICÃO DE TEMPERATURAS UTILIZANDO APARELHO REGISTRADOR

Neste parágrafo abordamos a medição contínua e simultânea de temperaturas em 6 pontos, com os respectivos termopares, sobre chapa de 500 x 500 x 12,7 mm e posições representadas na Fig 2.8. Para isso utilizamos um aparelho de registro RAPICORDER RMV-5404 e um Milivoltmetro, pertencentes a Div. de Engenharia Naval do IPT. Sua montagem pode ser vista nas fotografias Fig. 2.9 e Fig. 2.10.

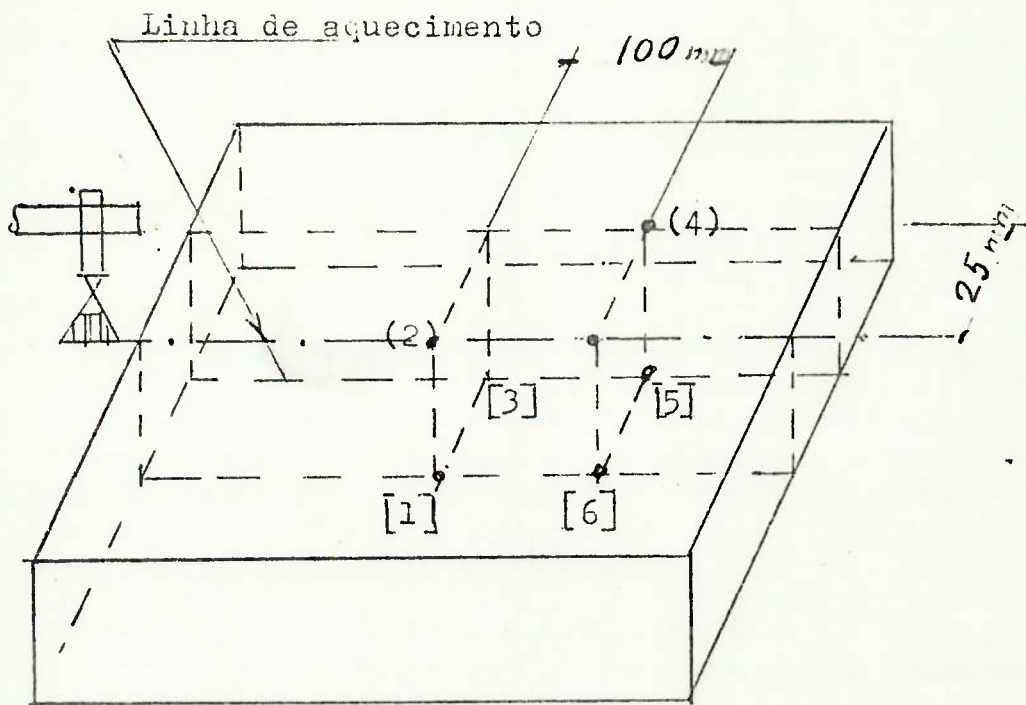


Fig. 2.8 Posição dos pontos levantados por meio do registrador.

Os números entre parênteses indicam os pontos que se localizam na face superior da chapa; e os entre colchetes, na face inferior, ou seja, no lado oposto à chama

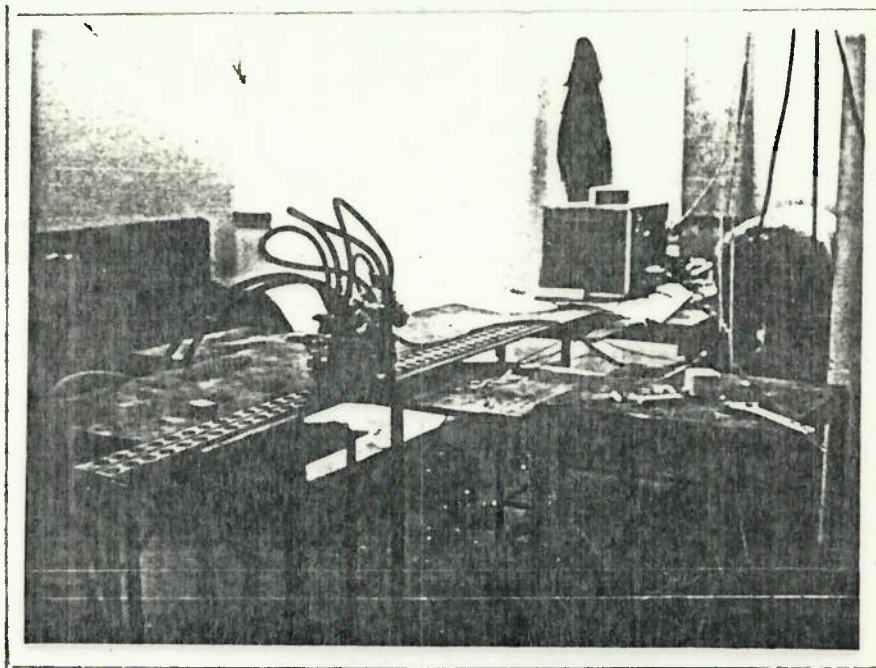


Fig. 2.9 Montagem de bancada para utilização do registrador

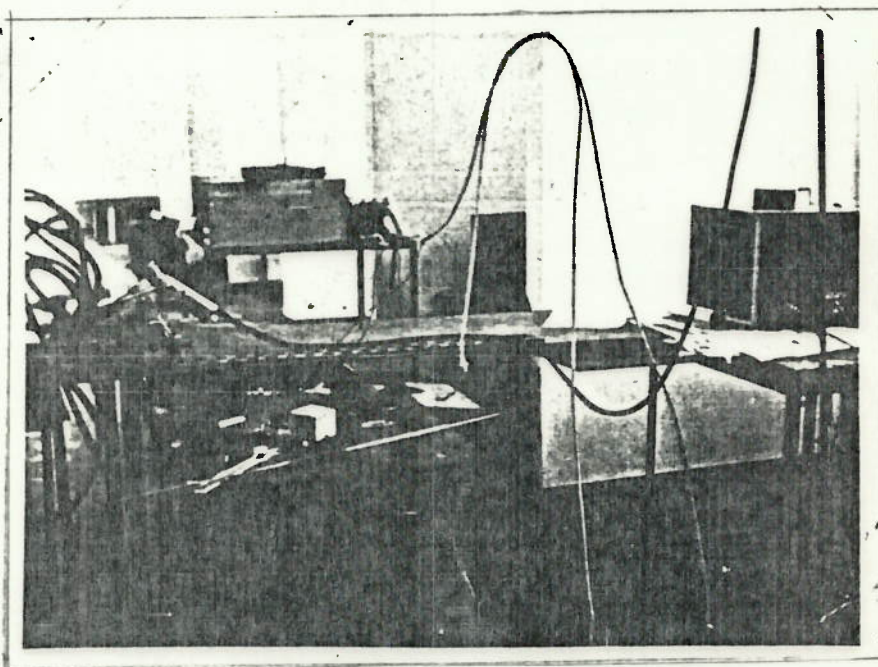


Fig. 2.10 Outra vista da bancada para medição com registrador.

As Figs. 2.9 e 2.10 apresentam fotografias que ilustram a montagem da bancada para efetuar medições com aparelho registrador.

2.8 PROCEDIMENTOS PARA MEDIDAS COM O REGISTRADOR

Esta série de ensaios foi realizada com chapa de 12,7 mm (1/2"), utilizando um dispositivo de aquecimento móvel com velocidade de 5 mm por segundo, um aparelho registrador, ligando os pontos de medida nos respectivos canais e um milivoltímetro para o monitoramento do ponto (2). Quando a chama atingia a chapa, ligava-se o registrador para a obtenção de gráficos do tipo apresentado nas figuras 2.11 e 2.12. Neles podemos constatar que o ponto (2) - (fig. 2.12) - mostrou ser um ponto crítico para o ajuste do canal registrador, sendo que não foi possível registrar o ponto de curso máximo, pois a pena saiu do papel, para retornar posteriormente imprimindo uma linha mais larga, devido a ruídos introduzidos nesse ponto de medida. Os gráficos mostram o formato das curvas e neles está indicada a escala de temperaturas máximas aproximadas, de 350°C no ponto 1 e 70°C para os pontos 3 e 5 na fig. 2.11, e de 105°C para os pontos 2 e 6 na fig. 2.12. Em alguns ensaios, modificamos os ganhos da cabeça registradora do ponto (2), a fim de melhorar o registro deste ponto, mas não obtivemos resultado.

Esta experiência foi prejudicada por não ter sido efetuada uma exploração aproximada do campo de temperaturas e pela falta de instrumentação complementar, adequada ao exame destes fenômenos; mesmo assim, o formato confirma as curvas obtidas com instrumentação mais simplificada, conforme indicamos nos parágrafos 2.5 e 2.6.

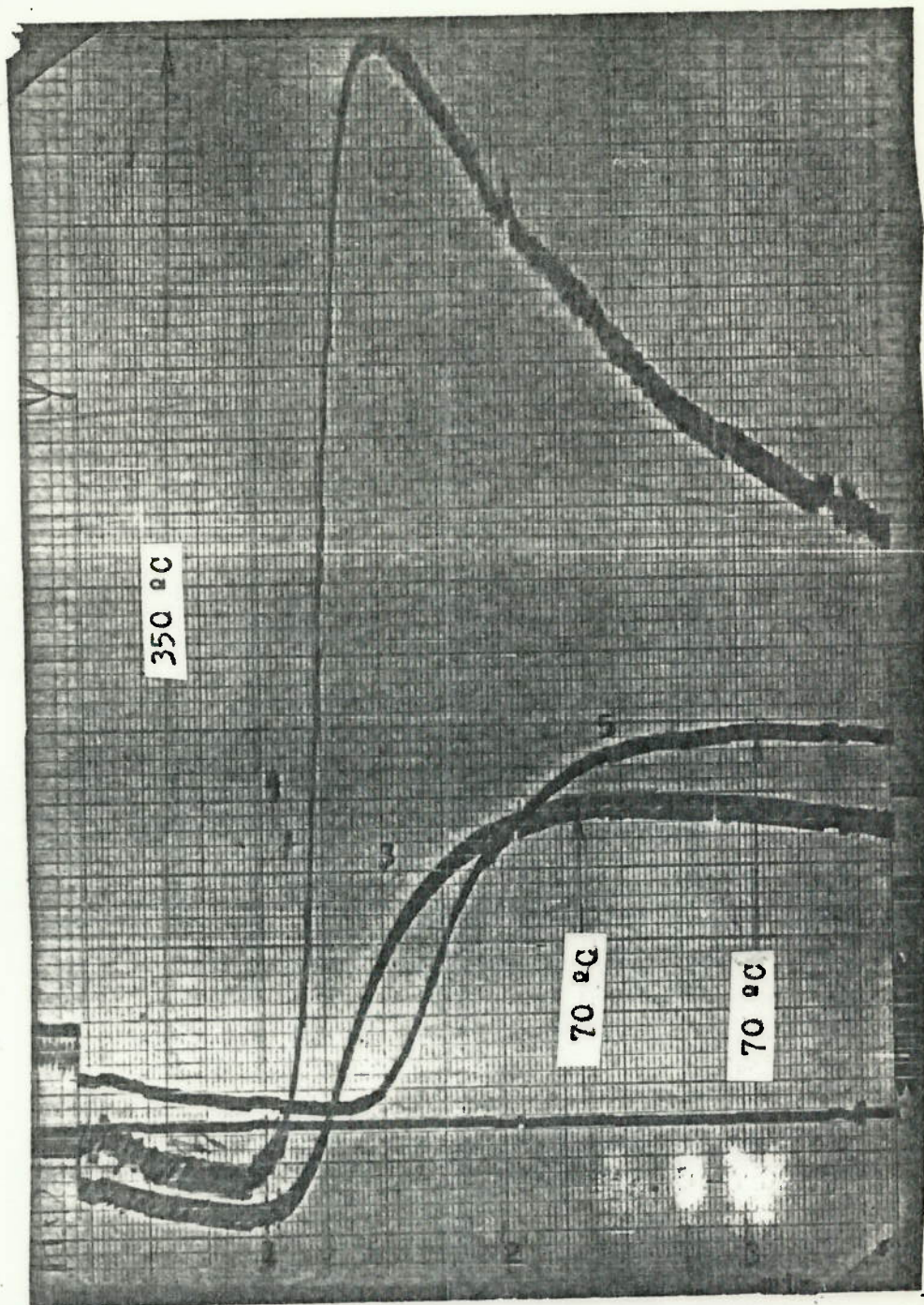


Fig. 2.11 Curvas para os pontos [3], (4) e [5]

Curvas obtidas com aparelho registrador para os pontos [3] (4) e [5]

Nota: As escalas de temperatura são aproximadas.

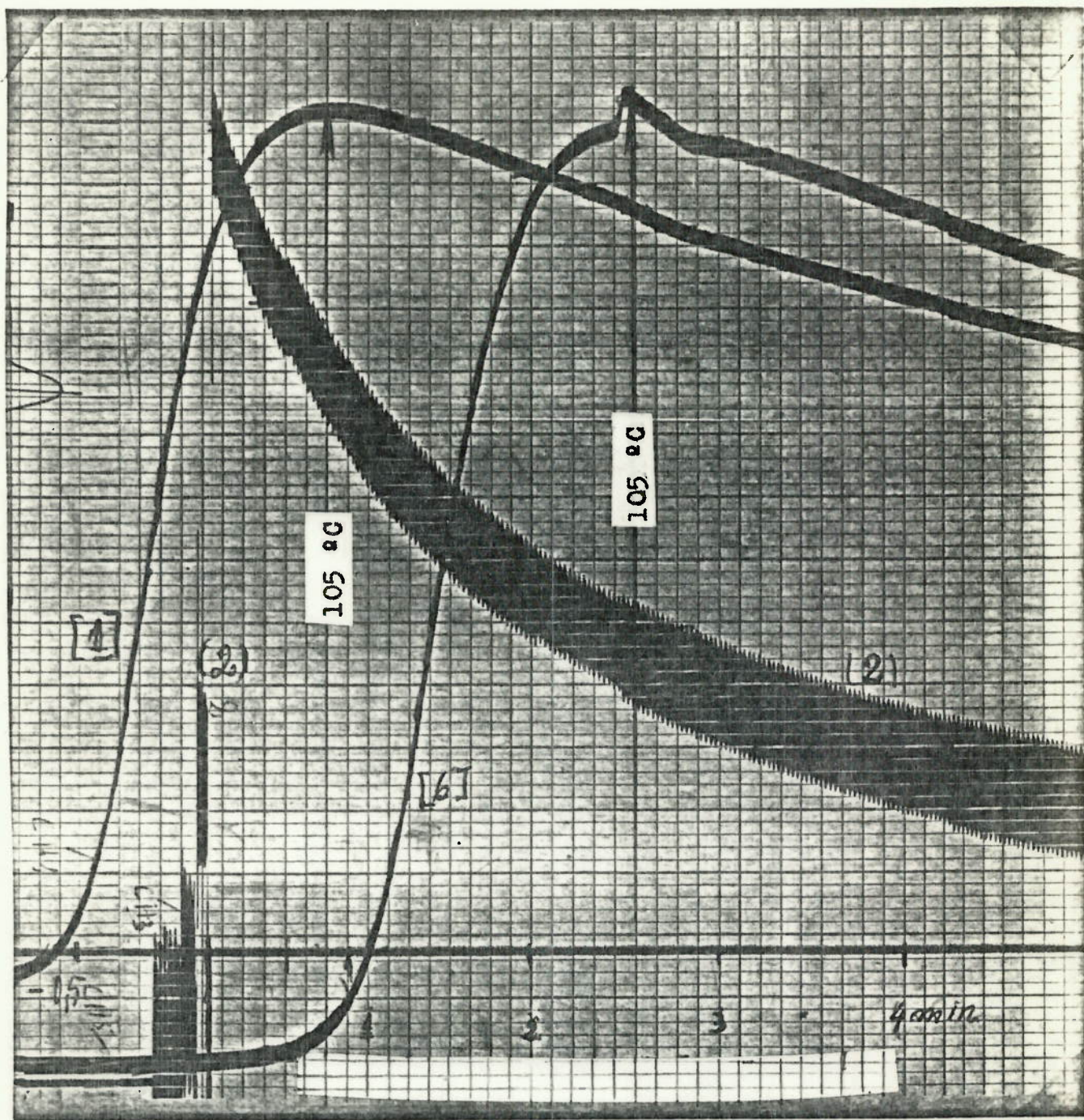


Fig. 2.12 Curvas para os pontos [1] (2) e [6]

Neste registro o ponto (2) desaparece no ponto máximo por ultrapassar a voltagem ajustada na cabeça registradora do aparelho.

2.9 - CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE O TRABALHO DE LABORATÓRIO

Na realização das experiências de laboratório foi seguida uma técnica simplificada, a qual se mostrou eficiente para esta pesquisa, pois não possuíamos equipamento para a automatização do processo. além de não acharmos bibliografia que nos pudesse ajudar na técnica de trabalho. Por estas razões, a sistemática utilizada nos conduziu a resultados com certas limitações, entre as quais citamos:

- 1º) a de não se poder efetuar medições a curtos intervalos de tempo, como seria desejável quando há rápidas variações na temperatura, como ocorre nos pontos situados no lado da chama.
- 2º) Não permitiu, inclusive, a definição da temperatura máxima no lado oposto à chama, por esta ser de lenta variação.

Não foi realizada a calibração dos termopares colocados na chapa por dificuldade de ordem técnica, e também pela razão dos resultados obtidos serem próximos dos que constam no trabalho de Beyer (5), o qual examinaremos no parágrafo 3.5.

O exame de duas únicas chapas, com espessura de 12,7 e 19,05 mm não nos permite generalizar conclusões em relação a estas dimensões considerando que seria de interesse examinar três ou quatro chapas, cujas espessuras se situassem dentro da gama mais utilizada na construção naval.

CAPITULO III

CONSIDERAÇÕES SOBRE OS TRABALHOS EXISTENTES

3.1 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

Embora os trabalhos sobre conformação à chama de chapa contêm com uma bibliografia maior, já o mesmo não se dá com os estudos sobre distribuição de temperaturas, sendo que estudos sobre casos de aquecimento de chapas de aço pela chama oxí-acetilênica em movimento são ainda mais escassos

Por esta razão consultaram-se fontes bastante genéricas, onde o problema é tratado de maneira abrangente e as equações encontradas poderão representar convenientemente alguns fenômenos, enquanto que outras necessitam de correções para se conseguirem valores próximos dos experimentais. A este tipo de bibliografia pertencem a obra de Schneider (4) "Conduction Heat Transfer" e a de Carslaw (3) "Conduction of Heat in Solids".

Outro tipo de fonte que está relacionado com o problema em questão, é o trabalho de Rosenthal (2) "The Theory of Moving Source of Heat and its Application to Metal Treatments", o qual fez aplicação das equações ao processo de solda à arco elétrico.

Por último, os trabalhos de Taniguchi(1) e Beyer (5),(6), os quais citaremos com mais frequência, seriam os únicos que realmente abordam o problema da distribuição de temperaturas na chapa de aço, causado por fonte de calor móvel.

Na parte relativa às experiências de laboratório, foram consultadas bibliografias sobre termopares e técnicas de procedimento (9) mas pouca informação tem-se encontrado sobre tais assuntos que servisse de real auxílio para aprimorar os métodos utilizados.

3.2 FONTE DE CALOR LINEAR EM MOVIMENTO EM CHAPA DE AÇO

Examinamos neste paragrafo a fonte de calor linear em movimento, cuja equação de distribuição de temperatura deduzida para o fenómeno é semelhante a encontrada por Carslaw (parágrafo 3.3) para a fonte puntiforme móvel, com a diferença de não ser levadas em conta as reflexões, isto é, os termos somatorios do segundo membro da equação (4) .

Para efectuar os calculos considera-se a quantidade de calor transferida pela fonte linear na faixa unitaria igual a da fonte puntiforme, com isto poderemos relacionar os valores fornecidos pela equação com os obtidos nas experiencias de laboratorio para a fonte puntiforme.

Da publicação de Schneider (4) extraímos a formula da distribuição de temperaturas para a fonte linear dada a seguir:

$$T = T_0 + \frac{q}{2\pi\lambda} e^{-\frac{v}{2\lambda}w} \cdot K_0\left(\frac{v}{2\lambda}r\right) \quad (1)$$

onde $r^2 = w^2 + y^2$

Nesta equação observa-se um ponto ficticio na origem onde $T = \infty$ quando $r \rightarrow 0$. Isto é consequencia do modelo matematico que supõe ser a fonte uma linha, quando na realidade ocupa um determinado volume.

A equação (1) será transformada para o nosso caso em estudo, substituindo-se as constantes físicas pelos valores correspondentes ao fenómeno, a fim de obter, diretamente nas tabelas da referência bibliográfica (8), os valores das funções $e^{-\frac{v}{2\lambda}w}$ e $K_0\left(\frac{v}{2\lambda}r\right)$ e calcular com mais rapidez as temperaturas nos pontos respectivos.

3.2.1 CÁLCULOS NUMÉRICOS UTILIZANDO A EQUAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURAS PARA FONTE LINEAR.

A utilização da equação(1) implica em conhecer previamente o valor da variável q , denominada quantidade de calor transferida na unidade de tempo e que representa o insumo de calor absorvido pela chapa durante o processo de aquecimento.

Utilizando-se as equações e valores das constantes físicas dados na referência (1) tem-se:

$$q = \eta \left(\frac{Q_{est.} \times V_{ac} \times \gamma_{ac}}{Mol_{ac} \times 3,6 \times 10^3} \right) \quad (\text{cal/s}) \quad (2)$$

Para o caso da chapa de 12,7 mm (1/2"),

$$Q_{est} = 106.500 \text{ cal/gmol}$$

$$V_{ac} = 1000 \text{ l/hora}$$

$$Mol_{ac} = 14,0 \text{ g}$$

$$\gamma_{ac} = 1,179 \text{ g/l}$$

$$\eta = 0,56 \text{ para } V_{ac} = 1000 \text{ l/hora}$$

$$\lambda = 10^{-2} \text{ cal/mm.s.}^\circ\text{C}$$

$$\chi = 10 \text{ mm}^2 / \text{s}$$

$$q = 0,56 \frac{106.500 \times 1000 \times 1,179}{14 \times 3,6 \times 10^3} = 1,395 \times 10^3 \text{ cal/s}$$

$$\frac{q}{2\pi\lambda} = 2,2202 \times 10^4 \text{ mm.}^\circ\text{C}$$

Com estes valores e a velocidade da fonte de $v=5 \text{ mm/s}$, a equação toma a forma

$$T - T_0 = 2,2202 \times 10^4 e^{-\frac{w}{4}} \times K_0 \left(\frac{r}{4} \right) \quad (3)$$

Esta expressão é a que será utilizada para os cálculos de temperatura sendo seus valores apresentados nas tabelas 3.1

e 3.2

TABELA 3.1 Temperaturas ao longo de w , numa faixa de largura unitária, causada por fonte de calor móvel, em chapa de aço com espessura infinita.

| w (mm) | $\frac{w}{4}$ | $e^{-\frac{w}{4}}$ | r | $\frac{r}{4}$ | $K_0 \left(\frac{r}{4} \right)$ | $T - T_0$ |
|-------------|---------------|----------------------|-----|---------------|----------------------------------|-----------|
| 10 | 2,5 | $8,21 \cdot 10^{-2}$ | 10 | 2,5 | 0,063 | 12,2 |
| 8 | 2 | $1,35 \cdot 10^{-1}$ | 8 | 2 | 0,113 | 359 |
| 4 | 1 | 0,367 | 4 | 1 | 0,421 | 3,560 |
| 2 | 0,5 | 0,606 | 2 | 0,5 | 0,923 | 12.500 |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | | |
| -2 | -0,5 | 1,648 | 2 | 0,5 | 0,923 | 34.000 |
| -4 | -1 | 2,718 | 4 | 1 | 0,421 | 25.500 |
| -8 | -2 | 7,389 | 8 | 2 | 0,113 | 18.900 |
| -10 | -2,5 | 12,180 | 10 | 2,5 | 0,063 | 16.800 |
| -20 | -5 | 148,4 | 20 | 5 | | 12.350 |
| -40 | -10 | | 40 | 10 | | 8.750 |

Os valores da temperatura mostram-se muito altos comparados com os obtidos em laboratório, Tabela 2.1. As temperaturas experimentais não ultrapassam 1200 °C.

TABELA 3.2 Temperaturas ao longo de w , numa faixa de largura unitária e distante 12,7 mm (1/2") daquela pela qual passa a fonte de calor linear móvel, em chapa de aço de espessura infinita.

| w (mm) | $\frac{w}{4}$ | $e^{-\frac{w}{4}}$ | r | $\frac{r}{4}$ | $K_0 \left(\frac{r}{4} \right)$ | $T - T_0$ (°C) |
|-------------|---------------|--------------------|-------|---------------|----------------------------------|-------------------|
| 10 | 2,5 | 0,082 | 16,15 | 4,04 | 0,0112 | 21 |
| 4 | 1 | 0,367 | 13,3 | 3,32 | 0,024 | 190 |
| 2 | 0,5 | 0,606 | 12,8 | 3,20 | 0,028 | 380 |
| 0 | 0 | 1 | 12,7 | 3,18 | 0,0275 | 640 |
| -2 | -0,5 | 1,648 | 12,8 | 3,20 | 0,027 | 1040 |
| -4 | -1 | 2,718 | 13,3 | 3,32 | 0,024 | 1400 |
| -8 | -2 | 7,289 | 15 | 3,75 | 0,015 | 2400 |
| -10 | -2,5 | 12,18 | 16,15 | 4,04 | 0,011 | 3000 |
| -16 | -4 | 56,59 | 20,45 | 5,10 | 0,0035 | 4340 |
| -25 | -7 | 1096,0 | 31,4 | 7,85 | 0,00017 | 4300 |

Os valores da temperatura mostram-se muito elevados comparados com os de laboratório na Tabela 2.2. As temperaturas experimentais não ultrapassam 200 °C.

3.3 DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURAS PARA FONTE PUNTIFORME MÓVEL SEGUNDO CARSLAW.

O autor, em sua obra citada na referência bibliográfica (3), chega à equação de distribuição de temperaturas em chapas,, devido à fonte de calor móvel puntiforme, seguindo várias etapas, as quais são indicadas abaixo, sem nos adentrar nos detalhes de seu desenvolvimento:

- a) Determina a equação para fonte instantânea de calor puntiforme. Para isto define a fonte instantânea como sendo a quantidade de calor finita liberada instantaneamente em um ponto do sólido considerado infinito. A solução é obtida baseando-se na teoria potencial aplicada ao fenômeno de transferência de calor.
- b) Partindo da equação de temperatura anterior e integrando em relação ao tempo, obtém a temperatura para a fonte permanente de calor.
- c) Considerada a fonte de calor móvel permanente em regime estacionário, faz a transformação das equações para o sistema em movimento e após integração obtém a equação de distribuição de temperaturas em um sólido infinito.
- d) Para o sólido de espessura finita ($z=0$ e $z=h$) e fonte instantânea puntiforme, o autor imagina o sólido contínuo nas outras duas direções, e pela colocação de planos especulares imaginários normais à direção z , nos quais se reflete o fluxo de calor, obtém-se a distribuição de fontes e servedouros que fornecem a função temperatura.

Utilizando as funções de Green, e através de algumas transformações algébricas tem-se como resultado a equação de temperaturas para a fonte instantânea puntiforme em sólido finito.

- e) Fonte permanente em movimento sobre a superfície de uma chapa.

Este problema é análogo ao proposto em c), com a diferença da espessura finita, o que nos obriga a utilizar as equações deduzidas no item d). Através de nova integração chega-se ao resultado final, isto é, a equação de distribuição de temperaturas:

$$T - T_0 = \frac{q}{2\pi\lambda} \left\{ K_0\left(\frac{vr}{2\chi}\right) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} K_0 \left[\frac{vr}{2\chi} \left(1 + \frac{4\chi^2 n^2 \pi^2}{v^2 h^2}\right)^{1/2} \right] \cos \frac{n\pi z}{h} \right\} e^{-\frac{vr}{2\chi}} \quad (4)$$

onde $r = \sqrt{w^2 + y^2 + z^2}$

$K_0\left(\frac{vr}{2\chi}\right)$ = função de Bessel modificada de 2ª espécie e de ordem zero

n = número de reflexões

Substituindo na equação (4), os valores, abaixo relacionados, que foram extraídos da referência bibliográfica (1)

h = espessura da chapa = 12,7 mm (1/2")

v = velocidade da fonte = 5 mm/s

χ = difusividade térmica = 10 mm²/s

$\frac{q}{2\pi\lambda h} = 1,7 \times 10^3$ °C

λ = condutibilidade térmica = 0,01 cal/mm.s.°C

Chegamos a equações mais simplificadas para o cálculo numérico, como as indicadas a seguir:

Para $z = 0$, ou seja, do lado da chama.

$$T - T_0 = 1,7 \times 10^3 e^{-\frac{w}{4}} \left\{ K_0\left(\frac{r}{4}\right) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} K_0 \left[\frac{r}{4} \sqrt{1 + 0,98 n^2} \right] \right\} \quad (5)$$

Para $z = h$, lado oposta ao da chama.

$$T - T_0 = 1,7 \times 10^3 e^{-\frac{w}{4}} \left\{ K_0\left(\frac{r}{4}\right) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} K_0 \left[\frac{r}{4} \sqrt{1 + 0,98 n^2} \right] \cos n\pi \right\} \quad (6)$$

Com estas equações (5) e (6), obtivemos os resultados apresentados nas Tabelas 3.3 e 3.4.

TABELA 3.3 Temperaturas, calculadas pela equação de Carslaw, em chapa de aço de 12,7 mm (1/2") de espessura no lado da chama.

| W (mm) | r (mm) | $e^{-W/4}$ | $K_0 \left(-\frac{r}{4} \right)$ | $2 \sum_{n=1}^{\infty} K_0 \left(\frac{r}{4} \sqrt{1+0,98n^2} \right)$ | $K_0 \left(\frac{r}{4} \right) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} K_0 \left(\frac{r}{4} \sqrt{1+0,98n^2} \right)$ | $e^{W/4} \left\{ K_0 \left(\frac{r}{4} \right) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} K_0 \left(\frac{r}{4} \sqrt{1+0,98n^2} \right) \right\}$ | T - T ₀ |
|--------|--------|-------------------------|-----------------------------------|---|---|---|--------------------|
| 20 | 20 | 6,73 · 10 ⁻³ | 0,00404 | 0,00046 | 0,0045 | 3,01 · 10 ⁻⁵ | 0,05 °C |
| 10 | 10 | 8,21 · 10 ⁻³ | 0,063 | 0,019 | 0,082 | 7,22 · 10 ⁻³ | 12,3 °C |
| 8 | 8 | 1,35 · 10 ⁻¹ | 0,113 | 0,046 | 0,159 | 2,16 · 10 ⁻¹ | 370,0 °C |
| 4 | 4 | 0,367 | 0,421 | 0,330 | 0,750 | 0,275 | 470,0 °C |
| 2 | 2 | 0,606 | 0,923 | 1,290 | 2,210 | 1,340 | 2.280 °C |
| 0 | 0 | 1,0 | | | | | |
| W | r | $e^{-W/4}$ | $K_0 \left(\frac{r}{4} \right)$ | $e^{W/4} \cdot 2 \sum_{n=1}^{\infty} K_0 \left(\frac{r}{4} \sqrt{1+0,98n^2} \right)$ | $e^{W/4} \left\{ K_0 \left(\frac{r}{4} \right) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} K_0 \left(\frac{r}{4} \sqrt{1+0,98n^2} \right) \right\}$ | T - T ₀ | |
| -2 | 2 | 1,524 | | 2,940 | 4,464 | 7.600 °C | |
| -4 | 4 | 1,140 | | 0,895 | 2,035 | 3.460 °C | |
| -8 | 8 | 0,841 | | 0,341 | 1,182 | 1.990 °C | |
| -10 | 10 | 0,759 | | 0,230 | 0,989 | 1.690 °C | |
| -20 | 20 | 0,542 | | 0,068 | 0,610 | 1.160 °C | |
| -40 | 40 | 0,391 | | — | 0,392 | 690 °C | |

TABELA 3.4 Temperaturas, calculadas pela equação de Carslaw, em chapa de aço de 12,7 mm (1/2") de espessura no lado oposto ao da chama.

| W (mm) | w/4 | r (mm) | r/4 | $e^{-w/4}$ | $K_q (r/4) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K_0(\frac{r}{4} \sqrt{1+0,98n^2})}{n^2} / \cos \eta r$ | $K_0 \left[\frac{r}{4} \sqrt{1+0,98n^2} \right] \cos \eta r$ | $K_0 \left[\frac{r}{4} \sqrt{1+0,98n^2} \right] \cdot \cos \eta r$ | T-T ₀ |
|-----------|------|-----------|-------|----------------------|---|---|---|------------------|
| -40 | 10 | 41,9 | 10,05 | $4,5 \cdot 10^{-5}$ | | | 0,008 | |
| -20 | -5 | 23,7 | 5,87 | $6,73 \cdot 10^{-3}$ | | | 0,010 | |
| -10 | -2,5 | 16,1 | 4,02 | $8,21 \cdot 10^{-2}$ | | | 0,015 | |
| -8 | -2 | 15,0 | 3,75 | 0,135 | | | 0,017 | 9°C |
| -4 | -1 | 13,3 | 3,30 | 0,367 | | | 0,018 | 17°C |
| -2 | -0,5 | 12,9 | 3,23 | 0,606 | | | 0,017 | 27°C |
| 0 | 0 | 12,7 | 3,16 | 1,0 | | | 0,017 | 45°C |
| 2 | 0,5 | 12,9 | 3,23 | 1,52 | | | 0,015 | 75°C |
| 4 | 1,0 | 13,3 | 3,30 | 2,71 | | | 0,010 | 125°C |
| 8 | 2,0 | 15,0 | 3,75 | 7,38 | | | 0,008 | 167°C |
| 10 | 2,5 | 16,1 | 4,02 | 12,18 | | | | |
| 20 | 5 | 23,7 | 5,87 | 148,0 | | | | |
| 40 | 10 | 41,9 | | | | | | |

3.3.1 COMENTÁRIOS SOBRE A EQUAÇÃO DE CARSLAW

Felos resultados de tabela 3.3, chega-se a valores muito altos, comparados com os resultados experimentais, ver tabela 2.2, além de apresentar um ponto singular de valor infinito.

Para o lado oposto ao da chama, tabela 3.4, utiliza-se o valor de $r = \sqrt{h^2 + w^2}$, e os valores obtidos foram próximos dos reais, ver tabela 2.2.

Neste cálculo foi considerado $n = 1, 2, 3$ e 4 reflexões. Paramos na 4ª reflexão devido as dificuldades envolvidas no cálculo e a menor influência que tem as reflexões seguintes nos resultados finais.

A fim de contornar os valores discrepantes obtidos no lado da chama, assim como o valor infinito da temperatura quando $r \rightarrow 0$, podemos imaginar um valor de limite inferior para $y = \pm 5$ mm, equivalendo isto a suprimir nos cálculos uma faixa de 10 mm de largura, justificando-se este procedimento em razão de a fonte de calor real ter aproximadamente 10 mm de diâmetro e não ser de natureza puntiforme como é suposto na dedução da equação. Podemos também levar em conta a variação da condutibilidade térmica, a qual é suposta constante através da espessura da chapa, o que contribuirá a fornecer-nos valores mais próximos dos reais.

Os argumentos para aproveitar esta equação se justificam em razão da generalidade da mesma, para a qual não temos encontrado alternativas na bibliografia consultada. Somente a equação de Rosenthal apresenta a mesma generalização, mas também envolve problema de ajuste semelhante, como veremos mais adiante.

3.4 DISTRIBUIÇÃO DA TEMPERATURA SEGUNDO ROSENTHAL

Rosenthal em seu trabalho (2) desenvolve a teoria sobre fontes de calor em movimento e faz a aplicação a alguns processos metalúrgicos, dentre os quais a solda por arco elétrico.

Para a obtenção da equação de distribuição de temperaturas faz as hipóteses a seguir:

- As características físicas do metal, λ condutibilidade térmica, e χ , difusividade térmica, são independentes da temperatura.
- A velocidade v da fonte e o calor transferido q na unidade de tempo são constantes.
- O fenómeno é quase-estacionário, isto é, a distribuição de temperaturas através da chapa pode ser considerada estacionária para um observador localizado na fonte de calor e movendo-se com ela.

Adapta a equação de Fourier, que governa o fenómeno de transferencia de calor, ao regime quase-estacionário e utiliza o método das imagens de Carslaw para chegar a equação de distribuição em sólido finito, dada a seguir:

$$T - T_0 = \frac{q}{2\pi\lambda} e^{-\frac{x}{2\chi}w} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{e^{-\frac{x}{2\chi}R_n}}{R_n} \quad (7)$$

Para facilitar o cálculo numérico, esta expressão é apresentada no trabalho de Taniguchi (1) na seguinte forma:

$$T = T_0 + \frac{q}{2\pi\lambda} e^{-\frac{x}{2\chi}w} \left[\frac{e^{-\frac{x}{2\chi}R}}{R} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{e^{-\frac{x}{2\chi}R_n}}{R_n} + \frac{e^{-\frac{x}{2\chi}R'_n}}{R'_n} \right) \right]$$

onde

$$R = \sqrt{w^2 + y^2 + z^2} \quad (8)$$

$$R_n = \sqrt{w^2 + y^2 + (z + 2nh)^2}, \quad n = -1, -2, -3, \dots, -\infty$$

$$R'_n = \sqrt{w^2 + y^2 + (z - 2nh)^2}, \quad n = 1, 2, 3, \dots, \infty$$

Os resultados, obtidos com o programa de computador, desta equação serão apresentadas no capítulo IV.

3.5 CAIHO DE TEMPERATURAS LEVANTADO POR BEYER

A conformação de chapas pelo aquecimento com chama oxiacetilênica, também foi estudada por Beyer (5) e (6). Uma parte de seu trabalho consistiu no levantamento de uma série de gráficos de temperaturas em chapas de 10 e 25 mm. As experiências foram executadas em chapas com dimensões $a = b = 700$ mm e espessuras variáveis. A posição do sistema de coordenadas está mostrada na fig. 3.1, sendo que o plano formado pelos eixos x, y coincidem com o plano médio da chapa.

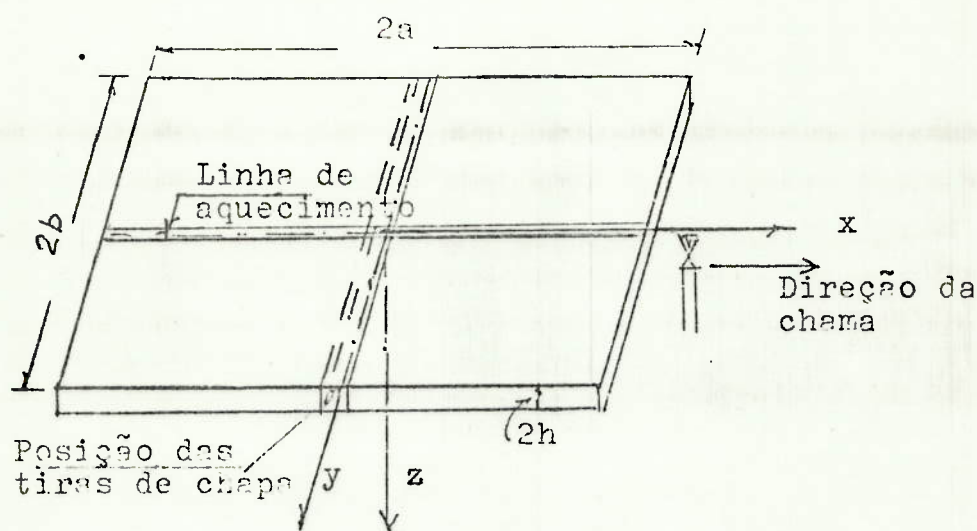


Fig. 3.1 - POSIÇÃO do sistema de cordenadas

Na medição das temperaturas foram utilizados termo-pares de NiCr-Ni em combinação com registradores. A variação da temperatura na direção z , espessura, foi determinada por meio de furos de 4mm de diâmetro e diferentes profundidades. As figs. 3.2 e 3.3 apresentam a variação da temperatura na direção z no ponto $y=0$ e $x=Cte.$ para chapas de 10 e 25 mm.

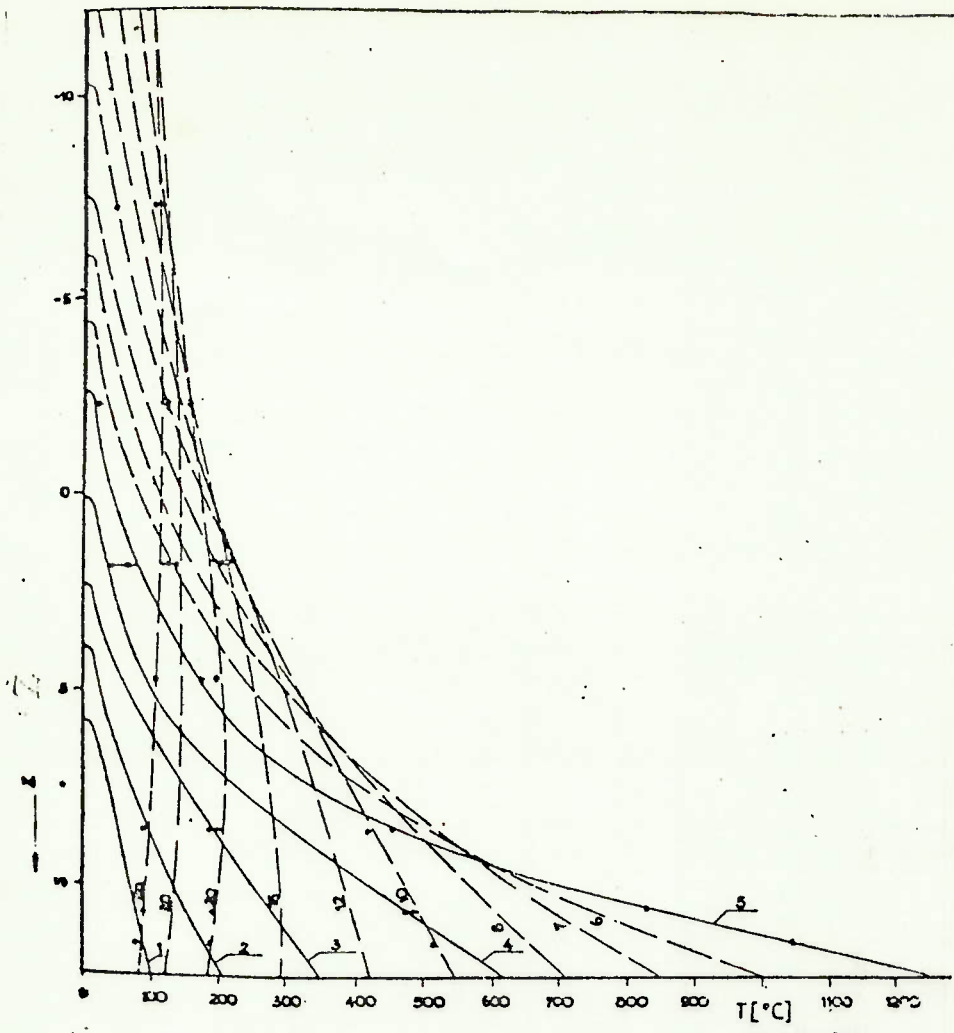


Fig. 3.2 Distribuição da temperatura, em função da espessura, em chapa de 25 mm, no ponto $y = 0$, $x = \text{Cte}$ (Beyer) :

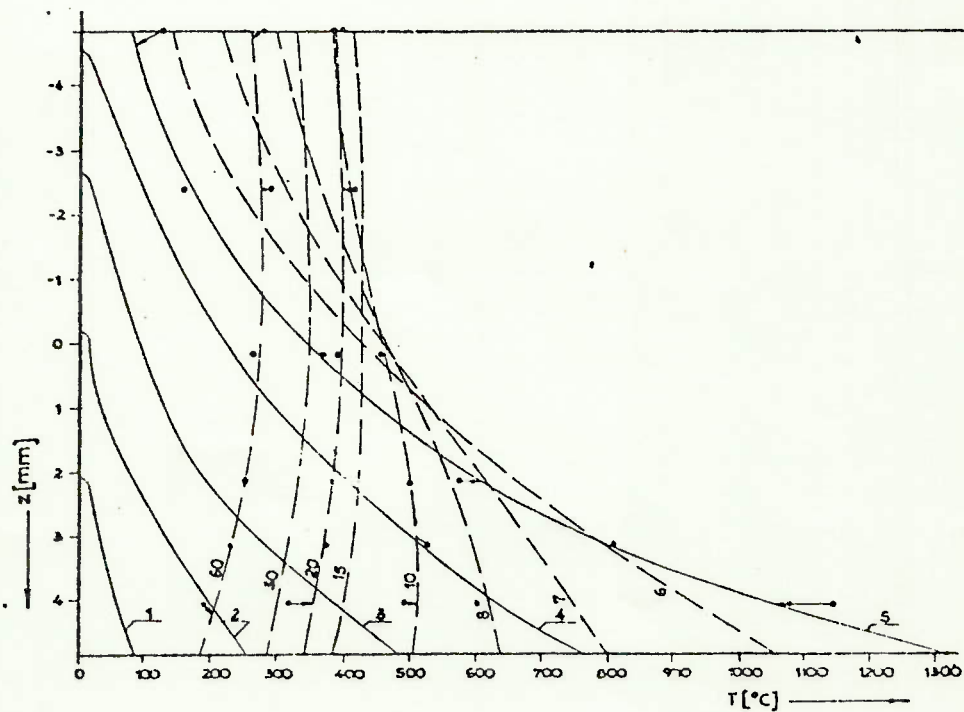


Fig. 3.3 Distribuição da temp. em função da espessura, em chapa de 10 mm, $y = 0$, $x = \text{Cte}$. (Beyer).

As figs. 3.4 e 3.5 mostram a distribuição das temperaturas na direção y em diferentes camadas da chapa de 25 mm de espessura. Os números das curvas indicam o tempo em segundos no qual foi feita a leitura.

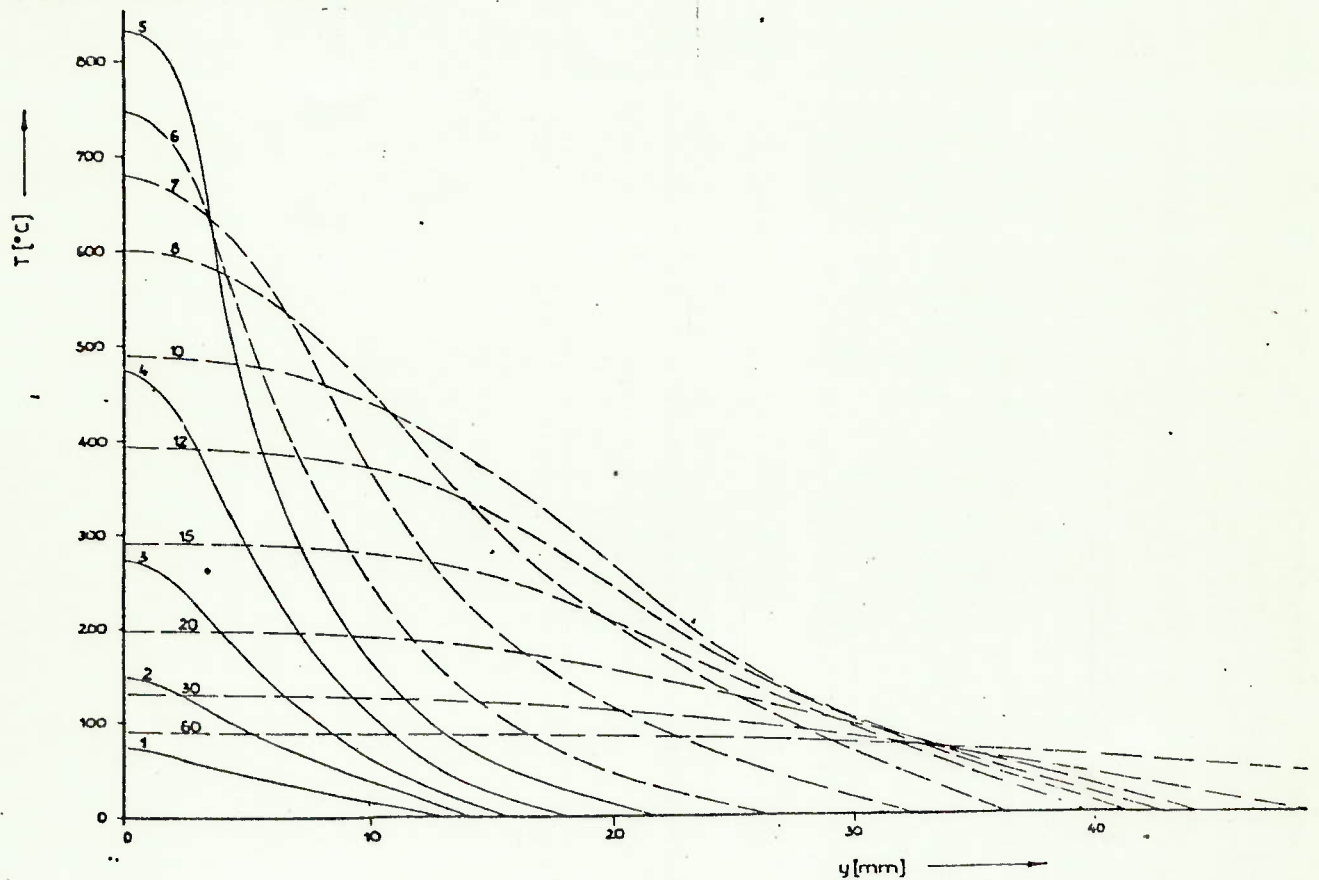


Fig. 3.4 Distribuição da temperatura ao longo de y , $z = 10,7$, $x = \text{Cte.}$, chapa de 25 mm, (Beyer)

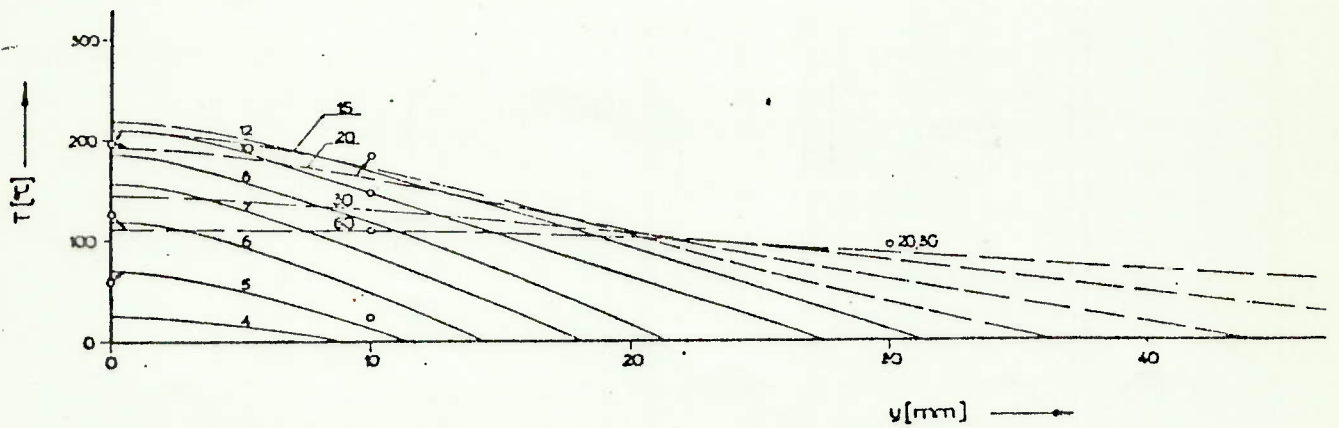


Fig. 3.5 Distribuição da temperatura ao longo de y , no ponto $z = -10,7$, $x = \text{Cte.}$, chapa de 25 mm. (Beyer)

Para compreender melhor os gráficos, esclarecemos que os números sobre as curvas indicam segundos, as curvas contínuas representam as temperaturas antes da fonte atingir o ponto $x = Cte.$ e as curvas tracejadas, as temperaturas após a fonte de calor haver ultrapassado o ponto $x=Cte.$ A utilização de um ponto fixo nos eixo do x se deve ao fato de que nesta direção é suposto que todos os pontos passam pelas mesmas transformações térmicas à medida que a fonte de calor percorre o eixo $x.$

TABELA 3.5 - Temperaturas extraídas dos gráficos de BEYER.

| Valores de T, na Fig. 3.2 para $z=10$ mm, $y=0$, $x= Cte$ | | Valores de T na Fig. 3.4 para $y=10$ mm , $z=0$, $x=Cte$ |
|---|---------|---|
| segundos | T em °C | T em °C |
| 1 | 60 | 15 |
| 2 | 120 | 30 |
| 3 | 230 | 60 |
| 4 | 400 | 110 |
| 5 | 570 | 160 |
| 6 | 630 | 230 |
| 7 | 600 | 370 |
| 8 | 550 | 450 |
| 10 | 450 | 430 |
| 12 | 380 | 380 |
| 15 | 300 | 200 |
| 20 | 200 | 190 |
| 20 | 140 | 130 |
| 60 | 95 | 90 |

Pela leitura das temperaturas no ponto $z = 10$ mm, para $y = 0$ e $x = \text{Cte.}$ em função do tempo em segundos, na Fig. 3.3, obtemos os valores da tabela 3.5, segunda coluna.

As figs. 3.4 e 3.5 mostram a distribuição das temperaturas em duas cotas, $z = 10,7$ e $z = -10,7$ mm na chapa de 25 mm de espessura. Na terceira coluna da Tab. 3.5 apresentamos os valores da temperatura no ponto $y=10$ mm para $z= 0$ e $x = \text{Cte.}$

Uma característica a ressaltar nestes gráficos são os extraordinários gradientes de temperatura e o processo dinâmico de aquecimento. Eles mostram também que somente uma faixa de 50 mm medida ao longo do eixo dos y experimenta temperaturas acima de 200°C , e é de esperar que aí estejam concentradas as deformações térmicas (5).

No segundo trabalho de Beyer (6) encontramos a solução das equações diferenciais parciais não homogêneas, incluindo a variação das propriedades físicas e térmicas do material. Neste trabalho utiliza como curva de distribuição de temperaturas a seguinte função:

$$T = 300 \left(1 - \frac{y^2}{y_R^2} \right) \left(\frac{z^2/2 + z}{10} + 1,05 \right) \quad 9$$

Esta equação, além de ser muito restrita, por não figurarem as variáveis, energia da fonte de calor e sua velocidade; não reflete os altos gradientes de temperatura que ocorrem no processo, nem a dinâmica que ocorre no mesmo.

CAPÍTULO IV

PROGRAMA DE COMPUTADOR PARA A DETERMINAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURAS

4.1 Introdução

Neste capítulo utilizamos o programa de computador original (1) baseado na equação de Rosenthal para obter os valores de distribuição de temperaturas e compará-los com os dados experimentais. Posteriormente, este programa foi modificado para obter os valores da temperatura fornecidos pelo primeiro termo da equação (condução direta), pelo somatório das parcelas refletidas e a soma de todos os termos. Finalmente, efetuamos mudanças no coeficiente de condutibilidade térmica, a fim de se obterem valores mais próximos dos experimentais

4.2 PROGRAMA DE COMPUTADOR

Este programa determina a distribuição de temperatura nos pontos discretizados na área em exame, de tal maneira que as diferenças de temperatura entre duas etapas consecutivas estejam abaixo de um certo valor especificado para cada caso estudado. Esta forma de cálculo é seguida para que o programa possua capacidade para ser aproveitado posteriormente, como subrotina de um programa mais completo para cálculo de deformações e tensões. Com relação ao mesmo programa apresentamos o diagrama de blocos desenvolvido nas figs. 4.4 e 4.5, os dados de entrada na tabela 4.1 e o modelo discretizado na fig. 4.1, sendo que a listagem do programa, de computador, assim como a listagem dos símbolos utilizados nele, são apresentados no apêndice ao fim deste trabalho.

TABELA 4.1 - DADOS DE ENTRADA PARA PROCESSAMENTO NUMÉRICO

| Item | Símbolo | Valores das variáveis de entr. | | |
|---|---------|--------------------------------|---------------|---------------|
| | | caso nº 1 | caso nº 2 | caso nº 3 |
| Nº de ciclos térmicos | NCT | 1 | 1 | 1 |
| Nº de secções do mode. | NSY | 5 | 5 | 5 |
| Nº pontos/ secção | NPZ | 5 | 5 | 5 |
| Condutibilidade term. (cal/mm. s. °C) | CDT | 0,01 | 0,01 | 0,01 |
| Difusiv. term. (mm ² /s) | DIF | 10,0 | 10,0 | 10,0 |
| Vazão/Acetileno (l/h) | VAC | 1000 | 1000 | 1500 |
| Temp. Inicial (°C) | TIC | 20 | 20 | 20 |
| Temper. Máxima (°C) | TEMPM | 950 | 950 | 950 |
| Eficiência do proce. térmico | EFIC | 56,0 | 56,0 | 56,0 |
| Vel. da fonte de calor (mm/s) | VEL | 5 | 5 | 5 |
| Calor teórico de acor- do com reaç. esteq. | QUEST | 106500 | 106500 | 106500 |
| Densidade do Acetil. (g/l) | DENS | 1,179 | 1,179 | 1,179 |
| Molécula gr. de aceti- (g/MOL) | GMOL | 14,0 | 14,0 | 14,0 |
| Meia largura da faixa em estudo mm | YY | 50,00 | 50,00 | 50,00 |
| Espessura de chapa mm | HH | 9,52 3/8 | 12,70 1/2" | 19,05 3/4" |

4.3- EXEMPLOS CALCULADOS

Três casos foram submetidos ao computador, sendo que os dados de entrada para cada um dos problemas escolhidos são apresentados na tabela 4.1 .

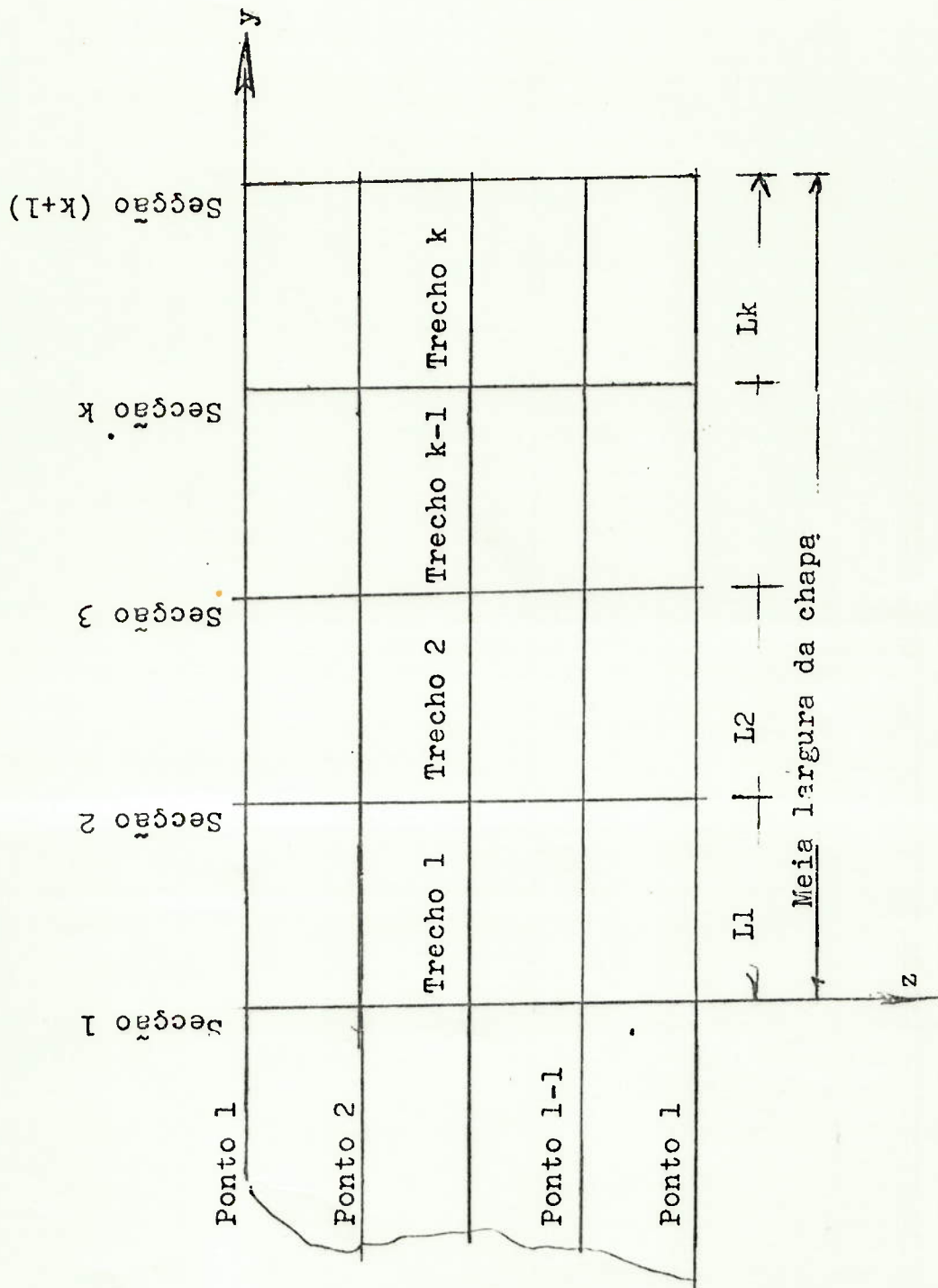


FIGURA 4.1 - MODELO DISCRETIZADO PARA DETERMINAÇÃO DE TEMPERATURAS

TABELA 4.2 - Temperaturas fornecidas pelo programa original da equação nº 16, para chapa de 12,7 mm (1/2"), com velocidade de 5 mm/s , vazão de 1000 l/h de acetileno e limite para temperatura máxima de 850°C.

TEMPERATURAS - °C

| t | Y = 0 mm | | | Y = 6,14 mm | | |
|------|-------------|---------------|--------------|-------------|-------------|---------------|
| | Z = 0 mm | Z = 6,4 mm | Z=12,7 mm | Z = 0 mm | Z=6,4 mm | Z= 12,7 mm |
| -1,0 | 475 | 125 | 54 | 149 | 72 | 42 |
| -0,0 | 850 | 232 | 90 | 352 | 136 | 65 |
| 0 | 850 | 620 | 163 | 786 | 255 | 110 |
| 1,0 | 850 | 850 | 402 | 850 | 590 | 271 |
| 1,5 | 850 | 850 | 518 | 850 | 740 | 359 |
| 5 | 850 | 850 | 678 | 831 | 725 | 635 |
| 10 | 656 | 647 | 640 | 594 | 586 | 580 |
| 20 | 450 | 450 | 450 | 430 | 430 | 430 |
| 32 | 362 | 362 | 362 | 352 | 352 | 352 |
| 55 | 282 | 282 | 282 | 278 | 278 | 278 |
| 112 | 204 | 204 | 204 | 202 | 202 | 202 |

Os valores das temperaturas da tabela acima, para $Y=0$ diferem bastante dos dados de laboratório apresentados na tabela 2.4 .

O máximo da temperatura no ponto médio para $Y=0$ e $z=6,4$, ocorre para $t= 1,5$ segundos, e para o ponto $Y=0$, $Z=0$, na superfície da chapa, para $t=0$ segundos . Esta diferença de 1,5 segundos entre o ponto situado na superfície da chapa e no meio dela é pequena, se comparada com a obtida experimentalmente, que é de 25 segundos.

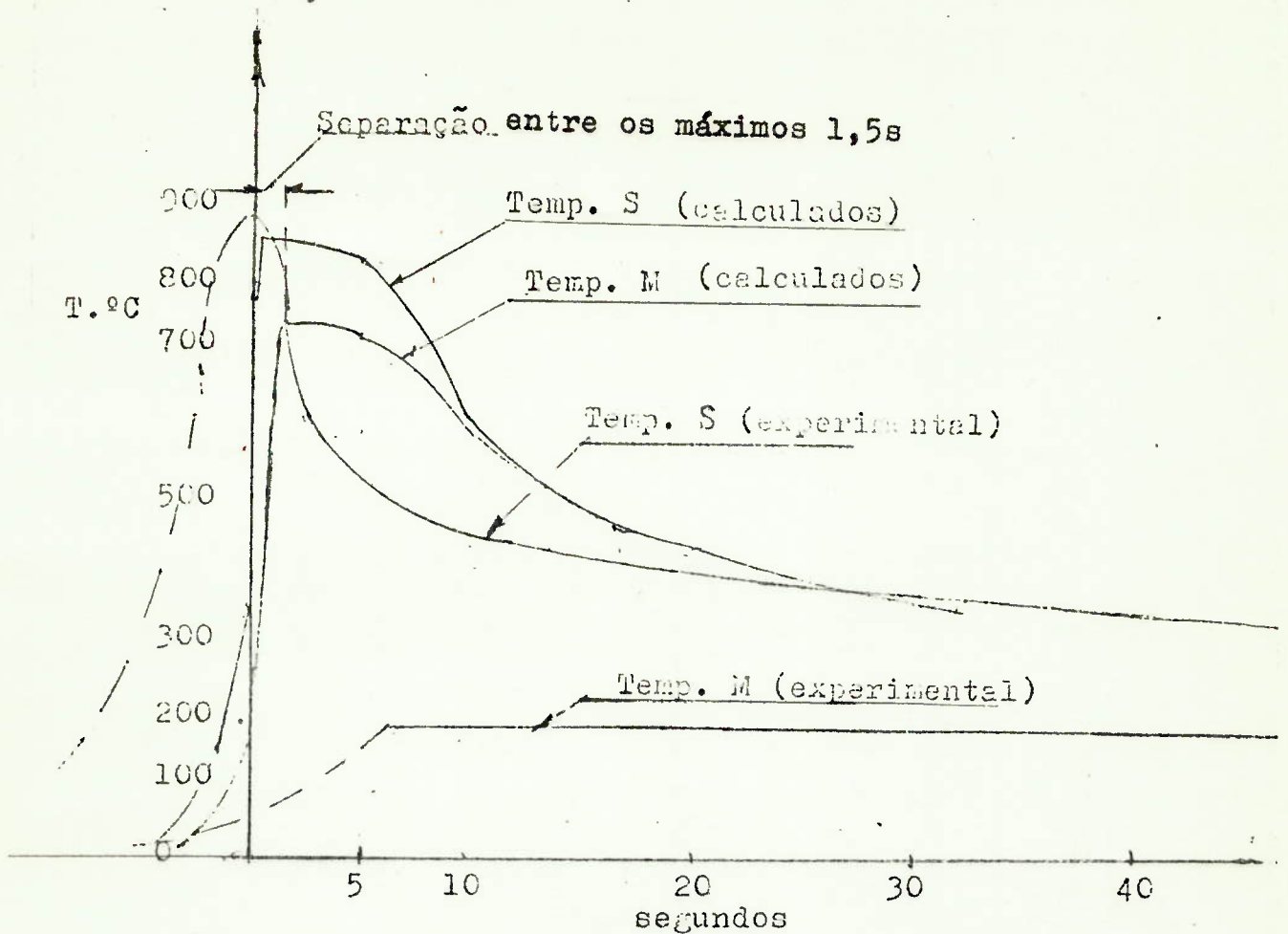


Fig. 4.2- Temperaturas calculadas e experimentais

Na fig. 4.2 constam valores fornecidos pelas tabelas 2.4 e 4.2, para $Y=6,14$, $Z=0$ e $Z=6,4$.

O gráfico mostra a diferença entre valores das temperaturas calculadas segundo a equação de Rosenthal e os valores experimentais para a chapa de 12,7 mm. Os intervalos de tempo na medição experimental são maiores que os fornecidos por cálculo, pelo fato de não se poderem fazer leituras com intervalo de tempo curto.

A origem dos tempos, na tabela 2.4, foi deslocada em 65 segundos, a fim de que os dados de ambas as tabelas tivessem a mesma origem na fig. 4.2 e se pudessem efetuar a comparação. A parte tracejada da curva experimental é aproximada, verificando-se também que o ponto de convergência das temperaturas para os pontos l e S é de 200 segundos a partir da origem, enquanto que nos valores calculados demora-se 10 segundos.

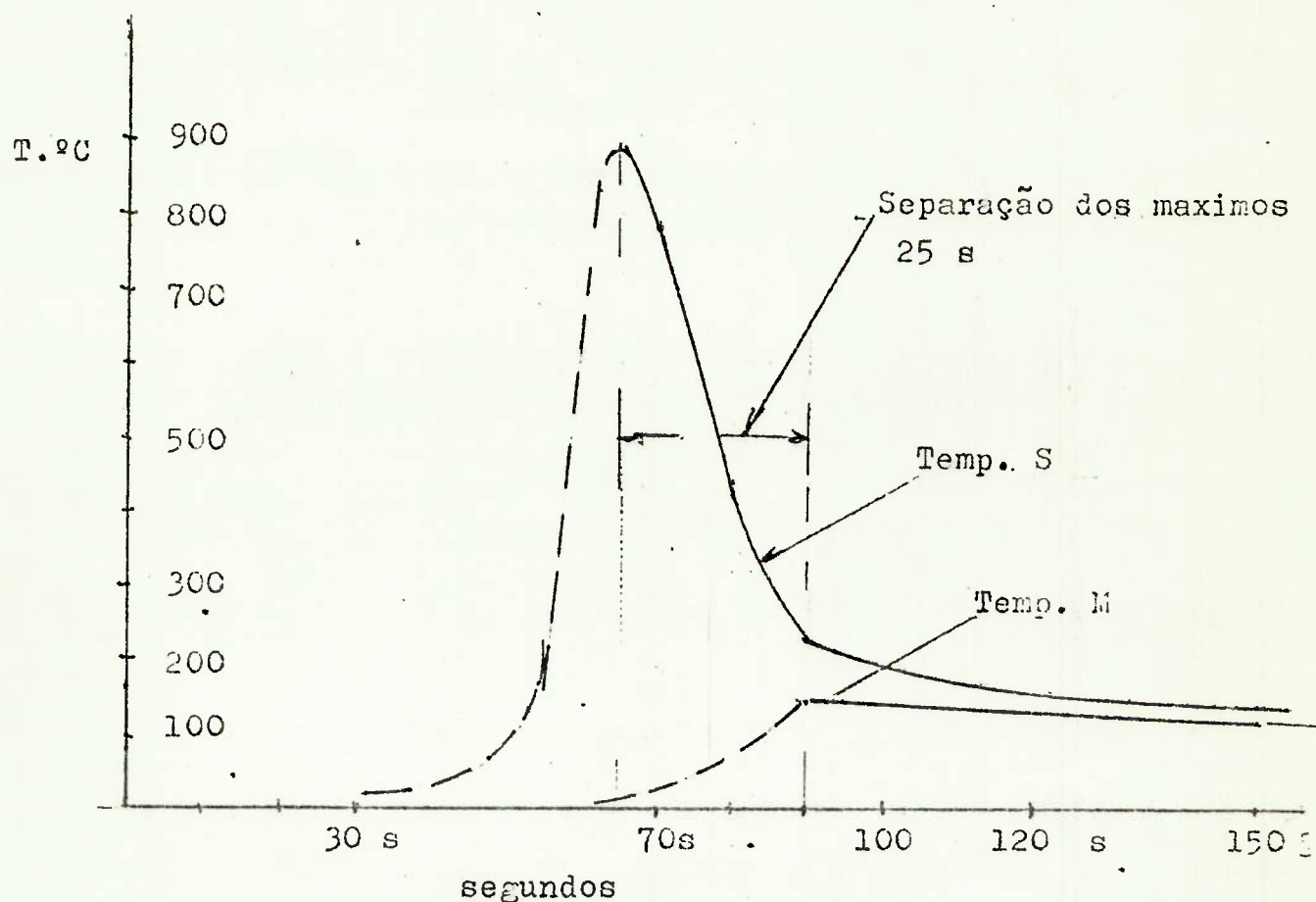


Fig. 4.3 Gráfico da tabela 2.5, chapa 3/4"

O gráfico da fig. 4.3 mostra a diferença em segundos entre os máximos nos pontos S e M da ordem de 25 segundos para a chapa de 19 mm (3/4").

Em ensaios separados, não incluídos nas tabelas, dando a partida no cronometro no momento em que a fonte de calor passa pelo ponto S; o máximo do ponto M aparece defasado de 25 segundos na chapa de 12,7 mm (1/2") e de 35 segundos para a de 19 mm (3/4").

A diferença entre 25 segundos, vista na fig. 4.3 e a de 35 segundos, obtida por medição direta, é devida ao fato de que as leituras da tabela 2.5 tem sido efetuadas nos instantes que não correspondem necessariamente ao máximo da temperatura no ponto M.

DIAGRAMA DE BLOCOS

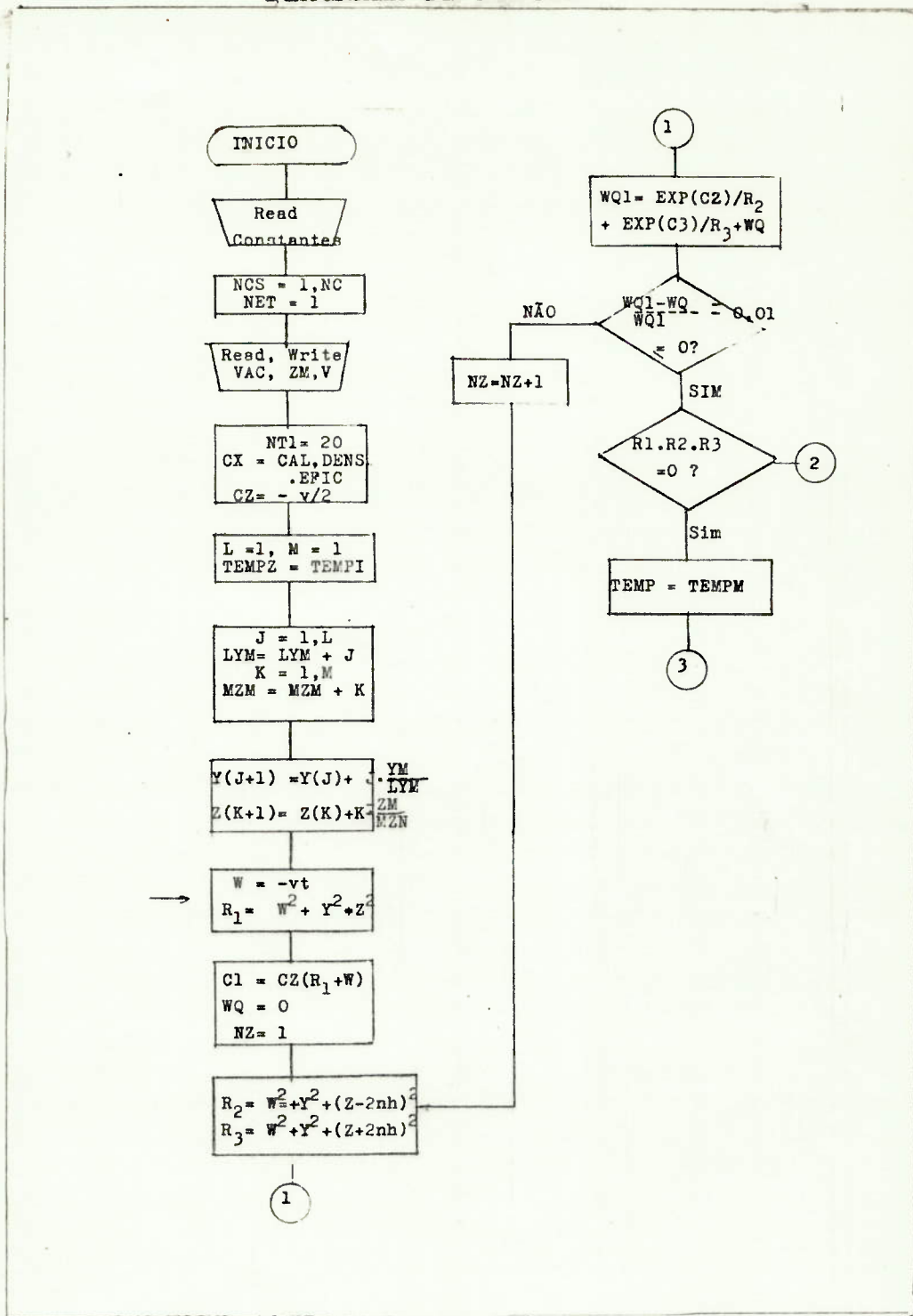


Fig. 4.4 - Diagrama de blocos.

DIAGRAMA DE BLOCOS

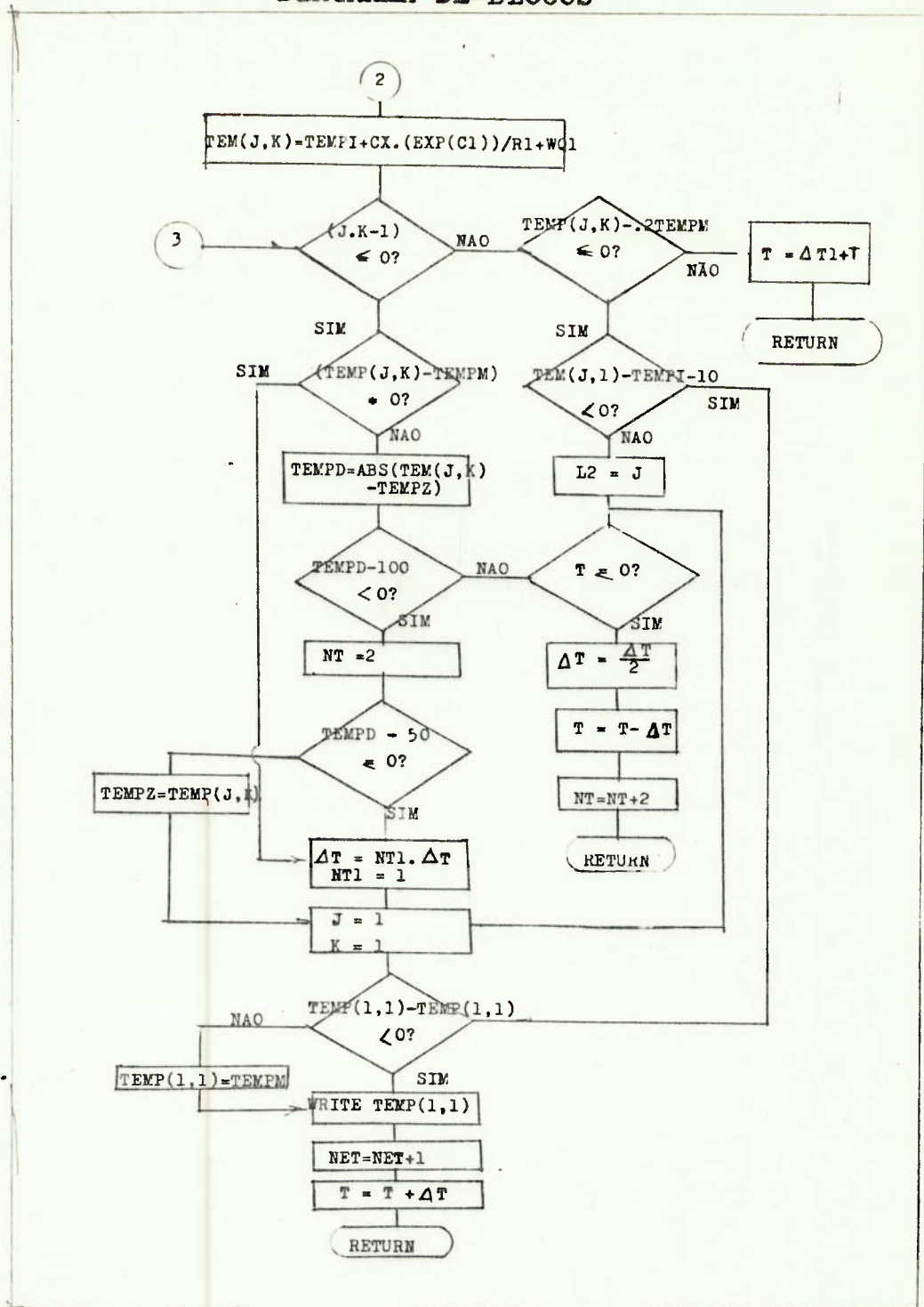


Fig. 4.5 -Diagrama de blocos .

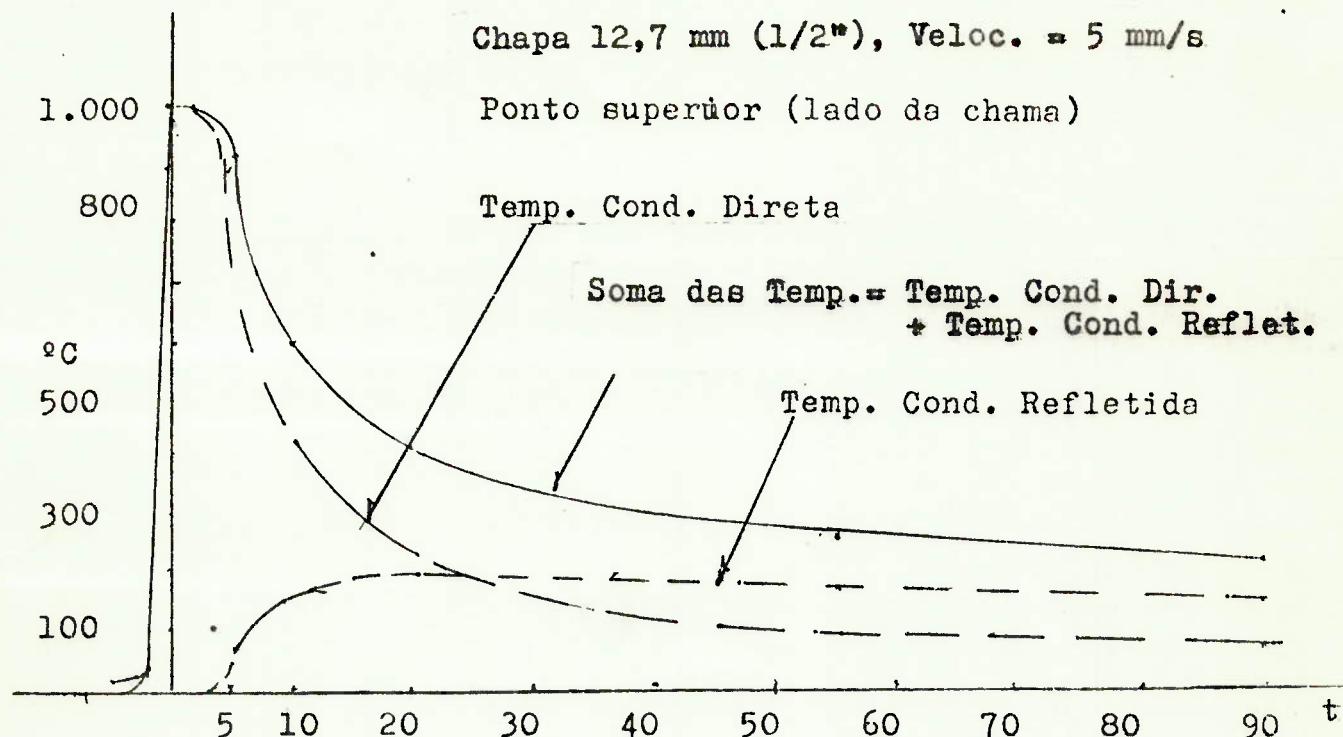


Fig. 4.6- Temperaturas no ponto superior da chapa com as parcelas direta e refletida.

4.4 DESDOBRAMENTO DA EQUAÇÃO Nº 8

Nos gráficos das figs. 4.6., 4.7 e 4.8 representamos as curvas das temperaturas devidas à condução direta, refletida e à curva representativa da soma das duas parcelas, para poder avaliar a influência relativa das componentes.

As parcelas da equação nº 8 são calculadas através equações a seguir:

$$\text{Temp. Condução Direta} = \frac{Q}{2\pi\lambda} e^{-\frac{v}{2\lambda}W} \cdot \frac{e^{-\frac{v}{2\lambda}R}}{R}$$

$$\text{Temp. Condução Reflet.} = \frac{Q}{2\pi\lambda} e^{-\frac{v}{2\lambda}W} \cdot \sum_{-\infty}^{\infty} \left(\frac{e^{-\frac{v}{2\lambda}R_n}}{R_n} + \frac{e^{-\frac{v}{2\lambda}R'_n}}{R'_n} \right)$$

A temperatura refletida começa a ter influência a partir de 5 segundos, após a fonte haver passado pelo ponto e cresce daí em diante até os 15 segundos para permanecer constante.

GRAFICOS DA TEMPERATURA - EQUAÇÃO nº 8

Chapa 12,7 mm (1/2") Veloc. = 5 mm/s

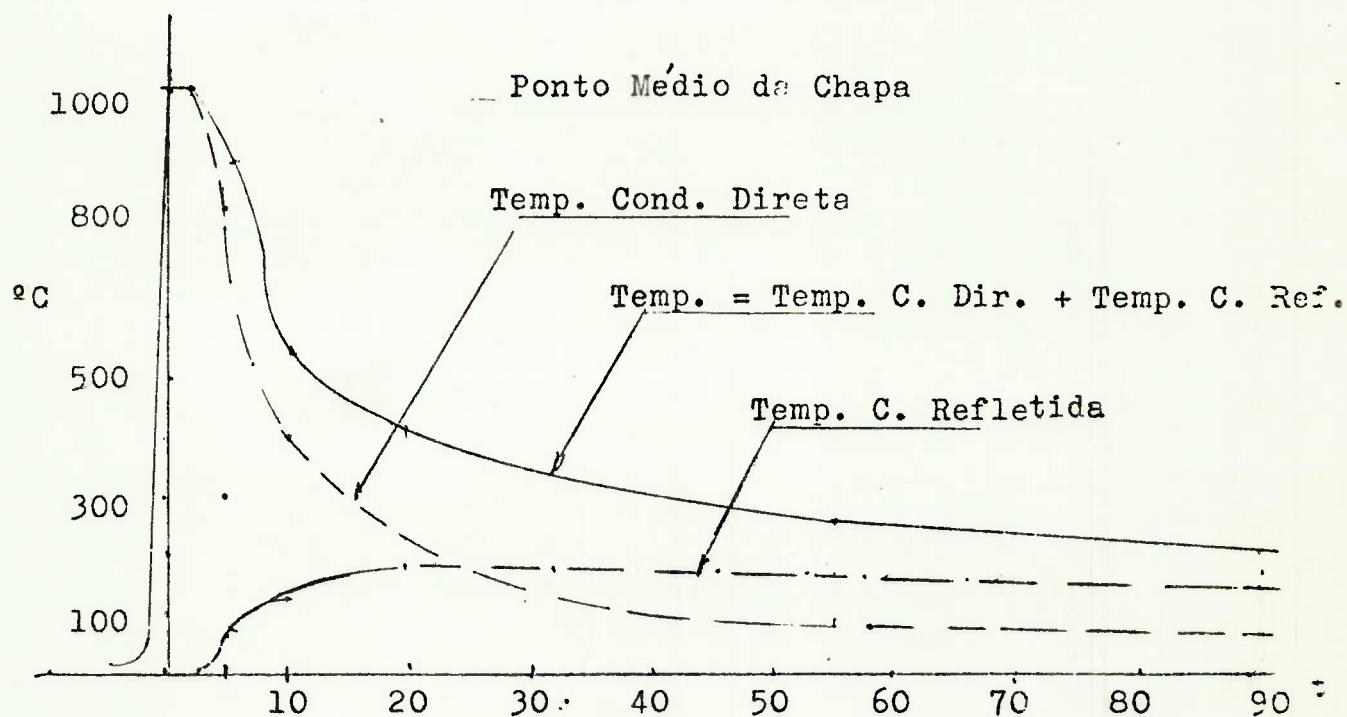


Fig. 4.7 Temperaturas no ponto médio da chapa com as parcelas direta e refletida.

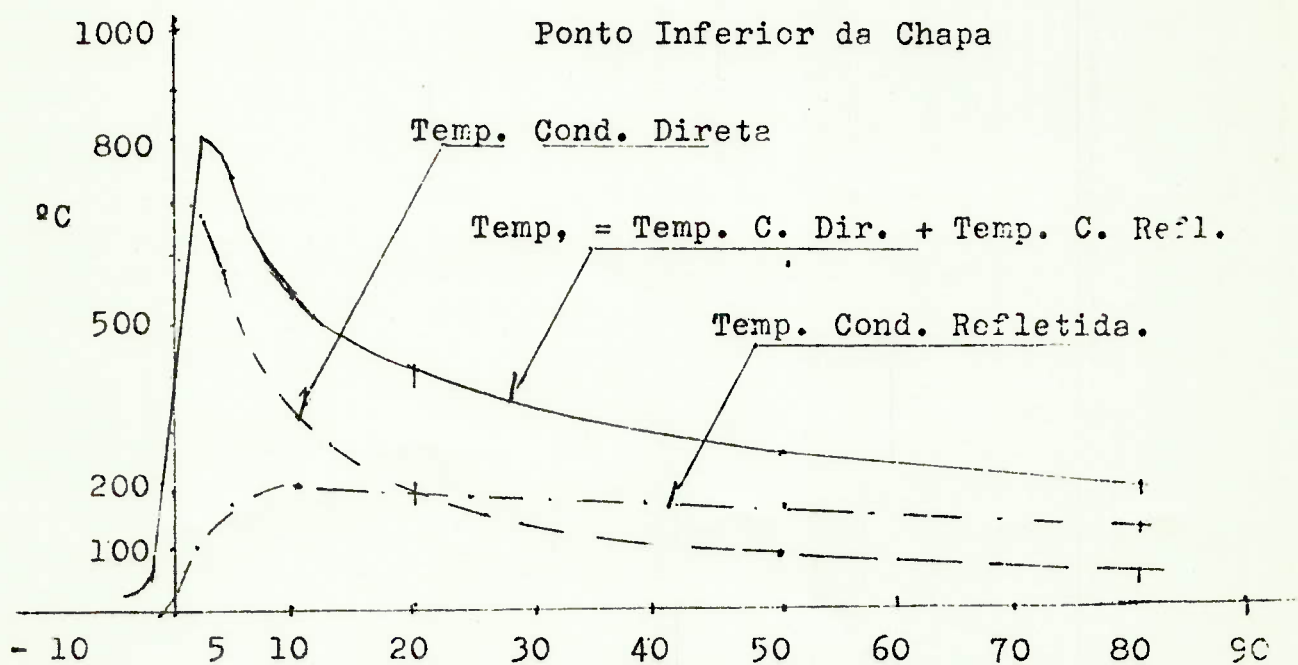


Fig. 4.8 Temperaturas no ponto inferior da chapa com as parcelas direta e refletida.

4.5 ALTERAÇÕES NO PROGRAMA DE COMPUTADOR

Os gráficos das figuras 4.9, 4.10 e 4.11 representam os valores calculados pelo programa de computador, com duas modificações. A primeira foi colocar o valor inicial de Y (1) a 7.0mm de origem, e a segunda considerar o valor do coeficiente $CX = Q/2$ variável com z, isto é, através de uma relação $C4 = CX / (1 + 0.3 \times Z(K))$, a qual é utilizada nos cálculos.

A primeira modificação equivale a desprezar uma faixa de largura de 14 mm na chapa, onde a equação apresenta valores muito altos para as temperaturas, contornando assim o limite estabelecido de 1000 ou 850°C nos valores máximos.

A segunda modificação no valor de CX foi feita, levando em conta que o coeficiente de condutibilidade térmica aumenta com a diminuição da temperatura; e comparando-se com os resultados experimentais, o valor de C4 tem-se mostrado razoável.

Estas modificações representam na realidade tentativas para que a equação de Rosenthal venha a fornecer valores da temperatura mais aproximados dos obtidos pela experiência.

O aproveitamento desta equação justifica-se pelo fato de se poder aplica-la em diferentes processos de aquecimento, contendo todas as variáveis dos mesmos e não termos à disposição, outras equações que a substituam. Deixamos de entrar em maiores detalhes, que somente se justificariam no caso de uma pesquisa mais aprofundada com recursos instrumentais de maior precisão.

TEMPERATURAS EM $Y(1) = 7\text{mm}$, VARIANDO O COEFICIENTE DE CONDUTIBILIDADE $C4 = CX/(1+0,3Z(K))$ em chapa de 12,7 mm OBTIDOS POR COMPUTADOR.

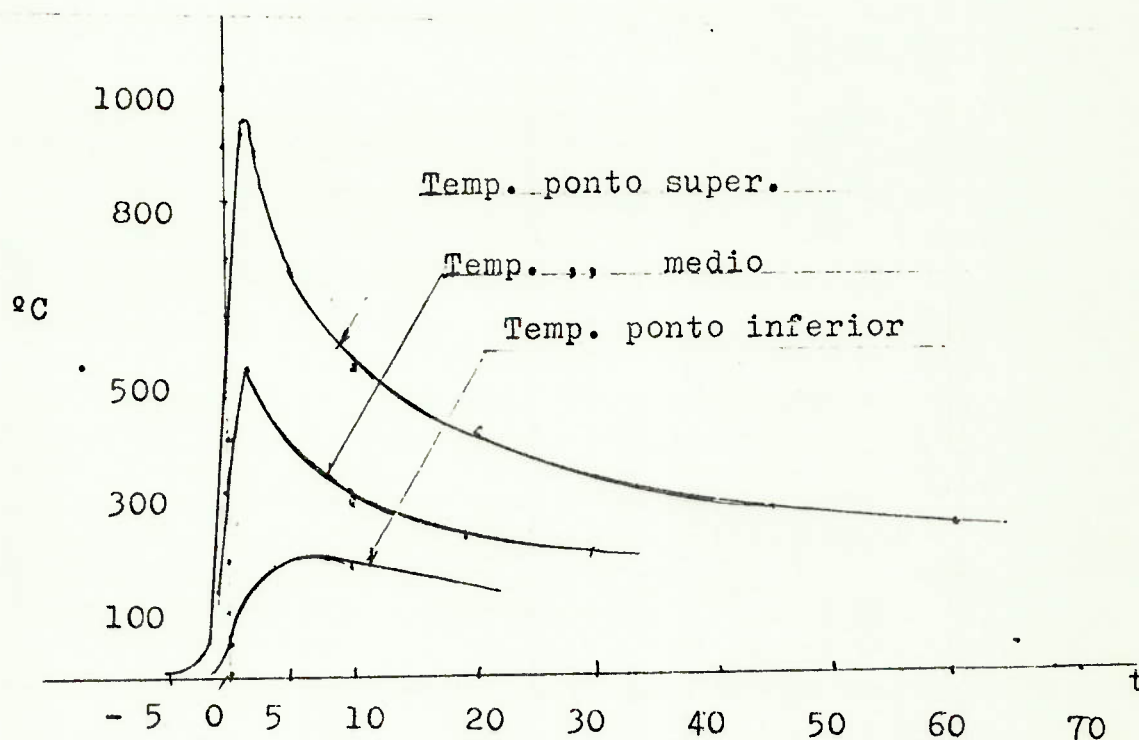


Fig. 4.9- Temperaturas com o coeficiente de condutibilidade $C4 = CX/(1+0,3Z(K))$. -

Na figura 4.9 mostra-se a variação da temperatura com o tempo nos pontos superior, médio e inferior da chapa, aquecida com fonte puntiforme em movimento.

As figuras 4.10 e 4.11 mostram as temperaturas numa secção transversal geral para instantes de $t = 0,9\text{ s}$ e $t = 5,0\text{ s}$ respectivamente. Nelas pode-se ver que as curvas de temperaturas mais elevadas sofrem abaixamento a $t = 5\text{ s}$, e como era de se esperar nas de temperatura mais baixa, sobem com o passar do tempo, em relação as de $t=0,9\text{ s}$.

VARIAÇÃO DA TEMPERATURA NA SEÇÃO GÊNÉRICA Y

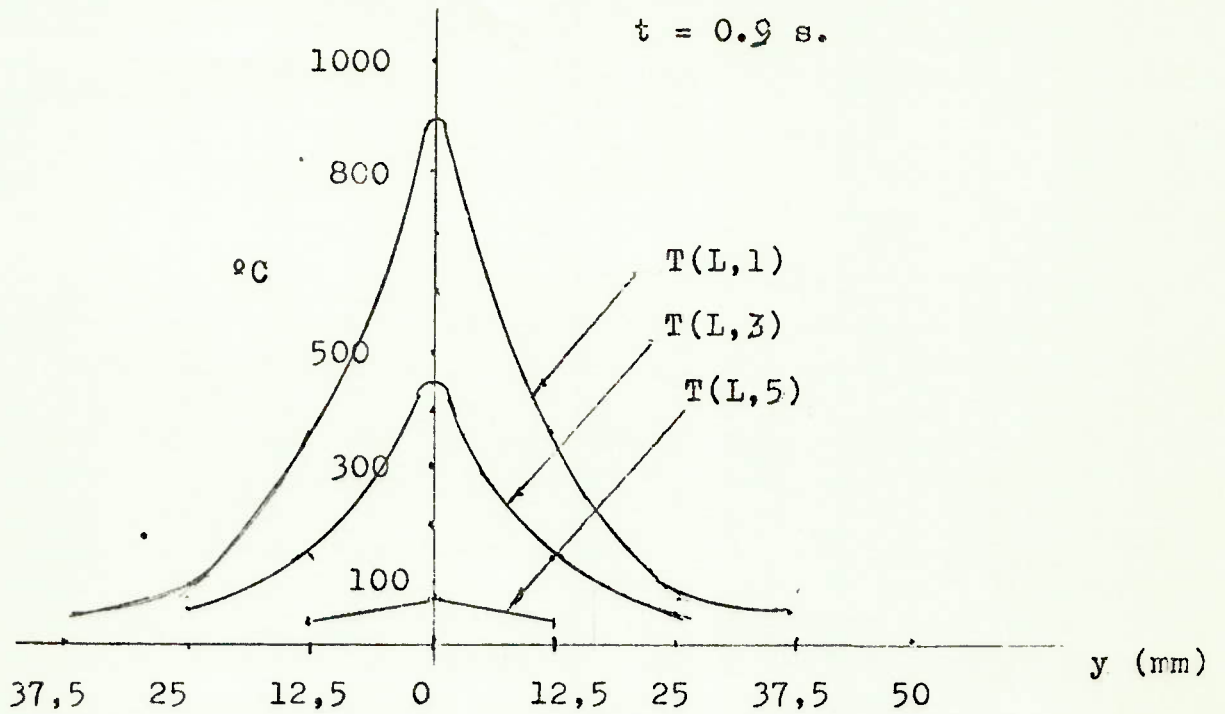


Fig. 4.10 Temperaturas com o coeficiente de condutibilidade $C_4 = CX/(1 + 0,3Z(K))$, $t = 0,9 \text{ s}$

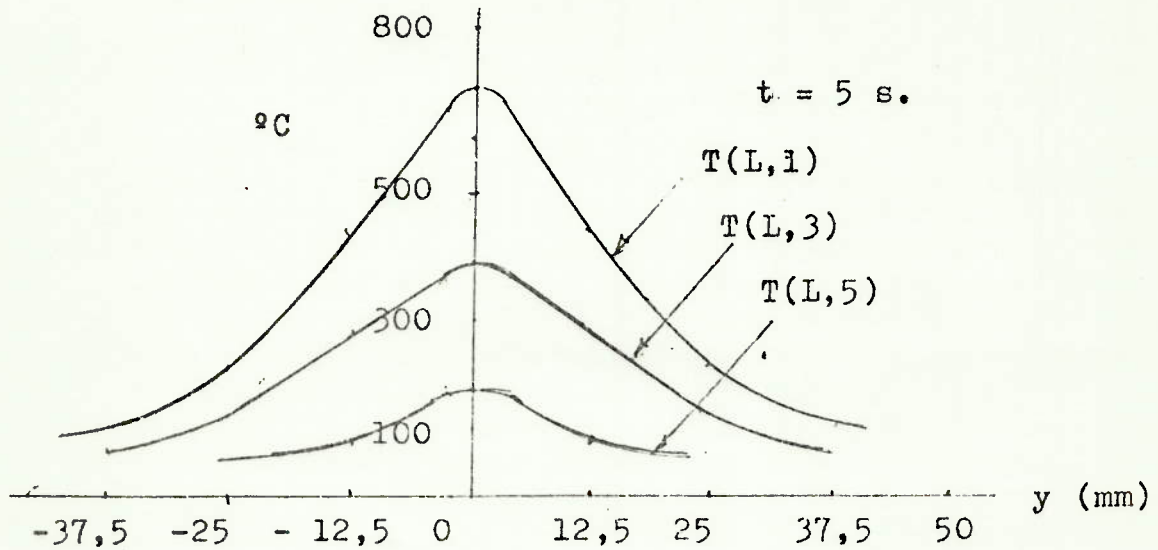


Fig 4.11 Temperaturas com o coeficiente de condutibilidade $C_4 = CX/(1 + 0,3Z(K))$, $t = 5 \text{ s}$

CAPITULO V

CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 CONCLUSÕES FINAIS

Neste trabalho foi realizada uma parte experimental de laboratório para levantar as temperaturas nos pontos superior, médio e inferior de chapas de aço aquecidas por fonte de calor. Em seguida tentou-se efetuar uma verificação das equações relativas ao fenômeno em pauta, a fim de comprovar se as mesmas conseguem traduzir os dados reais em relação à chama oxi-acetilênica. Algumas conclusões que podemos reputar como importantes são lançadas em seguida.

As equações de Schneider e Carslaw fornecem valores altos e com algumas correções podem chegar a dar resultados mais próximos dos reais. Entretanto verificou-se que tais equações são de difícil manipulação para cálculo.

A equação de Rosenthal adaptada a um programa de computador, também fornece valores altos, mas é possível, mediante correções adequadas na condutibilidade e difusividade, fazê-la reproduzir valores próximos dos dados experimentais. O programa auxiliou na verificação da influência dos termos relativos ao calor refletido, bem como sua importância com relação ao termo principal.

A equação utilizada por Beyer é bastante simplificada, fornecendo valores médios, independentemente da posição da fonte, mas não reflete o deslocamento dos máximos de temperatura a diferentes cotas de z , nem os altos gradientes da mesma, que realmente ocorrem no seio do material.

As medições de laboratório muito contribuíram para esclarecer a evolução do campo de temperaturas causado pela chama oxiacetilênica móvel ao longo de x , e diferentes níveis da chapa, isto é, na coordenada z , ficando excluído deste trabalho qualquer outro tipo de fonte calorífica.

Os equipamentos de que dispusemos foram os mais simples, e os dados experimentais envolvem aproximações que poderiam ser evitadas com uma instrumentação mais adequada do processo; mesmo assim, foi atingido nosso objetivo: verificar a ordem de afastamento dos dados calculados pelas equações com os de laboratório, compreender melhor o fenômeno em estudo e principalmente, constatar que ainda não se atingiu uma solução satisfatória para o problema.

5.2 SUGESTÕES PARA PESQUISA FUTURA

I- Abordar este estudo com melhores recursos em instrumentos e aparelhos de medição para levantar dados em chapas cuja espessura ainda não foi pesquisada, se possível mecanizando o processo para evitar erros pessoais.

II- Repetir o estudo em I para chapas resfriadas por água numa das faces.

III- Verificar os máximos de temperatura a diferentes cotas, bem como o deslocamento entre si, comparando-os com os calculados, pois neste estudo, isto só foi feito parcialmente para alguns pontos.

IV- Pesquisar a transferência de calor para a chapa com possíveis dispositivos que melhorem o rendimento térmico.

Com este estudo experimental de verificação das equações existentes, esperamos ter contribuído para o esclarecimento do fenômeno de aquecimento de chapas por fonte móvel, que embora não completo, poderá servir como fonte de consulta para trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) TANIGUCHI, C. , Análise do Mecanismo de Deformações Elasto-Plásticas no Processo de conformação à Chama- Tese de Douto_oramento apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1974
- (2) ROSENTHAL, D. , "The Theory of moving Source of Heat and its Application to Metal Treatments, Transactions of ASME , November, 1946
- (3) CARSLAW, H.S. , and JAEGER, J.C. , "Conduction of Heat in Solids", Second Edition, Oxford at Clarendon Press, 1959.
- (4) SCHNEIDER, P.J. , "Conduction Heat Transfer", Second Edition , Addison-Wesley Publishing Co., Inc., Reading, Massachusetts , U.S.A. , 1957
- (5) BEYER, M., "Experimentelle Untersuchung von Wärmedeformatio_onen bei der Umformung von Platten"; Schiffbauforschung, nº 11, 1/2/1972 , Rostock, República Democrática Alemã.
- (6) BEYER, M., "Lösung der Differentialgleichungen für eine freie elastisch-idealplastische Platte unter der Wirkung eines Temperaturfeldes $T(y,z,t)$ bei Temperaturabhängigkeit der Werkstoffeigenschaften" Schiffbauforschung, 3/4/1972 , Universidade de Rostock, República Democrática Alemã.
- (7) GONÇALVES, E. , "Análise Teórico-Experimental das Deformaçõ_oes Residuais em Painéis Estruturais Formados de Chapas Finas de Aço." - Dissertação de Mestrado apresentada à Escola Politécnica da Universidade de Sao Paulo, Setembro de 1976.
- (8) ABRAMOWITZ, M. and STEGUN, I.A., "Handbook of Mathematical Functions" , Dover Publications, Inc., New York, 1965.
- (9) LACROIX, R. , "Thermocouples" Etalouage et contrô_ole des Termocouples, Laboratoire de Recherches du Comptoir Lyon-Almand, Louyot & Cie.

LISTA DE SIMBOLOS UTILIZADOS NO PROGRAMA DE COMPUTADOR

| | |
|-----------|---|
| CDT | = λ = Condutibilidade térmica do material (Cal/ mm . s . °C |
| CX | = Variável representando o valor da expressão... ($Q/2\pi\lambda$) da Equação (17) |
| C1 | = Variável representando o valor do expoente.... ($\sqrt{2}\lambda \cdot R_1$) da Equação (17) |
| C2 | = Variável representando o valor do expoente..... ($\sqrt{2}\lambda \cdot R_n$) da Equação (17) |
| C3 | = Variável representando o valor do expoente..... ($-\sqrt{2}\lambda \cdot R_n$) da Equação (17) |
| CZW | = Variável representando o valor do expoente ($-\sqrt{2}\lambda \cdot W$) da Equação (17) |
| DT = DT1 | = Incremento do tempo ao passar de uma etapa à seguinte, do ciclo termico. |
| EFIC | = Eficiencia do processo térmico. |
| GMOL | = Molécula grama de acetileno (g) |
| HH | = Espessura da chapa (mm). |
| K | = Indicador das secções. |
| KE | = Constante p/ comandar leitura de dados. |
| KS | = Constante p/ comandar impressão de resultados. |
| L | = Indicador dos pontos de uma secção dada |
| NCS | = Número de problemas submetidos. |
| NCT | = Número de ciclos termicos |
| NEC | = Número de etapas por ciclo. |
| NIZ | = Número de intervalos em uma dada secção. |
| NPZ | = Número de pontos em uma dada secção. |
| NSY | = Número de secções do modelo. |
| NT1 | = Multiplicador utilizado no patamar de temperaturas maximas, |
| QEST | = Quantidade de calor resultante da reação estequiométrica de 1 g-mol de acetileno. |
| R 1 | = ($W^2 + Y^2 + Z^2$) ^{1/2} |
| R 2 | = ($W^2 + Y^2 + (z - 2nh)^2$) ^{1/2} |
| R 3 | = ($W^2 + Y^2 + (z + 2nh)^2$) ^{1/2} |
| TEM (K,L) | = TEMP (K,L) = Temperatura em um ponto de uma dada secção (k) . (°C) |

- VAC = Vazão do acetileno durante a aquecimento (l/h)
- VEL = Velocidade da fonte de calor. (mm/s)
- W = Variável representando o valor da expressão .
(-V.t) . (mm)
- Y(K) = Coordenada de uma dada secção (k), na direção
da largura do modelo. (mm)
- YZ = Coordenada de um ponto em uma dada secção, na
direção da espessura. (mm)
- CZ = Variável representando o valor da expressão
($\sqrt{2X}$) da Equação (17)

A P E N D I C E I


```

230 Z(K+1)=Z(K)+K*ZM/MZH
    DN 500 J=1,L1
    DO 500 K=1,M1
    NET=1
    NT1=20
    WRITE(KS,902) J,K
902 FORMAT(///,3X,'ETAPA',5X,'INSTANTE',5X,'TEMP('',I1,',',',I1,')',5X,'C
    ONDUCAO DIRETA',5X,'CONDUCAO REFLETIDA',/)
300 W=-V*T
    P1=SQRT(W+W+Y(J)*Y(J)+Z(K)*Z(K))
    C1=CZ*(R1+W)
    WQ=0
    NZ=1
350 R2=SQRT(W+W+Y(J)*Y(J)+(Z(K)-2.*NZ*ZM)**2)
    P3=SQRT(W+W+Y(J)*Y(J)+(Z(K)+2.*NZ*ZM)**2)
    C2=CZ*(R2+W)
    C3=CZ*(R3+W)
    C4=CX/(1+.3*Z(K))
    WQ1=EXP(C2)/R2+EXP(C3)/R3+WQ
    IF((WQ1-WQ)/WQ1=.01)400,400,375
375 WQ=WQ1
    NZ=NZ+1
    GO TO 350
400 IF(R1*P2*R3)420,410,420
410 TEM(J,K)=TEMPM
    GO TO 460
420 TEM(J,K)=TEMP1+C4*(EXP(C1)/R1+WQ )
515 IF(TEM(J,K)-TEMPM)460,810,810
810 TEMP(J,K)=TEMPM
    GO TO 465
460 TEMP(J,K)=TEM(J,K)
465 TEMPD=ABS(TEMP(J,K)-TEMPZ)
    IF(TEMPD-100.)470,550,550
470 NT=2
    IF(TEMPD-50.)480,480,495
475 TEMP(J,K)=TEMPM
    CONDD(J,K)=COND1
    CONDR(J,K)=COND2
    WRITE(KS,903)NET,T,TEMP(J,K),CONDD(J,K),CONDR(J,K)
903 FORMAT(5X,I2,6X,F8.4,6X,F7.2,11X,F7.3,13X,F7.3)
    NET=NET+1
    IF(NT1-20)29,29,28
29 IF(DT-0.2) 30,30,31
31 IF(DT-0.5) 32,32,33
30 DT=NT1*DT
    GO TO 34
32 NT1=10
    DT= NT1*DT
    GO TO 34
33 NT1=1
    DT= NT1*DT
    GO TO 34
34 T= T+DT
    NT1=1.
    GO TO 300
28 DT= NT1*DT
    T=T+DT
    NT1=1.
    GO TO 300
480 IF(T)490,490,600

```

```

C 00
C 01
C 02
C 03
C 04
C 05
C 06
C 07
C 08
C 09
C 10
C 11
C 12
C 13
C 14
C 15
C 16
C 17
C 18
C 19
C 20
C 21
C 22
C 23
C 24
C 25
C 26
C 27
C 28
C 29
C 30
C 31
C 32
C 33
C 34
C 35
C 36
C 37
C 38
C 39
C 40
C 41
C 42
C 43
C 44
C 45
C 46
C 47
C 48
C 49
C 50
C 51
C 52
C 53
C 54
C 55
C 56
C 57
C 58
C 59
C 60

```

