

ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA DURANTE A LAMINAÇÃO  
E SUA INFLUÊNCIA NA RESISTÊNCIA À DEFORMAÇÃO<sup>(1)</sup>

Heraldo Leite de Andrade<sup>(2)</sup>  
Nivaldo Cursino Guimarães<sup>(3)</sup>  
Alberto Jose Roldán<sup>(4)</sup>  
Rajindra Clement Ratnapuli<sup>(5)</sup>

- 
- (1) Contribuição Técnica a ser apresentada no XVI Simpósio de Laminação (Planos) da COLAM/ABM, Niterói, outubro/1979.
- (2) Membro da ABM - Engenheiro Metalurgista da Unidade de Pesquisa de Processo de Conformação da USIMINAS, Ipatinga, MG.
- (3) Membro da ABM - Técnico Metalurgista da Unidade de Pesquisa de Processo de Conformação da USIMINAS, Ipatinga - MG.
- (4) Membro da ABM - Engenheiro Mecânico da Unidade de Pesquisa de Processo de Conformação da USIMINAS, Ipatinga - MG.
- (5) Membro da ABM - Engenheiro Metalurgista da Unidade de Pesquisa de Produtos da USIMINAS, Ipatinga - MG.

## 1. INTRODUÇÃO

Em termos de laminação a quente é fundamental um conhecimento exato das condições térmicas do material a fim de se fazer uma correta avaliação dos parâmetros de processo e da qualidade do produto obtido.

A única forma viável de se medir temperatura em escala industrial é na superfície, mas esta informação pode não ser precisa em casos de gradientes elevados de temperatura.

Dessa maneira torna-se necessário a avaliação do perfil de temperatura ao longo da espessura do material que se está laminando, em qualquer instante do processo.

Neste trabalho foi desenvolvido um modelo matemático para o cálculo da distribuição de temperatura nas condições citadas, cujos resultados foram checados em escala piloto no Laminador do Centro de Pesquisas da USIMINAS.

Por outro lado a avaliação do perfil de temperatura, junto às experiências relacionadas à medida da heterogeneidade da deformação no sentido da espessura, permitiram desenvolver um novo processo de cálculo da resistência à deformação.

Esta resistência depende fundamentalmente da composição química, da velocidade e distribuição de deformação e da temperatura. O presente trabalho analisa a incidência destes parâmetros, supondo que a velocidade de deformação se mantém constante ao longo da espessura.

## 2. OBJETIVOS

1. Desenvolvimento de um modelo de temperatura que permita o cálculo de sua distribuição, durante qualquer instante do processo de laminação.
2. Desenvolvimento de um método experimental, em escala piloto, de medição contínua de temperatura em determinados pontos do interior do material e da distribuição de deformação no sentido da espessura.

3. Cálculo da força de laminação em função da resistência à deformação determinada através da temperatura média e também baseada na distribuição de temperatura.

### 3. DESENVOLVIMENTO

Basicamente o desenvolvimento do trabalho consta de duas partes.

A primeira foi realizada no laminador piloto da USIMINAS e se referia à medição das temperaturas superficial e internas do material, e à determinação do grau de deformação das camadas previamente marcadas na borda da placa.

A outra etapa visava o desenvolvimento de um modelo matemático que permitisse a determinação do perfil de temperatura ao longo da espessura, sendo utilizado para tal fim um método numérico de análise. Por outro lado, os dados deste modelo foram aplicados para o cálculo da resistência à deformação através de duas maneiras. A primeira é baseada na temperatura média e a outra leva em consideração a distribuição de temperatura.

#### 3.1. Método Experimental

As experiências foram desenvolvidas no local da linha de laminação piloto do Centro de Pesquisas da USIMINAS.

##### 3.1.1. Equipamentos e Materiais Utilizados:

Forno de reaquecimento de placas;  
Dimensões 800 mm x 650 mm x 250 mm.  
Combustível usado: COG.

Laminador piloto;  
Tipo 2HI reversível;  
Carga máxima 250 t;  
Material de cilindros: aço fundido revestido com solda;  
Diâmetro: 400 mm.  
Velocidade dos cilindros: 50 m/min.

Termopares;

Material: Cromel-Alumel;

Diâmetro: 3mm;

Proteção: aço inoxidável.

Pirômetro de radiação;

Tipo Land.

Placas;

Aço 0,19% de carbono;

Dimensões 230mm x 150mm x 76mm.

### 3.1.2. Medição de Temperatura Durante Laminação

Nas placas foram feitos furos destinados a alojar os termopares, conforme se mostra na figura 1.

Enfornaram-se as placas a  $1250^{\circ}\text{C}$ . O tempo de forno foi de 70 minutos, considerado suficiente para atingir a homogeneização da temperatura em todo o material.

Para evitar a formação de carepa nos furos destinados a alojar os termopares, colocaram-se protetores de aço inoxidável.

Uma vez desenfornadas foram retirados os protetores e introduzidos os termopares, procurando um estreito contato destes com o fundo dos orifícios.

Foi necessário deixar um certo tempo de estabilização do registro do sinal dos termopares antes de se efetuar a primeira redução no laminador, em vista da inércia do sistema termopar-registrador. Durante este tempo de espera a placa era movimentada sobre a mesa de rolos.

O programa de laminação seguido se indica na tabela 1.

Tabela 1 - Programa de laminação em escala piloto.

PASSE Nº	TEMPO ACUMULADO ATÉ O PASSE (s)	ESPESSURA DA CHAPA (mm)
1	122	70
2	133	66
3	172	60
4	185	56
5	203	48
6	218	40
7	232	32
8	246	26

Especial atenção foi dada ao manuseio dos termopares durante a laminação para evitar a ruptura dos mesmos.

As medições da temperatura superficial foram realizadas com pirômetro tipo Land, depois de cada passe.

As medidas contínuas de temperatura fornecidas pelos termopares foram graficadas num registrador XT.

As figuras 2 e 3 permitem observar as características globais da experiência e os detalhes da colocação dos termopares nas placas.

### 3.1.3. Determinação do Gradiente de Deformação

Com esse objetivo foram preparadas placas com as mesmas dimensões daquelas utilizadas na experiência de medição de temperatura. Nas faces laterais das placas foram fresados 10 frisos eqüidistantes, ocupando a metade da espessura, definindo, assim, mesmo número de camadas.

Dado que se visava a medição da deformação de cada fatia em cada passe, as placas sofreram de 1 a 4 reduções, detendo-se o processo de laminação na metade do comprimento, aproximadamente. Isto pode ser observado na figura 4.

Imediatamente depois de cada passe as placas eram resfriadas rapidamente para evitar a excessiva formação de carepa, a qual reduziria a precisão das leituras de espessura das camadas deformadas.

Tais medições realizaram-se com um comparador e, a partir de tais resultados, elaborou-se o novo critério de cálculo da resistência à deformação.

### 3.2. Análise da Condição Térmica do Material

#### 3.2.1. Na Mesa de Rolos

Com o intuito de se fazer o cálculo da distribuição de temperatura ao longo da espessura do material, em função do tempo, considerou-se apenas a metade da espessura, admitindo-se que, na outra metade, a distribuição de temperatura seja simétrica.

Dividiu-se então a metade da espessura do material em 10 partes de igual tamanho, sendo as fatias numeradas de 1 a 10, a partir do centro para a superfície, e a camada de ar que envolve o material com o nº 11.

A fatia 1 troca calor por condução com a fatia 2 através da seguinte equação:

$$\frac{A_{1,2}}{d_{1,2}} K (\theta_1 - \theta_2) = -\rho V_1 C \frac{\Delta \theta_1}{\Delta t} \quad (1)$$

Onde:

$A_{1,2}$  - área de troca de calor entre as fatias 1 e 2.

$d_{1,2}$  - distância entre os centros de gravidade das fatias 1 e 2.

$K$  - condutibilidade térmica do material = 25 kcal/mh°C.

$\theta_1$  - temperatura da fatia 1.

$\theta_2$  - temperatura da fatia 2.

$\rho$  - densidade do material = 7300 kg/m<sup>3</sup>.

$C$  - calor específico do material = 0,18 kcal/kg°C.

$V_1$  - volume da fatia 1.

$\Delta\theta_1$  - variação da temperatura da fatia 1 no intervalo de tempo considerado.

$\Delta t$  - intervalo de tempo.

Como  $V_1 = A_{1,2} \cdot d_{1,2}$  a equação (1) passa a ser:

$$\Delta\theta_1 = - \frac{K\Delta t}{\rho C d_{1,2}^2} (\theta_1 - \theta_2) \quad (2)$$

Fazendo

$$M = \frac{\rho C d_{1,2}^2}{K\Delta t} \quad \text{temos:}$$

$$\Delta\theta_1 = - \frac{1}{M} (\theta_1 - \theta_2) \quad (3)$$

Uma fatia qualquer, numerada de 2 a 9 e designada genericamente por  $i$ , troca calor por condução com a fatia anterior e a seguinte através da equação:

$$\frac{A_{i-1,i} \cdot K}{d_{i-1,i}} (\theta_i - \theta_{i-1}) + \frac{A_{i,i+1} \cdot K}{d_{i,i+1}} (\theta_i - \theta_{i+1}) = -\rho V_i C \frac{\Delta\theta_i}{\Delta t} \quad (4)$$

Como

$$A_{i-1,i} = A_{i,i+1}$$

$$d_{i-1,i} = d_{i,i+1}$$

$$V_i = (A_{i-1,i}) \cdot (d_{i-1,i}) = (A_{i,i+1}) \cdot (d_{i,i+1})$$

Temos que:

$$\Delta\theta_i = \frac{1}{M} (\theta_{i-1} - 2\theta_i + \theta_{i+1}) \quad (5)$$

A fatia 10 troca calor por condução com a fatia 9 e por radiação e convecção natural com a camada de ar envolvente através da equação:

$$\frac{A_{9,10} \cdot K}{d_{9,10}} (\theta_{10} - \theta_9) + A_{10,11} \epsilon_{10,11} (\bar{\theta}_{10}^4 - \bar{\theta}_{11}^4) + \bar{h}_{10,11} A_{10,11} \cdot (\theta_{10} - \theta_{11}) = -\rho V_{10} C \frac{\Delta\theta_{10}}{\Delta t} \quad (6)$$

Onde:

$\epsilon_{10,11}$  - emissividade do material = 0,8.

$\bar{\theta}$  - temperatura absoluta.

$\bar{h}_{10,11}$  - coeficiente de película médio = 30 kcal/m<sup>2</sup>h°C.

Procedendo de maneira análoga às fatias anteriores temos:

$$\Delta\theta_{10} = -\left[ \frac{1}{M}(\theta_{10} - \theta_9) + \frac{\epsilon_{10,11}\Delta t}{\rho C d_{9,10}}(\bar{\theta}_{10}^4 - \bar{\theta}_{11}^4) + \frac{\bar{h}_{10,11} \cdot \Delta t}{\rho C d_{9,10}}(\theta_{10} - \theta_{11}) \right] \quad (7)$$

### 3.2.2. Durante a Deformação.

Quando o material está em contato com os cilindros do laminador, a fatia 10 troca calor por condução com o cilindro e com a fatia 9.

Considerou-se que o cilindro absorve todo o calor proveniente da fatia 10 sem alterar a sua temperatura.

Esta hipótese é válida tendo em vista as pequenas dimensões do material que está sendo laminado em relação ao cilindro.

Para efeito de cálculo de transmissão de calor por condução supôs-se o cilindro como uma fatia de mesma espessura da fatia 10.

Para as demais fatias o mecanismo de transmissão de calor por condução interna continua sendo válido.

A redução na espessura do material durante a laminação foi determinada através da expressão:

$$h_i = h_1 - 2R (\cos \psi - \cos \alpha) \quad (8)$$

sendo

$\psi = \alpha - \omega t$  (rad).

$\alpha$  = ângulo de mordida.

$R$  = raio do cilindro.

$\omega$  = velocidade angular do cilindro.

$t$  = tempo decorrido desde que o material entra em contato com o cilindro.

$h_1$  = espessura do material no início do passe.

$h_i$  = espessura do material no instante considerado.

Devido à heterogeneidade da deformação, a espessura relativa das fatias não é mais constante, sendo definido, a partir de dados experimentais e para cada camada, um coeficiente que permite a ponderação desta heterogeneidade.

Supôs-se, para simplificação, que a deformação sofrida por cada fatia varia linearmente ao longo do arco de contato.

Na análise do ganho de calor devido à energia consumida durante a laminação, não foi considerada a energia de atrito, a qual se dissipa, em sua maior parte, por meio dos cilindros.

Considerou-se apenas o calor desenvolvido como consequência da deformação plástica do material, o qual foi calculado utilizando-se a fórmula de Pavlov.

$$A_i = K_i V_i \ln \frac{h_i}{h'_i} \quad (9)$$

onde

$$A_i = \text{trabalho efetuado para deformar a fatia } i \\ = \rho C V_i \Delta \theta_i \text{ (Joule).}$$

$$K_i = \text{limite de escoamento da fatia } i \text{ (Nm}^{-2}\text{)}.$$

$$V_i = \text{volume da fatia } i \text{ (m}^3\text{)}.$$

$$h_i = \text{espessura da fatia } i \text{ antes do passe (m).}$$

$$h'_i = \text{espessura da fatia } i \text{ após o passe (m).}$$

O aumento da temperatura devido a este trabalho de deformação será:

$$\Delta \theta_i^D = \frac{K_i}{\rho C} \ln \frac{h_i}{h'_i} \quad (10)$$

Os valores de  $K_i$  foram determinados a partir da expressão de Misaka e Yoshimoto.

$$K_i = \exp \{ 0,126 - 1,75 (\%C) + 0,594 (\%C)^2 + [2851 + 2968 (\%C) - 1170 (\%C)^2] / \bar{\theta}_i \} \left( \ln \frac{h_i}{h'_i} \right)^{0,21} \lambda_m^{0,13} \quad (11)$$

sendo

$$\bar{\theta}_i = \text{temperatura da camada } i \text{ (K).}$$

A velocidade de deformação média ( $\lambda_m$ ) foi calculada utilizando a equação:

$$\lambda_m = \frac{2v_r \sqrt{\frac{\Delta h}{R}}}{h_1 + h_2} \quad (s^{-1}) \quad (12)$$

onde

$v_r$  = velocidade periférica do cilindro.

$\Delta h$  = redução absoluta.

Como consequência da análise anterior dos mecanismos de transmissão de calor envolvidos durante a laminação, são obtidas as seguintes equações gerais:

Fatia 1:

$$\Delta\theta_1 = \frac{-K\Delta_t}{Cd_{1,2}^2} (\theta_1 - \theta_2) + \Delta\theta_1^D \quad (13)$$

Fatia genérica  $i$  ( $2 \leq i \leq 9$ ):

$$\Delta\theta_i = \frac{K\Delta_t}{\rho Cd_{i-1,i}^2} (\theta_{i-1} - \theta_i) + \frac{K\Delta_t}{\rho Cd_{i,i+1}^2} (\theta_{i+1} - \theta_i) + \Delta\theta_i^D \quad (14)$$

Fatia 10:

$$\Delta\theta_{10} = \frac{K\Delta_t}{\rho Cd_{9,10}^2} (\theta_9 - \theta_{10}) + \frac{K\Delta_t}{\rho Cd_{10,cil}^2} (\theta_{cil} - \theta_{10}) + \Delta\theta_{10}^D \quad (15)$$

onde

$\theta_{cil}$  = temperatura do cilindro.

$d_{10,cil}$  = distância entre a fatia 10 e o cilindro considerada para a troca de calor por condução.

Para se garantir a convergência da solução do método numérico de cálculo de distribuição de temperatura acima desenvolvido, o valor de  $M$  deve ser maior ou igual a 2. Neste trabalho foi utilizado  $M = 10$ .

O fluxograma do modelo matemático desenvolvido para o cálculo do perfil de temperatura está indicado na figura 5.

No gráfico da figura 6, os resultados obtidos com a aplicação do modelo são comparados com os valores de temperatura medidos experimentalmente.

### 3.3. Determinação da Resistência à Deformação Média ( $k_m$ ).

Os valores de resistência à deformação média foram calculados através da equação (11), utilizando-se dois diferentes métodos:

- Método 1.

Cálculo de  $k_m$  em função da temperatura média obtida a partir da distribuição de temperatura ao longo da espessura.

- Método 2.

Cálculo de  $k_m$  a partir da resistência à deformação de cada fatia ( $K_i$ ).

A resistência à deformação de cada fatia é afetada pelo coeficiente de ponderação anteriormente referido. Este coeficiente permite considerar a influência da heterogeneidade da deformação no cálculo da resistência média do material.

Com os valores de  $k_m$ , obtidos por meio dos dois métodos anteriores, calculou-se a carga de laminação através do modelo de Sims.

O fluxograma para este cálculo é mostrado na figura 7, estando a comparação entre os resultados obtidos e os valores reais indicada no gráfico da figura 8.

## 4. CONCLUSÕES

1. O trabalho mostrou que é viável a aplicação de um método numérico para a solução das equações de transmissão de calor que ocorre durante a laminação, permitindo o cálculo da distribuição de temperatura ao longo da espessura do material em qualquer instante do processo.
2. As experiências, em escala piloto, mostram que foi possível o desenvolvimento de um método de medição contínua de temperatura no interior do material durante a laminação.
3. A comparação dos valores de temperatura calculados através do modelo matemático desenvolvido com os valores de

temperatura medidos experimentalmente mostrou a validade da análise realizada.

4. O método experimental proposto para a determinação do grau de heterogeneidade da deformação ao longo da espessura do material foi satisfatório, fato este corroborado pelos resultados obtidos na aplicação do modelo de carga.
5. Os dois métodos utilizados no cálculo da força de laminação apresentaram resultados próximos aos valores reais, porém notou-se uma melhoria quando foi empregado o que considera a resistência à deformação em função da resistência de cada fatia.

## 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a valiosa colaboração prestada pelos técnicos Sérgio Moreira Lameirinhas e Geraldo Camilo Rocha Mól na realização deste trabalho.

## 6. BIBLIOGRAFIA

1. TSELIKOV, A - Stress and Strain in Metal Rolling - Mir Publishers - Moscow 1967.
2. WUSATOWSKI, Z - Fundamentals of Rolling - Podstawy Walcowania - Poland 1969.
3. LARKE, E.C. - The Rolling of Sheet, Strip and Plate - London, 1963.
4. TAROKH, M. and SEREDYNSKI, F. - Roll Force Estimation in Plate Rolling - JISI - July, 1970.
5. DENTON, B. and CRANE, F. - Roll Load and Torque in hot Rolling of Steel Plate - JISI - Aug. 1972.
6. KREITH, F. - Principles of Heat Transfer - IIC, Pennsylvania, 1965.
7. IRSID - Automatisation du laminage des tôles fortes sur cage quarto reversible - Novembre, 1974.

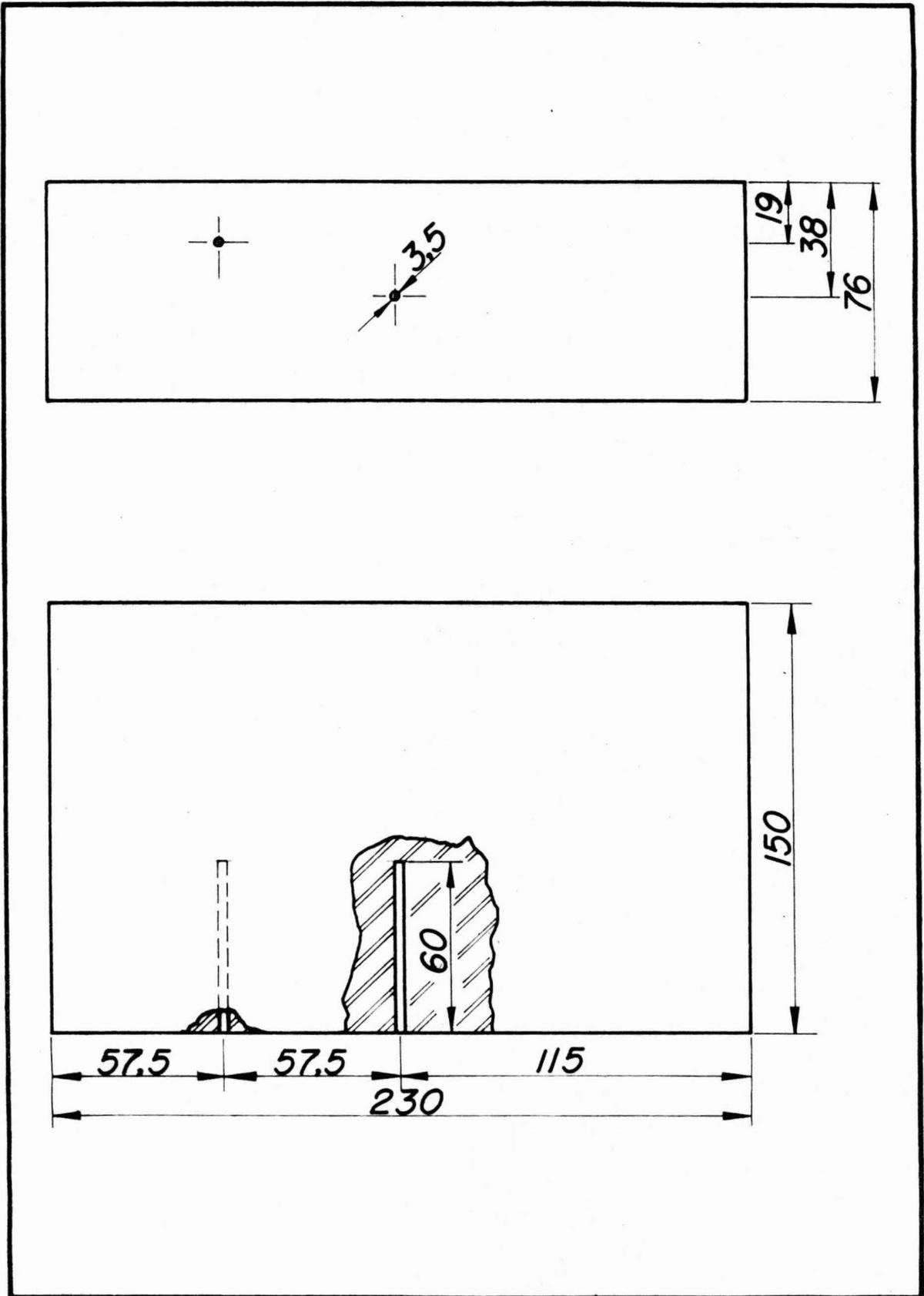


FIGURA 1 - Esquema da disposição dos furos nas placas.



FIGURA 2 - Aspecto geral da experiência.

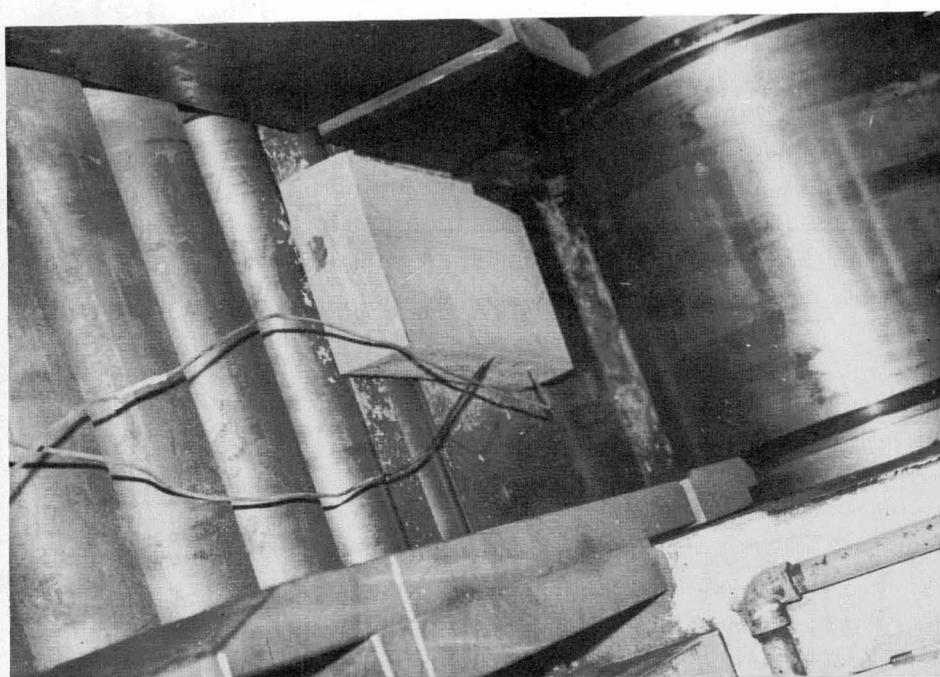


FIGURA 3 - Disposição dos termopares durante a laminação.

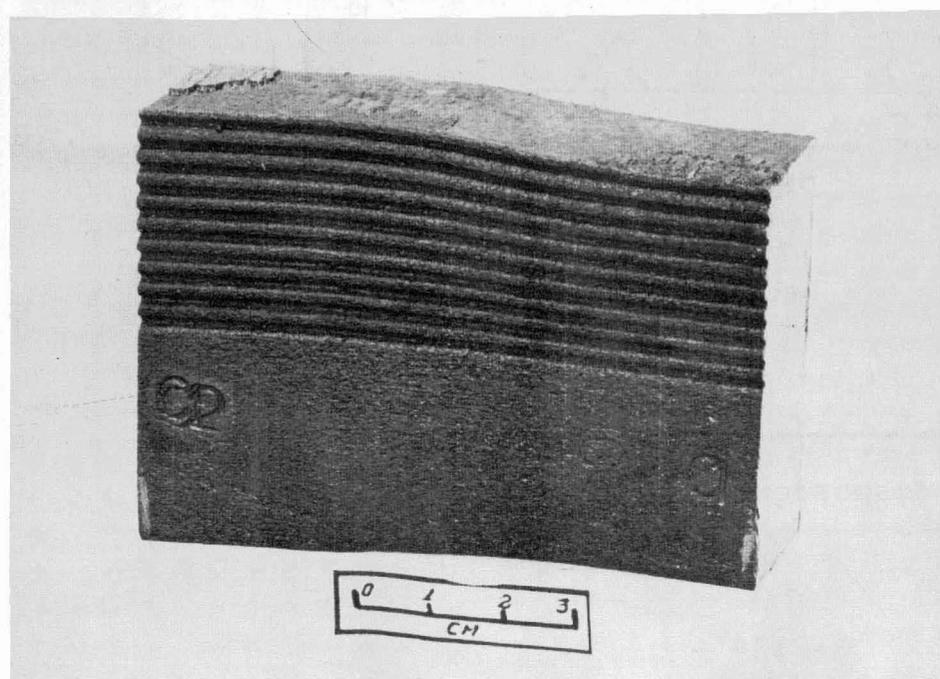


FIGURA 4 - Placa laminada parcialmente e frisos nas laterais.

FIGURA 5 - Fluxograma do modelo usado para cálculo do perfil de temperatura.

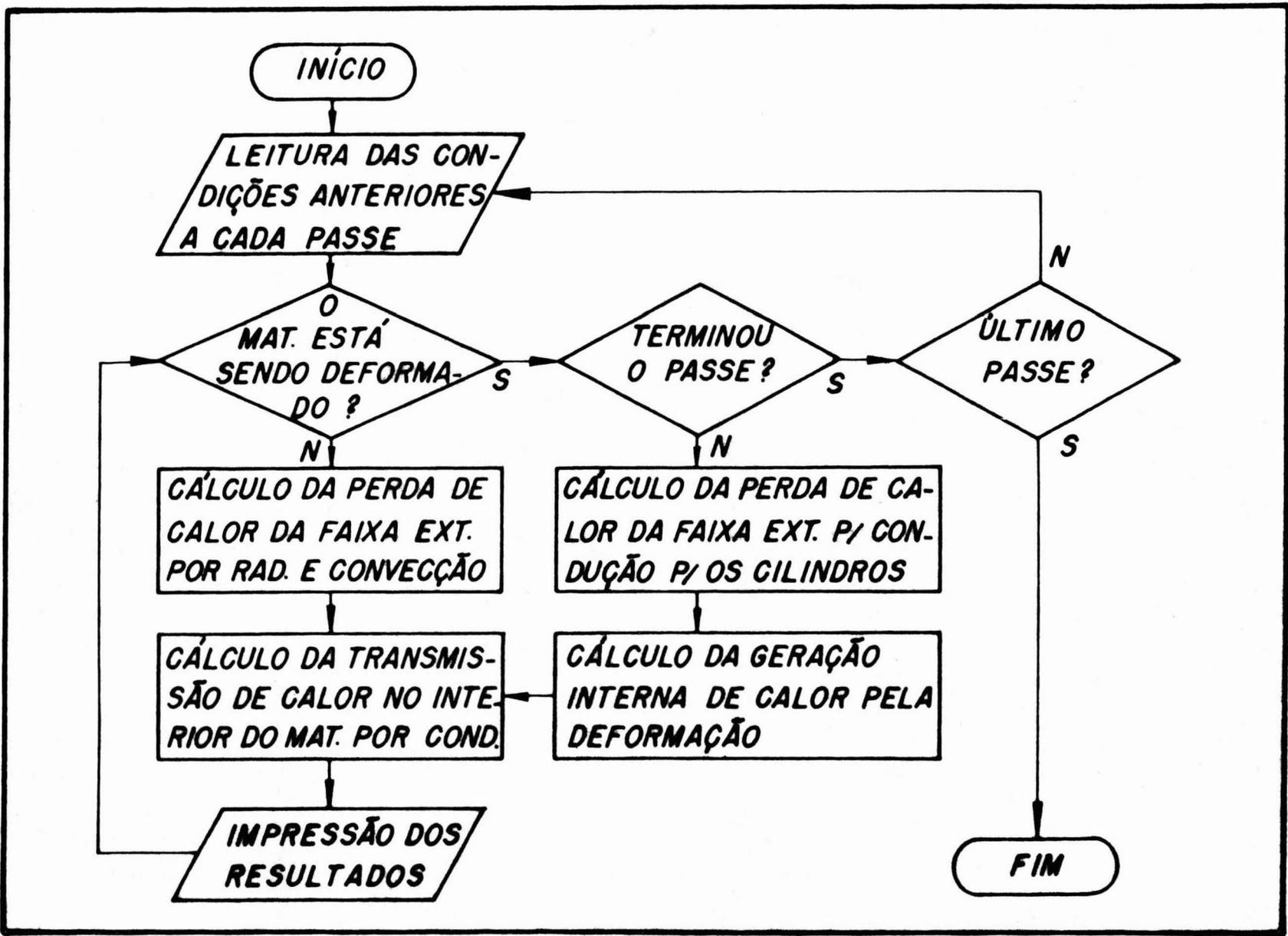
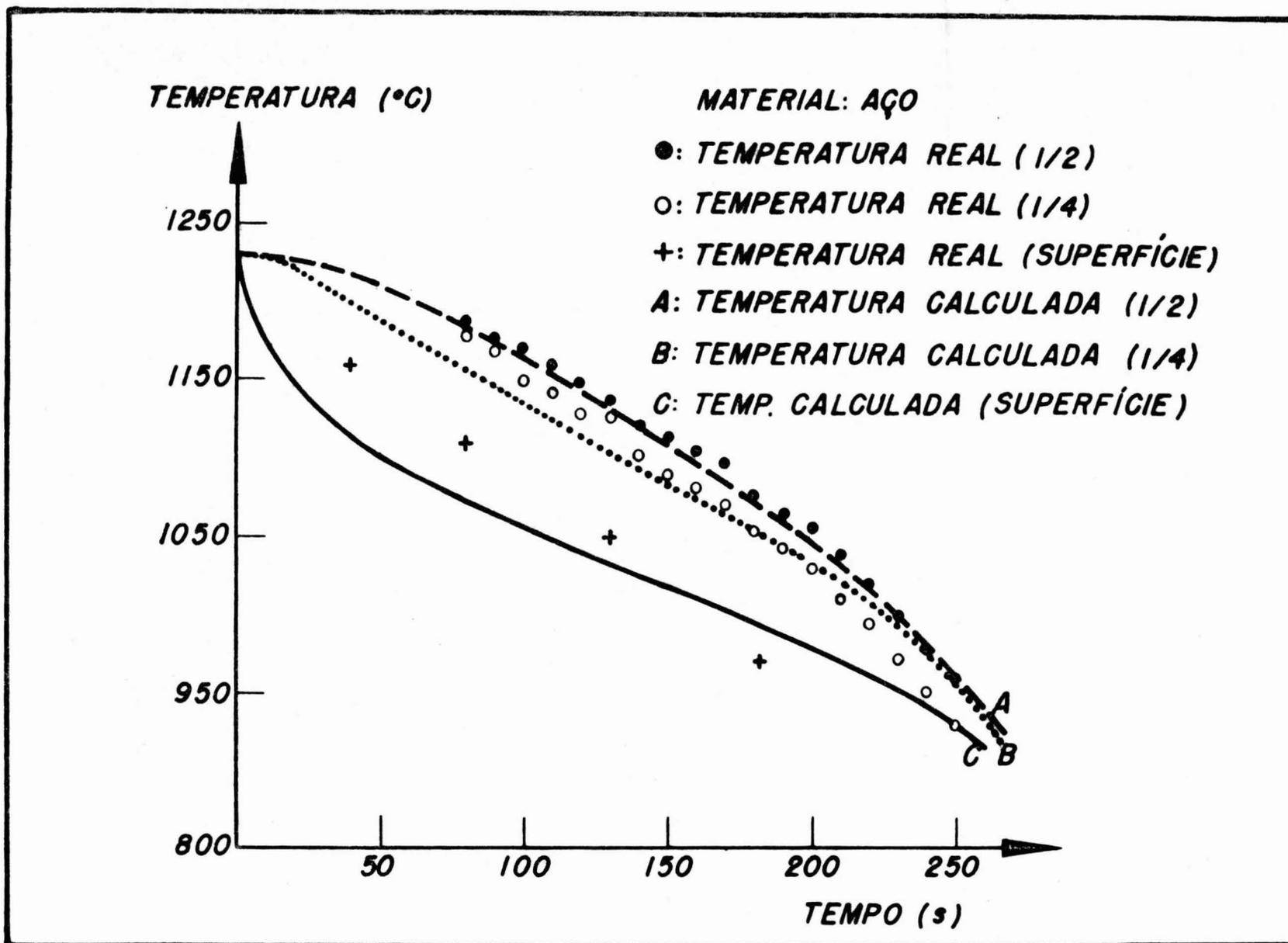


FIGURA 6 - Comparação dos resultados de temperatura calculados com os valores reais.



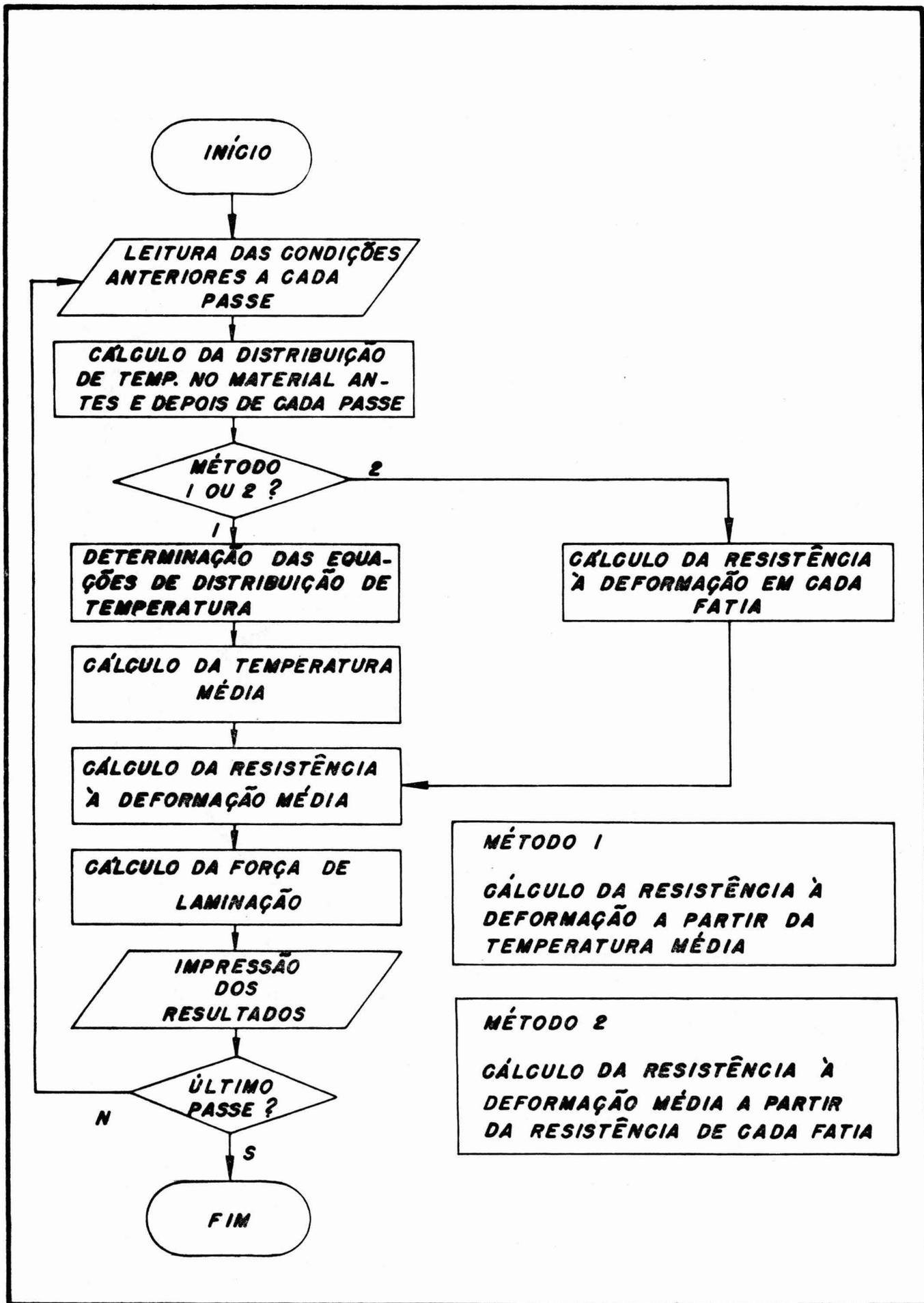


FIGURA 7 - Fluxograma do modelo de cálculo de força de laminação.

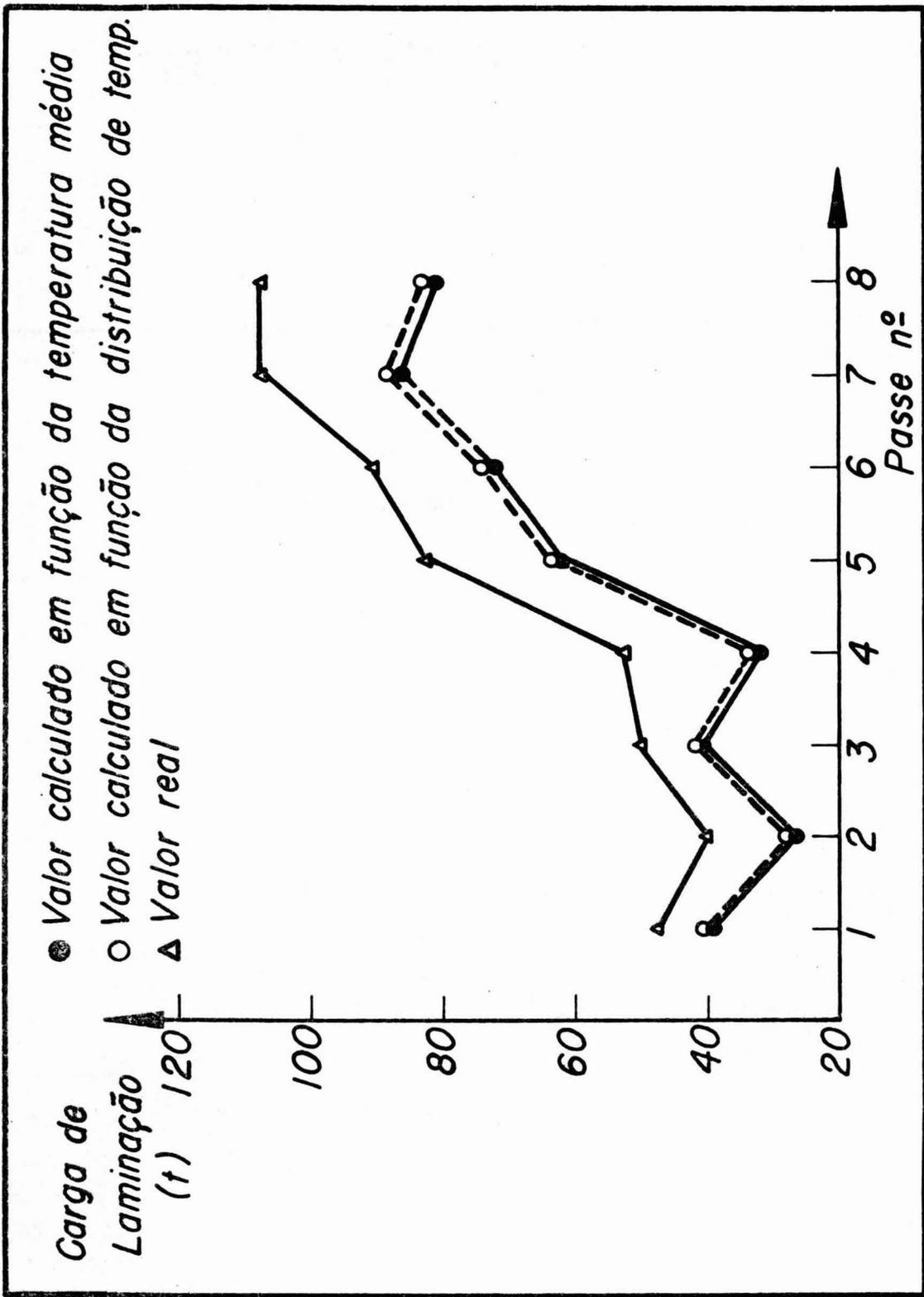


FIGURA 8 - Comparação dos valores de carga calculados com os valores reais.