

SIMULAÇÃO FÍSICA DAS CONDIÇÕES DO CADINHODO ALTO FORNO Nº 2 DA COSIPA (1)

Oswaldo Souza Dias Júnior (2)

Jeferson José Pinto Goes (3)

José Maria Lopes Netto (4)

R E S U M O

São apresentados os resultados obtidos em experiência realizada numa instalação piloto simulando as condições de trabalho do cadinho do Alto Forno nº 2 da COSIPA.

A estimativa da espessura do refratário remanescente numa região crítica do cadinho e um melhor conhecimento da eficiência do sistema como trocador de calor são as principais contribuições deste trabalho.

- 
- (1) Contribuição Técnica para ser apresentada no Seminário da COMIN/COMAP - Redução de Minério de Ferro e Matérias Primas, setembro de 1987 - Porto Alegre/RS.
  - (2) Assessor Técnico da Gerência de Metalurgia de Redução da COSIPA.
  - (3) Assessor Técnico da Superintendência de Produção da COSIPA.
  - (4) Técnico de Metalurgia e Qualidade da Gerência de Metalurgia de Redução da COSIPA.

## 1 - INTRODUÇÃO

A preservação e proteção contra o desgaste do cadinho são itens da maior importância para a operação do alto forno pois estão diretamente relacionados à duração de sua campanha, ou seja, à vida útil do equipamento.

Na figura nº 1 temos um esquema do cadinho do alto forno nº 2 da COSIPA construído basicamente com blocos de carbono e da disposição dos termopares de controle existentes.

A figura nº 2 mostra a localização dos termopares na região vizinha ao furo de gusa nº 1 com a sua respectiva numeração.

O termopar de nº 29 vem apresentando há vários meses um comportamento anormal com ocorrência de elevações frequentes de sua temperatura, conforme pode ser observado na figura nº 3.

No dia 14 de agosto de 1986 atingiu  $435^{\circ}\text{C}$ , valor bastante elevado em relação aos demais termopares. Face à este quadro esta região do cadinho tem sido motivo de constante preocupação pois é suspeita de estar sofrendo um processo de desgaste acentuado do revestimento.

Com o objetivo de obter-se um panorama mais claro da situação e das alternativas para contornar-se o problema, foram desenvolvidas duas experiências numa instalação piloto simulando as condições do cadinho do alto forno nº 2. Através destas foi possível determinar a eficiência de troca térmica do sistema e efetuar uma estimativa da espessura do refratário residual na região crítica, bem como testar possíveis alternativas para incrementar a refrigeração possibilitando formação de cascão protetor.

## 2 - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A figura nº 4 mostra a instalação piloto utilizada nos experimentos, a qual foi construída na área da máquina de moldar gusa nº 1.

Na primeira experiência, sem a utilização de resfriador suplementar, o forno foi aquecido conforme a curva da figura nº 6.

Inicialmente sem refrigeração externa até a temperatura do termopar 5 atingir  $500^{\circ}\text{C}$ , a partir daí foi aberto o spray a uma vazão de 1945 l/h. Prosseguiu-se o aquecimento do sistema até a temperatura do termopar 6 (face interna) ultrapassar  $1150^{\circ}\text{C}$  que corresponde aproximadamente à temperatura de formação do gusa pastoso. Segundo Szekely

et alii (1,2) a extensão da erosão do cadinho é, em essência, especificada pela posição da isoterma de  $1153^{\circ}\text{C}$ , que é a temperatura do eutético do diagrama de fase ferro-carbono.

A tabela nº I apresenta a evolução da temperatura dos termopares da instalação piloto durante o experimento, sendo que ao final deste foi cortada a alimentação de água para o spray externo. Procurou-se através deste procedimento determinar a evolução da temperatura da chapa sem refrigeração com o intuito de determinar o tempo e a temperatura que esta pode suportar sem comprometimento da sua resistência mecânica. Esta é uma informação importante que pode servir de referência para intervenções de manutenção no cadinho que impliquem no fechamento da água do sistema de refrigeração.

A tabela nº II mostra o comportamento das temperaturas médias do sistema para cada intervalo de temperatura no termopar 5, o que é ilustrado graficamente nas figuras nºs 7 e 8.

A tabela nº III exhibe a variação do gradiente de temperatura ou resistência térmica verificada entre a face quente e a fria de cada componente do sistema (blocos de carbono, massa carbonosa e chapa de aço). Este índice é dado pelo quociente entre a diferença de temperatura entre as faces e a espessura existentes entre elas. A representação gráfica deste é dada na figura nº 9.

A segunda experiência realizada na instalação piloto foi similar à primeira e teve a finalidade de verificar a eficiência do uso de refrigeração suplementar na região crítica. Para isto utilizou-se um resfriador de cobre conforme desenho da figura nº 5. A curva de aquecimento e o registro de temperatura estão respectivamente na figura nº 6 e tabela nº I. Contudo este experimento foi prejudicado pela ocorrência de vazamento na alimentação do resfriador provocando infiltração de água na massa de socagem de carbono.

A figura nº 10 exhibe a distribuição de temperatura da chapa refrigerada por spray, onde constata-se o seguinte:

- O filme de água à medida que afasta-se do spray diminui a espessura.
- As extremidades não são continuamente refrigeradas devido ao menor fluxo de água.

3 - CÁLCULOS E RESULTADOSEstimativa da Espessura do Refratário Remanescente

Quantidade de Calor Dissipada pela Carcaça  
da tabela nº I temos:

Vazão de água no spray = 1.945 l/h

Temperatura da água (11:00 horas de 25/09/86)

entrada = 25°C

saída = 38°C

$$Q = m c \Delta t$$

$$m = 1.945 \text{ Kg}$$

$$c = 0,9989 \text{ Kcal/Kg } ^\circ\text{C}$$

$$t = 38 - 25 = 13^\circ\text{C}$$

$$Q = 25.257,2 \text{ Kcal/h}$$

para a CHAPA DE ÁREA de 1,44 m<sup>2</sup> teríamos:

$$Q = 25.257,2 / 1,44 = 17.539,7 \text{ Kcal/h m}^2$$

Este valor está ligeiramente abaixo dos valores da literatura que são da ordem de 20.000 a 50.000 Kcal/h m<sup>2</sup>.

Quando o termopar 29 atingiu 435°C no dia 14/08/86 podemos admitir:

- temperatura da isoterma correspondente ao gusa pastoso = 1153°C

- temperatura medida na carcaça na ocasião = 40°C.

Esta situação é bem próxima da situação de 11 horas do dia 25/09/86 à menos da temperatura do termopar 3 que corresponderia ao termopar 29. Contudo há suspeita de que o mesmo foi instalado de uma forma inadequada não chegando a atingir o bloco de carbono. Tanto isto é possível que na segunda experiência, na qual o termopar 3 foi reinstalado de um modo melhor, o nível de temperatura atingido foi bem mais elevado.

Considerando-se a existência de fluxo de calor unidimensional, teríamos:

$$Q = \frac{K A}{L} (t_q - t_f)$$

$$Q = 17.539,7 \text{ Kcal/h m}^2$$

$$A = 1,44 \text{ m}^2$$

$$K = ?$$

$$\begin{aligned} L &= 110 \text{ mm} \\ t_q &= 1.307^{\circ}\text{C} \\ t_f &= 1.121^{\circ}\text{C} \end{aligned}$$

Daí obtém-se:  $K = 7,20 \text{ Kcal/h m }^{\circ}\text{C}$

Refazendo-se os cálculos para o intervalo de temperatura 1121 a 1153<sup>o</sup>C teríamos L = 19 mm. Logo a isoterma de 1153<sup>o</sup>C na instalação piloto estaria localizada numa espessura de refratário de 239 mm. Por extrapolação direta esta corresponderia à espessura residual do revestimento na região crítica.

Por outro lado, utilizando-se os dados da tabela nº III e figura nº 9 poderíamos fazer a estimativa a seguir:

- . Faixa de temperatura da face quente (gusa pastoso)  
= 1110 - 1199<sup>o</sup>C
- . Resistência térmica neste intervalo = 2,32<sup>o</sup>C
- . Para a camada de gusa pastoso (1153<sup>o</sup>C) teríamos:  
t = 1153 - 435 = 718<sup>o</sup>C

$$\text{Espessura residual} = 718 / 2,32 = 309 \text{ mm}$$

Tomando-se a média dos dois valores obtidos teríamos uma espessura residual de:

$$\frac{309 + 239}{2} = 274 \text{ mm}$$

Com base neste valor e considerando-se que não haja variação significativa da resistência térmica na passagem do bloco de carbono para o gusa pastoso, poderíamos calcular a espessura de cascão depositado para diferentes temperaturas do termopar 29, conforme mostra a tabela nº IV.

-- Determinação do Tempo Limite de Suspensão da Refrigeração da Carcaça

O aço empregado na carcaça do cadinho é o A-36, com espessura de 76,2 a 101,6 mm na região dos furos de gusa.

Este aço não deve trabalhar a temperaturas superiores a 15°C por recomendação da projetista IHI.

A tabela nº I no dia 25/09/86 a partir das 11:00 horas mostra que:

- 40 minutos após o corte da água de refrigeração a temperatura na face interna da chapa atingiu 149°C e na externa 110°C.
- quando é reaberta a água a temperatura da face externa cai muito rapidamente enquanto a interna ainda continua a subir um pouco.

Sabemos que:

$$L_i = L_o + L_o \times \alpha \times \Delta t$$

onde:

$L_i$  = dimensão linear após dilatação

$L_o$  = dimensão linear original = 9,8 m

$\alpha$  = coeficiente de dilatação linear =  $12 \times 10^{-6}$  / K (para aço doce)

$\Delta t$  = variação de temperatura (°C)

A dilatação no sentido longitudinal do cadinho é na face quente de 6,35 mm e na face fria de 8,23 mm, isto para a condição:

- . antes de fechar água : face fria = 40°C face quente = 95°C
- . após fechar a água : face fria = 110°C face quente = 149°C

Esta dilatação diferenciada gera tensões de cisalhamento que podem provocar micro-trincas na carcaça. Devido a isto, sugerimos que a temperatura da face externa com água fechada não ultrapasse 80°C, o que dará para a face quente 128°C e os gradientes em cada face são próximos (40°C e 34°C). Pelo experimento esta temperatura é atingida entre 20 e 23 minutos.

#### - Eficiência do Resfriador

A infiltração de água ocorrida na massa carbonosa de socagem durante a 2ª experiência prejudicou a interpretação dos resultados. Como pode ser observado na figura nº 6, após a abertura da alimentação de água para o resfriador ocorreu uma queda de temperatura de 185°C no termopar 3 (face do tijolo de carbono) no espaço de tempo de uma hora. Contudo após descida brusca voltou a subir. Nos demais termopares as variações verificadas foram bem menos significativas.

Pelo comportamento observado é provável que tenha ocorrido perda de contato entre o resfriador e a massa carbonosa com a infiltração de água, ocasionando perda de eficiência deste.

#### 4 - CONCLUSÕES

Pelos resultados dos experimentos e cálculos realizados foi possível tirar-se as seguintes conclusões:

- A espessura do bloco de carbono no alto forno nº 2 na região do furo de gusa nº 1 próximo ao termopar 29 está entre 239 e 309 mm. Desse que a medição de temperatura deste termopar seja confiável e excluída a probabilidade de passagem de gás.

- A instalação de refrigeração suplementar entre a carcaça do forno e os blocos de carbono na região afetada deverá afastar a face quente para o interior do forno intensificando a velocidade de formação de cascão protetor.

- Como a proteção de cadinho está sendo feita por formação de cascão acelerada pelo uso de  $TiO_2$ , teor de Mn do gusa baixo, teor de Si mais elevado e intensidade de refrigeração, provavelmente teremos que manter a região do furo de gusa nº 1 com baixa atividade para evitar que o cascão venha a se desprender ou dissolver no gusa líquido. Isto poderá ser obtido pela menor taxa de utilização da casa de corrida 1 (máximo 25% das corridas) e manter fechadas as ventaneiras próximas ao furo de gusa. No início as de números 1, 2, 3, 32 e 33 e após a temperatura do termopar 29 cair abaixo de 250°C, manter as ventaneiras 33 e 1.

- O sistema atua de modo geral como um bom trocador de calor, sendo a parte mais deficiente a camada de massa de carbono socada. A pior situação é a existência de descontinuidade nesta camada, pois como os blocos de carbono são bons condutores de calor rapidamente ten

deriam a equalizar a temperatura entre as duas faces aumentando o risco de solubilização pelo gusa.

- O sistema do spray do cadinho deve ser corrigido para aumentar a sua eficiência. Para isso podem ser adotadas as seguintes medidas:

. Instalação de sprays suplementares na região de intersecção dos diferentes anéis de sprays para eliminar a região deficitante nos extremos.

. Colocação de calhas defletoras na região do termopar 29 abaixo dos sprays existentes ou a instalar para manter a água em contato com a carcaça evitando o deslocamento do filme.

- Em caso de necessidade de se fechar a água de refrigeração do cadinho numa dada região para intervenções de manutenção, a temperatura da face externa não deve exceder a 80°C a fim de evitar solicitações mecânicas excessivas na carcaça gerando trincas.

## 5 - BIBLIOGRAFIA

(1) Yoshikawa J. & Szekely J. - Mechanism of blast furnace hearth erosion. Ironmaking Steelmaking, London, 8 (u): 159-68, 1981.

(2) Koji, Shimomura - Análise da Medição de Quantidade de Corrosão de Refratários do Cadinho do Alto Forno - Tradução José Tuzukiu. Cubatão, COSIPA - CIT, 1983, 6p  
Tetsu to Hagané, Tokyo, 67 (9): A 131-2, jul. 1981.

ESTIMATIVA DA ESPESSURA DO REFRAATÁRIO REMANESCENTE

## • QUANTIDADE DE CALOR DISSIPADA PELA CARÇAÇA.

VAZÃO DE ÁGUA NO SPRAY = 1.945 l/h  
 TEMPERATURA DA ÁGUA (11:00 HORAS DE 25/09/86)  
 ENTRADA = 25°C  
 SAÍDA = 38°C

$$Q = mc \Delta t$$

$$m = 1.945 \text{ Kg}$$

$$c = 0,9989 \text{ Kcal/Kg } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t = 38 - 25 = 13^\circ\text{C}$$

$$Q = 25.257.2 \text{ Kcal/h}$$

$$Q = 25.257,2 / 1,44 = 17.539,7 \text{ Kcal/h m}^2$$

$$Q = \frac{K A}{L} (t_q - t_f)$$

$$Q = 17.539,7 \text{ Kcal/h m}^2$$

$$A = 1,44 \text{ m}^2$$

$$t_q = 1.307^\circ\text{C}$$

$$t_f = 1.121^\circ\text{C}$$

DAÍ OBTÉM-SE:

$$K = 7,20 \text{ Kcal/h m } ^\circ\text{C}$$

PARA O INTERVALO DE TEMPERATURA DE 1121 Å 1153°C L = 19 mm  
 LOGO A ISOTERMA DE 1153°C (GUSA PASTOSO) ESTARIA A:

$$220 + 19 = 239 \text{ mm DE REFRAATÁRIO}$$

COM BASE NA TABELA III E FIGURA 9 TEMOS:

- FAIXA DE TEMPERATURA DA FACE QUENTE (GUSA PASTOSO) = 1110 - 1199°C
- RESISTÊNCIA TÉRMICA = 2,32°C
- $\Delta t = 1153 - 435 = 718^\circ\text{C}$

$$\text{ESPESSURA RESIDUAL} = 718 / 2,32 = 309 \text{ mm}$$

VALOR MÉDIO:

$$\frac{309 + 239}{2} = 274 \text{ mm}$$

AVALIAÇÃO DA ESPESSURA DO CARCÃO FORMADO APÓS 14/08/86

TEMPERATURA DO TERMOPAR Nº 29	ESPESSURA DO REFRAATÁRIO (mm)	ESPESSURA DO CASCAÃO (mm)	ESPESSURA TOTAL (mm)
435	274	0	273
300	274	92	366
270	274	105	379
250	274	114	388
200	274	135	409

DETERMINAÇÃO DO TEMPO LIMITE DE SUSPENSÃO DA REFRIGERAÇÃO DA CARÇAÇA

$$L_i = L_o + L_o \times \alpha \times \Delta t$$

L<sub>i</sub> = DIMENSÃO LINEAR APÓS DILATAÇÃOL<sub>o</sub> = DIMENSÃO LINEAR ORIGINAL = 9,8 m $\alpha$  = COEFICIENTE DE DILATAÇÃO LINEAR =  $12 \times 10^{-6}/K$  $\Delta t$  = VARIAÇÃO DE TEMPERATURA (°C) $\Delta L$  PARA FACE QUENTE = 6,35 mm E PARA FACE FRIA = 8,23 mm PARA:

- ANTES DE FECHAR A ÁGUA: FACE FRIA = 40°C FACE QUENTE = 95°C
- APÓS FECHAR A ÁGUA : FACE FRIA = 110°C FACE QUENTE = 145°C (40 min)

RECOMENDAÇÃO  $t_{ext} < 80^\circ C$  ;  $t_{int} = 128^\circ C$  (20 - 23 min)

GRAD PRÓXIMOS

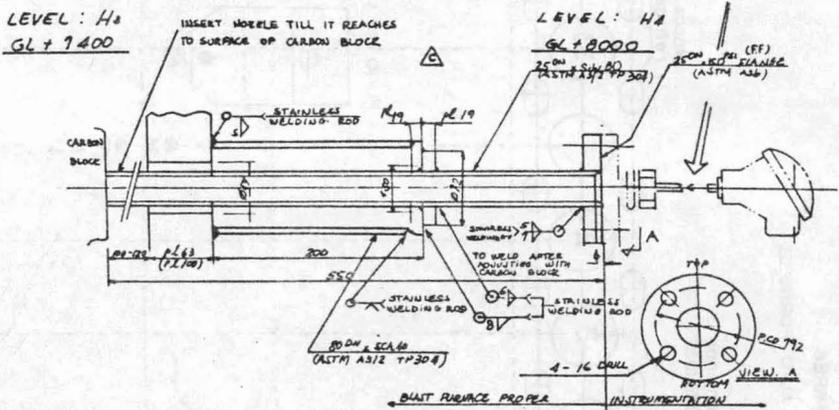
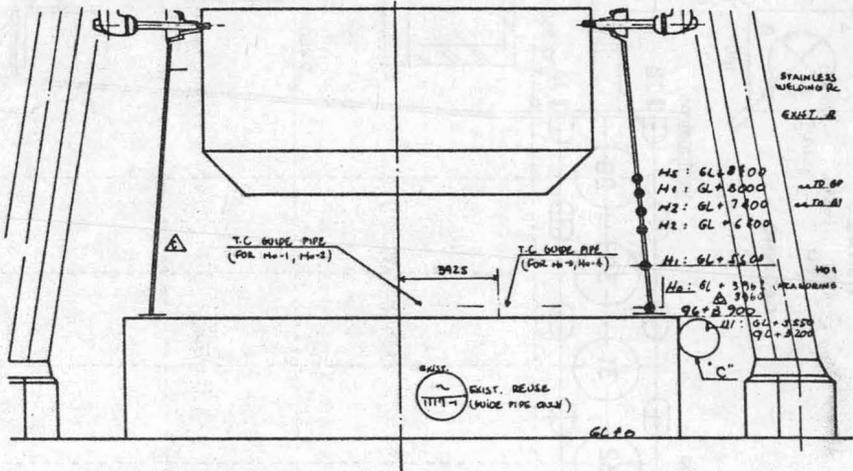
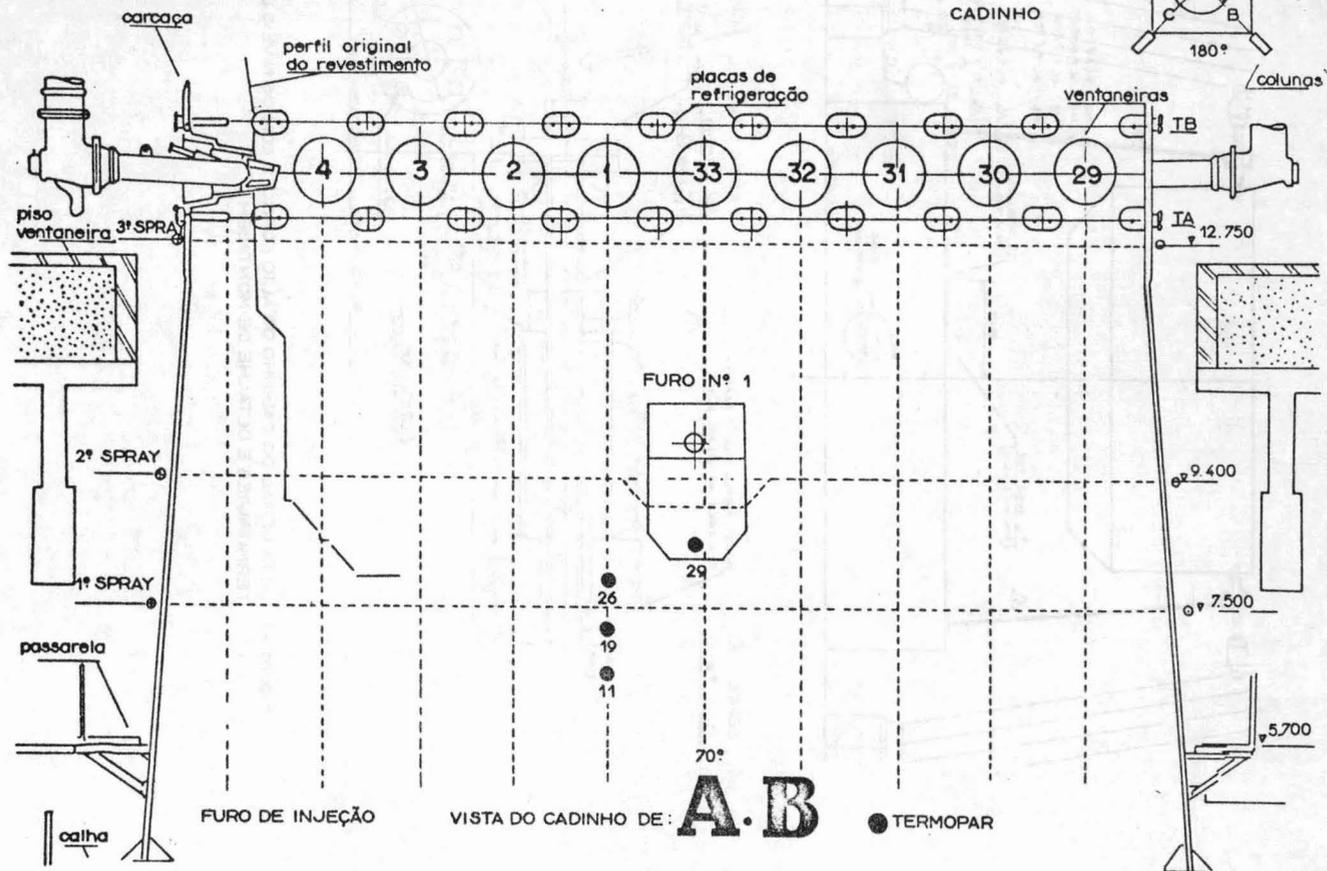


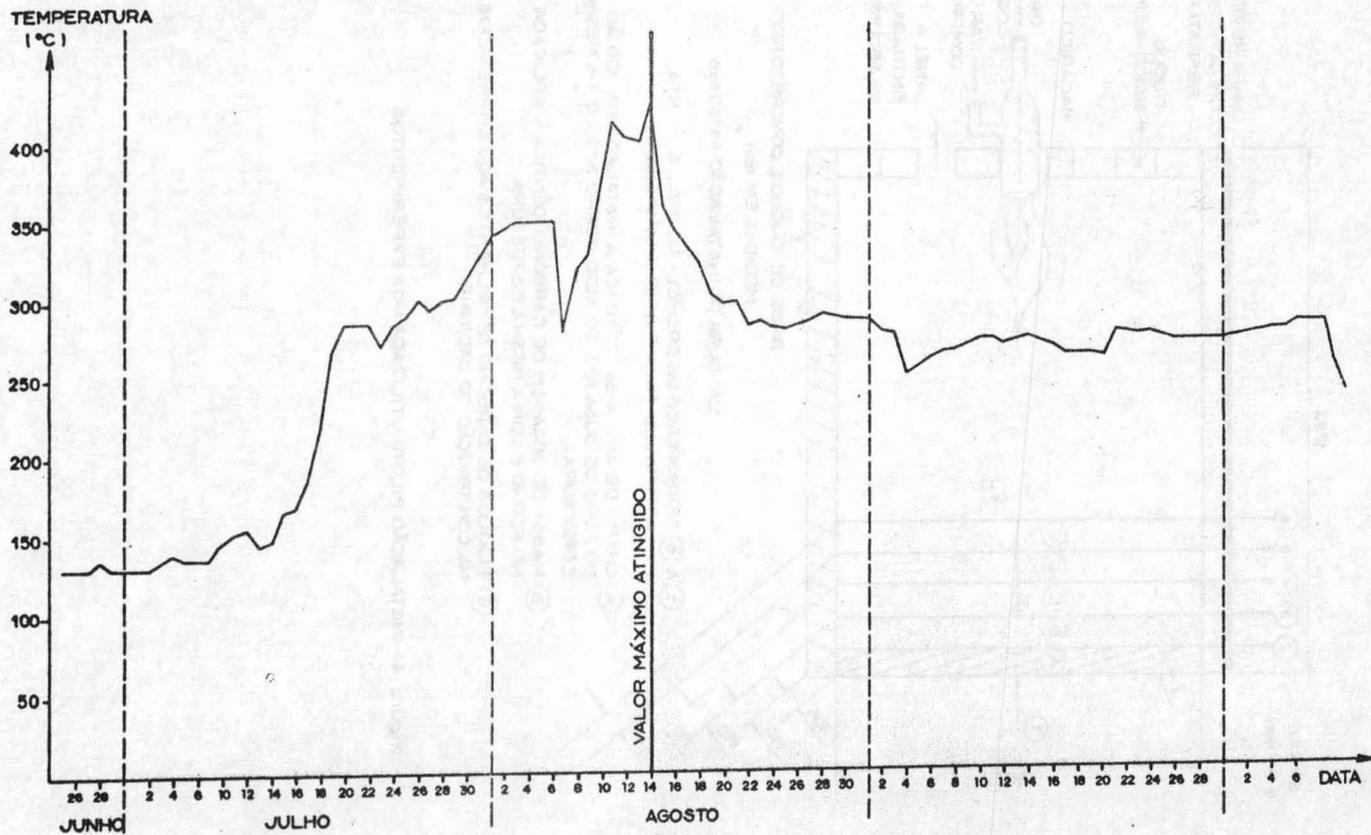
Figura - 1: VISTA GERAL DO CADINHO DO ALTO FORNO - 2 COM OS NÍVEIS DE TERMOPARES E DETALHE DE MONTAGEM.

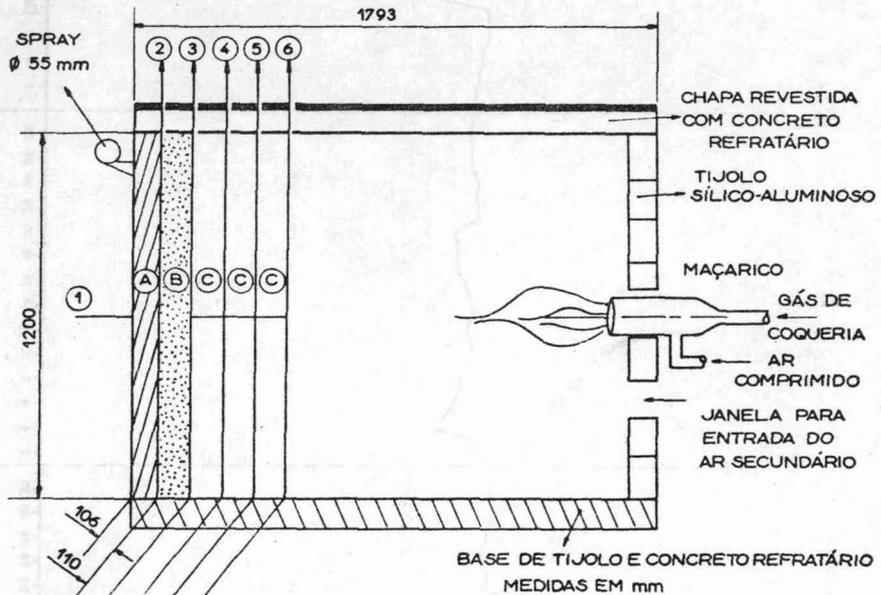
Figura - 2 :  
 MAPEAMENTO DOS TERMOPARES  
 CADINHO DO ALTO FORNO II



4.26

FIGURA-3 : EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA DO TERMOPAR - 29





LARGURA DA INSTALAÇÃO = 1360 mm

- ① A ⑥ TERMOPARES DE CROMEL \* ALUMEL, O DE Nº 6 REMOVÍVEL PARA EVITAR CHAMA DIRETA
- ② A CHAMA DE AÇO A-36 IDÊNTICA À INSTALADA NA REGIÃO DO FURO DE GUSA Nº1 DO ALTO FORNO Nº2 COM A MESMA ESPESSURA.
- ③ B MASSA DE SOCAGEM DE CARBONO IDÊNTICA À APLICADA NO FORNO E COM A MESMA ESPESSURA.
- ④ C TIJOLOS DE CARBONO SEMELHANTES AOS EMPREGADOS NA CONSTRUÇÃO DO CADINHO.

Figura 4 - INSTALAÇÃO PILOTO UTILIZADA NOS EXPERIMENTOS

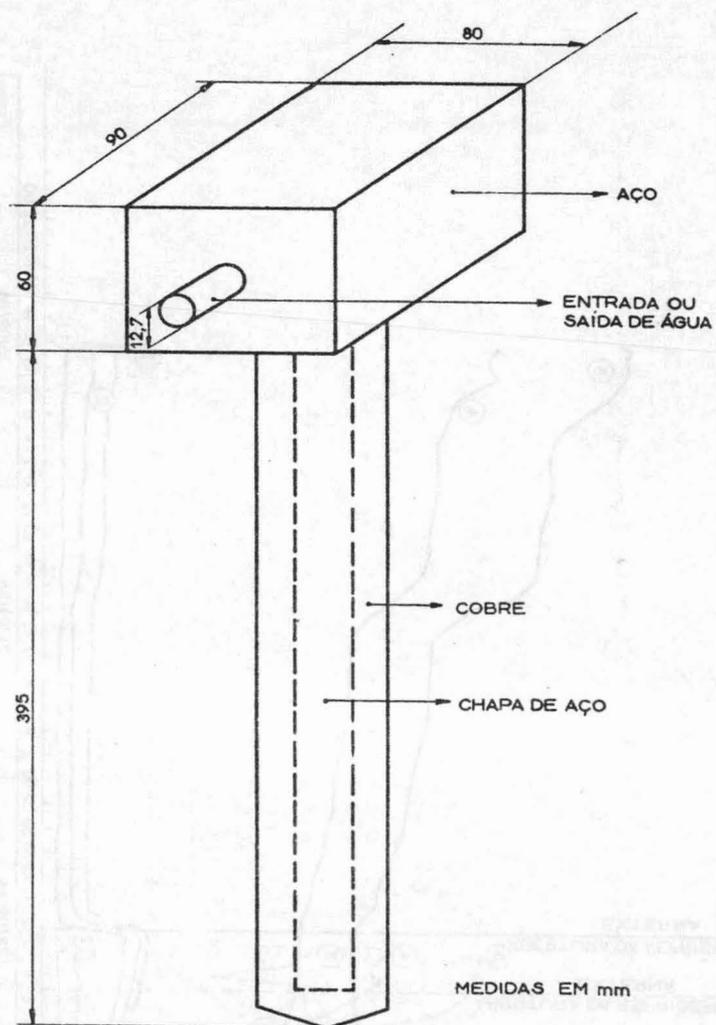
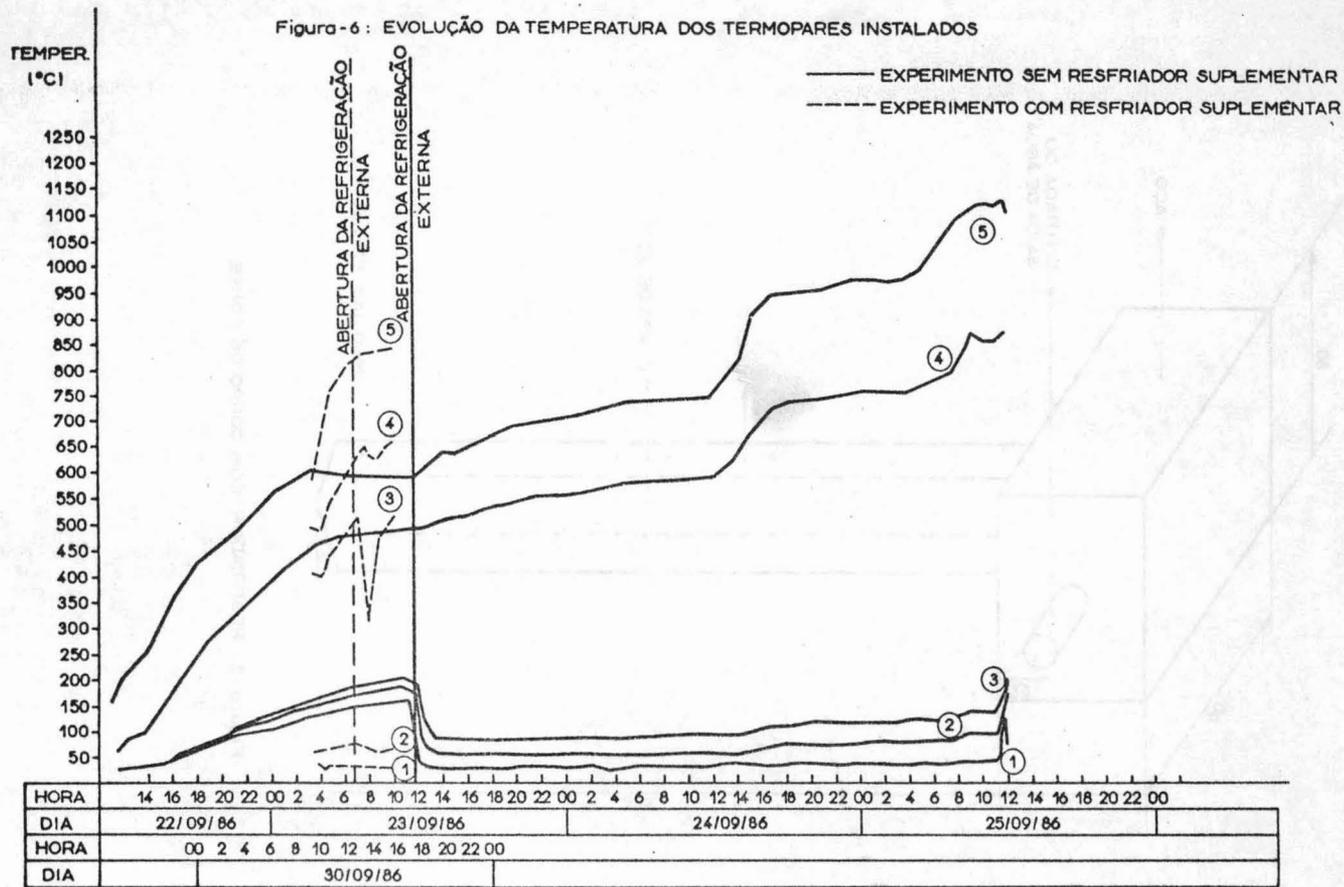


Figura - 5: RESFRIADOR COM CORPO DE COBRE

Figura-6 : EVOLUÇÃO DA TEMPERATURA DOS TERMOPARES INSTALADOS



TEMPERATURA  
(°C)

Figura - 7 : VARIAÇÃO DE TEMPERATURA DO CONJUNTO SEM REFRIGERAÇÃO EXTERNA

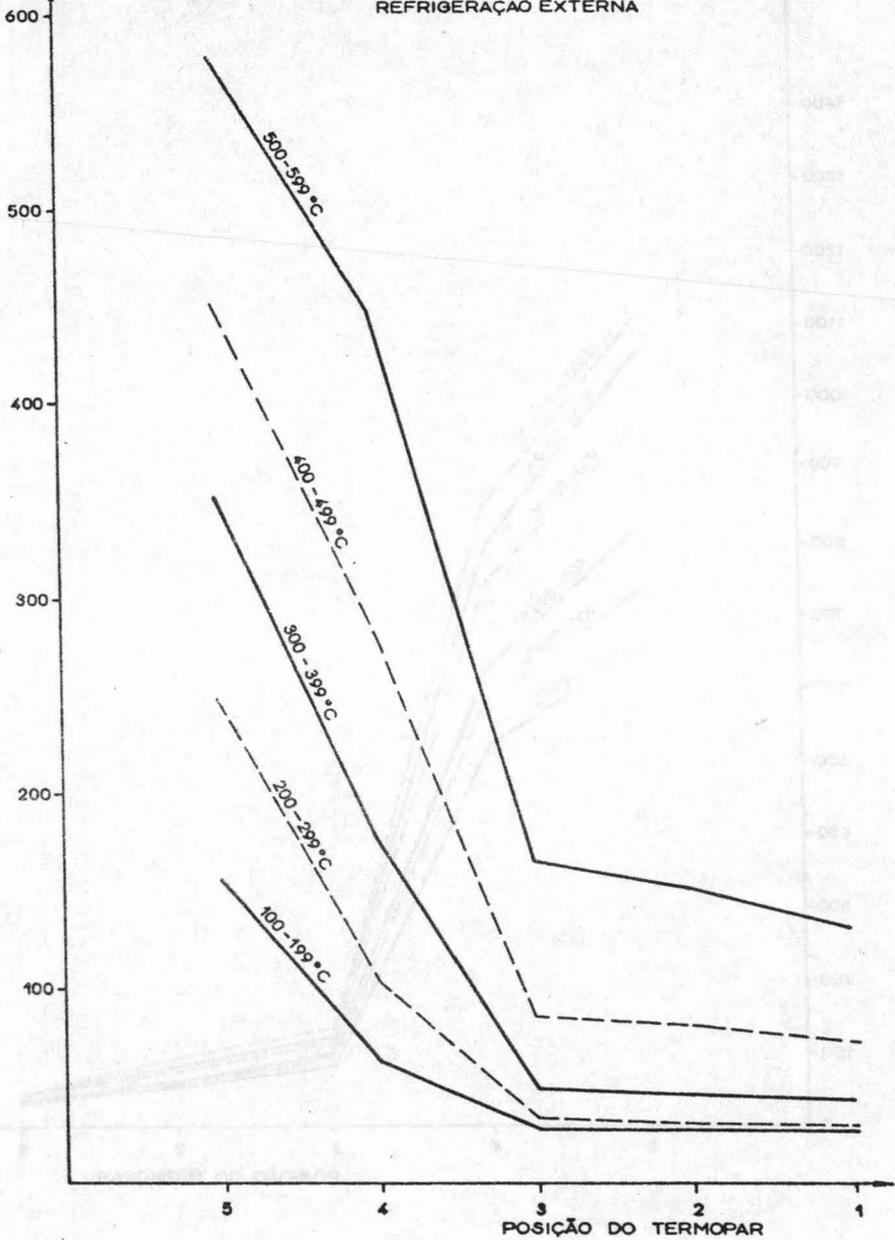


Figura-8: VARIAÇÃO DE TEMPERATURA DO CONJUNTO COM REFRIGERAÇÃO EXTERNA

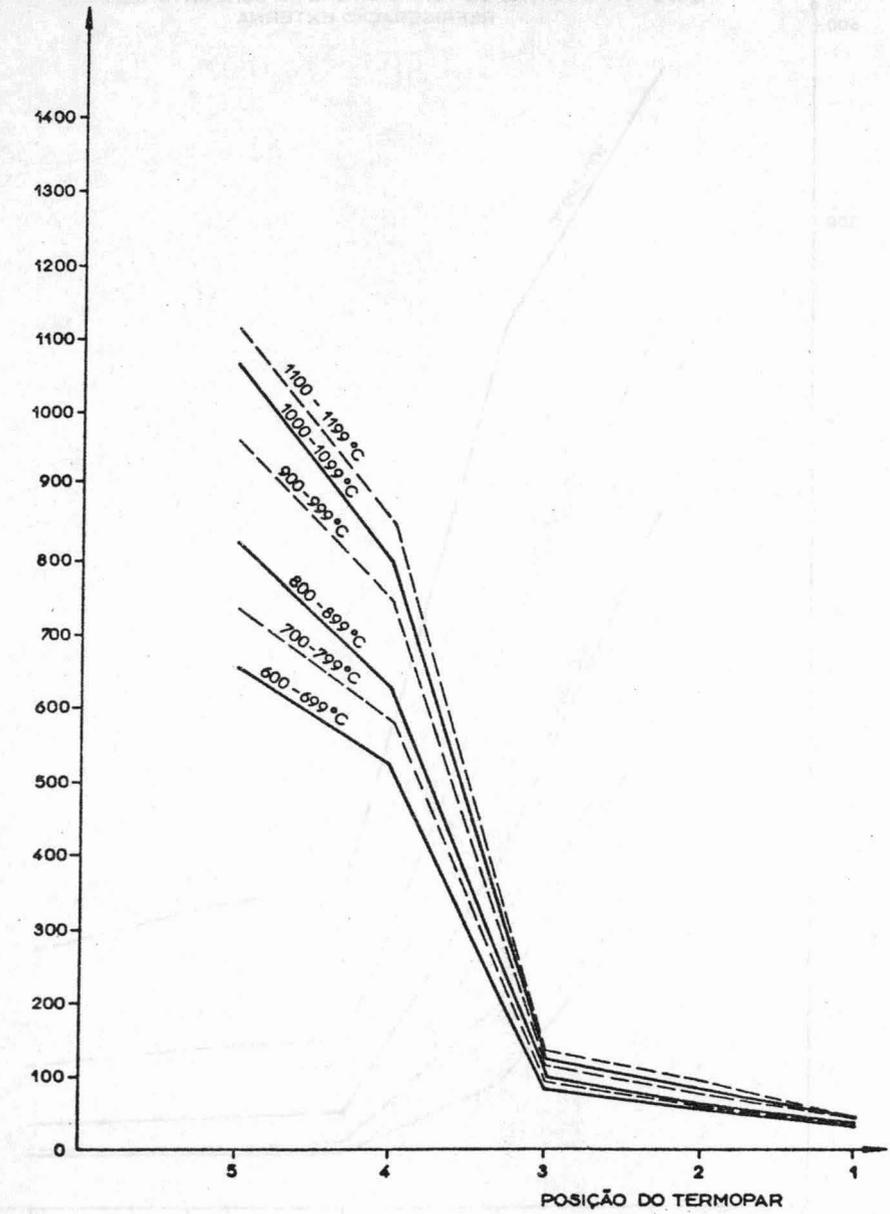
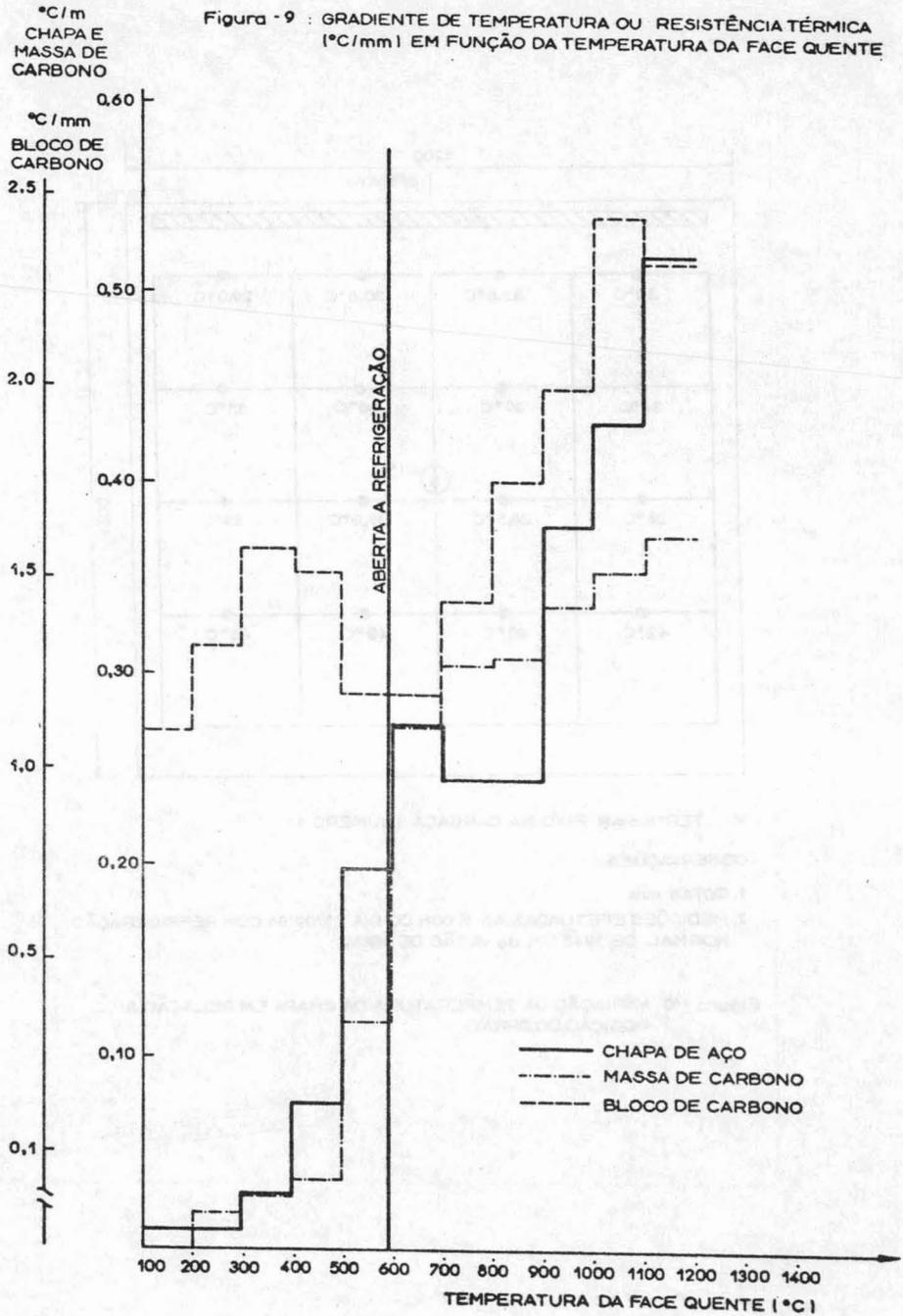
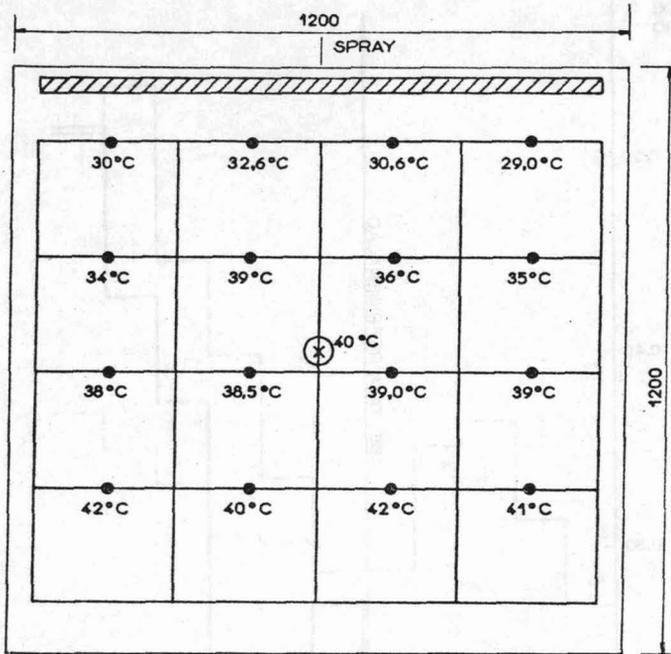


Figura -9 : GRADIENTE DE TEMPERATURA OU RESISTÊNCIA TÉRMICA  
 (°C/mm) EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA DA FACE QUENTE





X - TERMOPAR FIXO NA CARÇAÇA (NÚMERO 1)

OBSERVAÇÕES:

1. COTAS mm
2. MEDIÇÕES EFETUADAS AS 11:00h DO DIA 25/09/86 COM REFRIGERAÇÃO NORMAL DE 1945 l/h de VAZÃO DE ÁGUA.

Figura - 10 VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DA CHAPA EM RELAÇÃO A POSIÇÃO DO SPRAY.