



ANAIS		PROCEEDINGS
	<b>5º SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE TUBULAÇÕES E VASOS DE PRESSÃO</b>	
	<b>1º SIMPOSIO LATINOAMERICANO SOBRE TUBERIAS Y RECIPIENTES DE PRESION</b>	
	<b>SALVADOR 25 - 28 DE OUTUBRO 1988</b>	
TRABALHO Nº 15		PP. 227-239

ANÁLISE TERMO-HIDRÁULICO-MECÂNICA DO CIRCUITO A SÓDIO SS-050  
DURANTE UM CHOQUE TÉRMICO DE  $-200^{\circ}\text{C/s}$

Carlos Alexandre de Jesus Miranda  
Anibal Nabib Gebrim  
Departamento de Reatores - DERE/IEN/CNEN

SUMÁRIO

Desenvolveu-se um modelo analítico termohidráulico para obter as temperaturas do sódio que flui entre o tanque de mistura TM, de volume constante, e o tanque de dreno do circuito SS-050, considerando também a tubulação que os conecta. Apresentam-se os resultados para um caso teste do modelo e respectivo programa desenvolvido e para uma situação típica do circuito: choque térmico de  $-200^{\circ}\text{C/s}$  na seção de provas, em termos de curvas de variação das temperaturas, do sódio, no tempo e ao longo da tubulação. Para o segundo caso foi calculado o campo de temperaturas no fundo torosférico do TM e respectivo bocal e as tensões térmicas são estimadas. O cálculo preciso destas tensões permitirá a verificação detalhada do projeto do circuito.

SUMMARY

An analytical thermo-hydraulic model was developed to obtain the temperature of the sodium flowing between the mixing tank TM of constant volume and the drain tank of the SS-050 sodium test facility. The piping connecting these two tanks is considered in the analysis. The sodium enters in the TM through a tube with lateral holes immersed in the TM's sodium. The model and relative computer program were tested and a typical situation was studied: a thermal shock with  $-200^{\circ}\text{C/s}$  of thermal gradient in the test section. The sodium temperature time-histories along the piping length are presented. For the thermal shock situation, the temperature field in the TM bottom and outlet nozzle was calculated and the stresses were evaluated. The final thermal stresses will allow a detailed verification of the circuit design.

## 1. Introdução

### Circuito a Sódio SS-050

Este circuito visa a realização de provas termomecânicas e de pequenos componentes em sódio e é um instrumento capaz de permitir o desenvolvimento de competência na área. Em particular são possíveis estudos de materiais e equipamentos projetados para funcionarem com sódio líquido a temperaturas da ordem de  $500^{\circ}\text{C}$  e  $600^{\circ}\text{C}$ , como bombas eletromagnéticas e centrífugas, trocadores de calor sódio-sódio e sódio-ar, medidores de vazão e pressão, sondas de nível contínuas e descontínuas, detetores de fuga de sódio, etc. Também é possível estudar o comportamento dos materiais a estes níveis de temperaturas sob o efeito de choques térmicos repetidos em presença de esforços mecânicos que podem ser aplicados durante longos períodos, dando origem a fenômenos de "ratchetting", "creep" e danos por fadiga oligocíclica, etc. [1].

A parte do circuito SS-050 que interessa ao presente trabalho está esquematizada na fig. 1, onde são indicados os principais componentes.

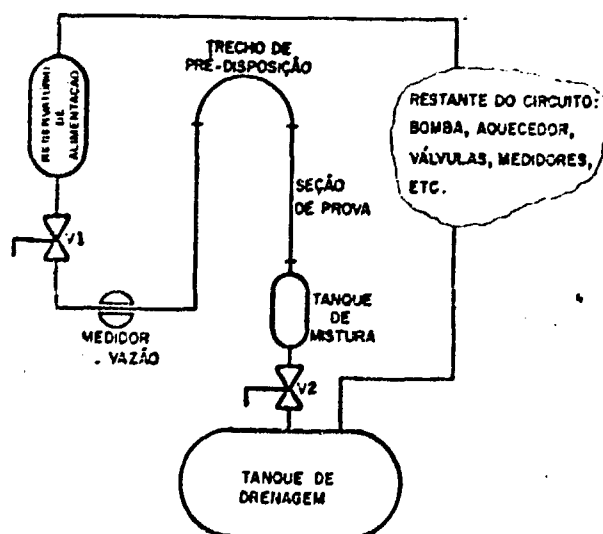


Figura 1 - Trecho do circuito SS-050

### Preparação para os Testes de Choque Térmico

Após a regulação da vazão desejada através da válvula V1 e com a válvula V2 fechada, cria-se o perfil de temperatura desejado do sódio, por exemplo de  $600^{\circ}\text{C}$  a  $400^{\circ}\text{C}$ , no trecho de predisposição por meio de resistências anelares colocadas em torno do tubo. A válvula V2 de acionamento rápido é aberta por cerca de 10 seg, dando início ao fluxo de sódio. O transiente de temperatura na seção de

provas (SdP), dura 1 seg., portanto a mesma sofre um choque térmico de  $-200^{\circ}\text{C/s}$ , para uma vazão máxima de  $30 \text{ m}^3/\text{h}$ . Esta vazão será utilizada nas análises apresentadas neste trabalho.

Imediatamente após a SdP encontra-se o tanque de mistura (TM), contendo cerca de 5 vezes o volume de sódio da seção de provas e do trecho de predisposição, inicialmente a temperatura final do transiente, cuja finalidade é atenuar o choque térmico no restante do circuito a sua jusante, até o tanque de drenagem (TD). O sódio penetra no TM por um tubo com furos laterais imerso no sódio do TM, criando um fluxo radial aproximadamente constante e forçando a sua mistura com o sódio que se encontra no TM, após o que o mesmo segue para o TD.

### Objetivo do Trabalho

Neste trabalho apresenta-se abreviadamente a formulação analítica desenvolvida para a obtenção das temperaturas em um fluido (sódio) que escoar através de um tanque de mistura (com volume constante), até um outro tanque (de dreno), considerando-se o efeito da tubulação que os interliga.

São obtidas as curvas da variação da temperatura do sódio ao longo do tempo e da tubulação para uma situação típica de funcionamento do circuito: choque térmico na SdP de  $-200^{\circ}\text{C/s}$  e calcula-se o campo de temperaturas na região do bocal de saída do TM através de um modelo de elementos finitos. As tensões térmicas resultantes são estimadas. Os valores finais destas tensões térmicas serão obtidos em análise posterior.

Com o presente trabalho prossegue-se a série de análises sugeridas na ref. [2] cujo início foi objeto da ref. [3].

### 2. Modelo de Cálculo Adotado na Análise Termohidráulica

Para a obtenção da evolução das temperaturas do sódio no interior do TM e da tubulação a sua jusante até o TD (ver fig. 1) foi desenvolvido o procedimento apresentado a seguir, cujos detalhes estão na ref. [3].

A discretização espacial do TM e da tubulação a jusante, até o reservatório TD, em um determinado número de pontos N1 e N2 respectivamente, é mostrado na fig. 2.

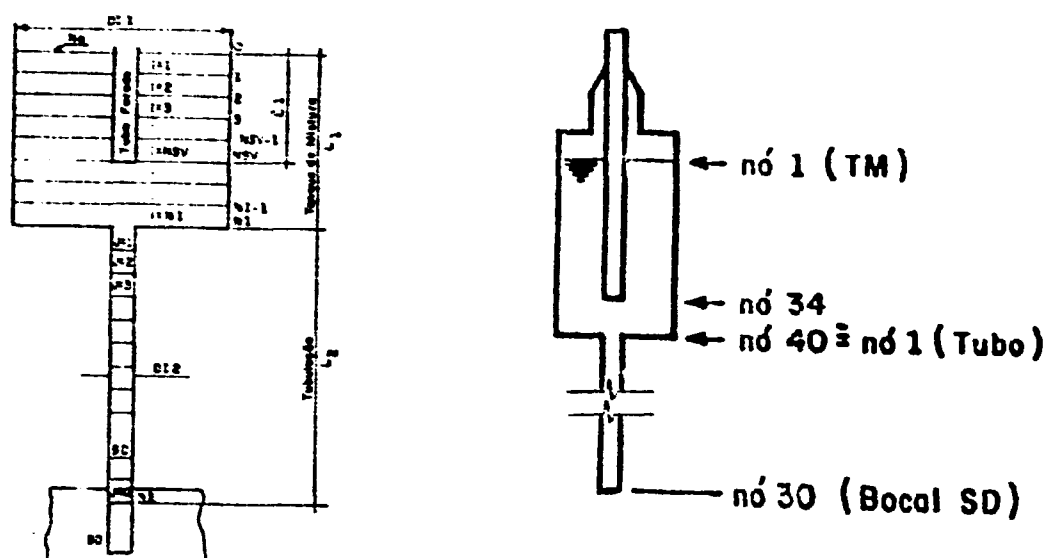


Figura 2 - Discretização do TM e da tubulação a sua jusante

A taxa líquida de energia que permanece no volume  $\Delta V_i, i=1, N_i$ , indicado esquematicamente na figura 3 é resultante do balanço energético entre a taxa de calor que penetra pelo lado esquerdo  $m^* CT^*$ , a taxa de calor que chega por cima,  $m^{**} CT^{**}$ , a taxa de calor que sai por baixo,  $m^{***} CT^{***}$  e a taxa de calor entre a parede metálica e o sódio,  $\dot{Q}_i$ . A equação que descreve o balanço energético no volume  $\Delta V_i$  é expressa como:

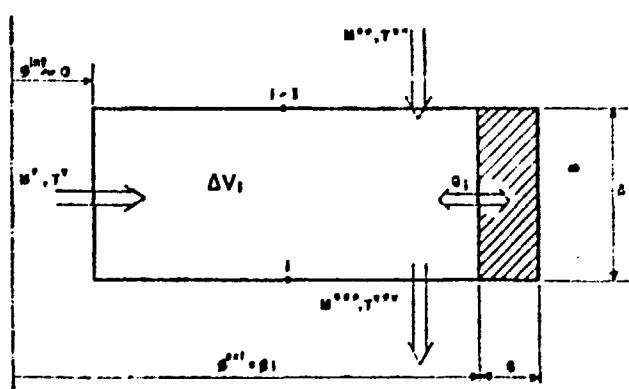


Figura 3 - Balanço energético no volume  $\Delta V_i$  ( $L_1=72.3$  cm e  $L_2=7.7$  m).

$$\rho \cdot C \Delta V \frac{\partial T}{\partial t} = m^* CT^* + (i-1)m^* CT_{i-1}^* + i m^* CT_i - \dot{Q}_i \quad (1)$$

onde  $m^*$  é a vazão do trecho do tubo furado dentro do TM;  
 $C$  é o calor específico do sódio;

$T^*$  é a temperatura do sódio que passa pela seção de provas antes de ingressar no TM;

$$m^{**} = (i-1).m^*; m^{***} = i.m^*$$

$T^{***}$  ( $=T_i$ ) é a temperatura média no volume  $\Delta V_i$  que se deseja determinar

$\rho$  é a densidade do sódio no volume  $\Delta V_i$

A taxa de calor recebida ou perdida para a parede é avaliada da seguinte maneira:

$$\dot{Q}_i = H_{\text{tot}} (\pi \theta_i \Delta Z) (T_i - T_{wi}) \quad (2)$$

onde  $H_{\text{tot}}$  é o coeficiente global de transferência de calor entre o sódio no volume  $\Delta V_i$  e a parede,  $T_{wi}$  é a temperatura média no volume  $\Delta V_{wi}$  da parede e  $\theta_i$  é o diâmetro interno da parede (parte hachurada da fig. 3).

A temperatura média na parede é avaliada através da integração espacial da equação de conservação de energia aplicada na parede:

$$\rho_w C_w \Delta V_{wi} \frac{\partial T_{wi}}{\partial t} = \dot{Q}_i \quad (3)$$

onde  $\rho_w$ ,  $C_w$  são respectivamente a densidade e o calor específico da parede. As propriedades físicas do sódio e do metal (calor específico, densidade, etc) podem ser considerados dependentes das temperaturas ou constantes a uma dada temperatura.

O esquema numérico de integração temporal de Euler é utilizado na avaliação do comportamento das temperaturas,  $T_i$  e  $T_{wi}$ , no tempo, cujas seguintes expressões finais são obtidas ao integrar-se a eq. (1) no intervalo  $\Delta T = t_{n+i} - t_n$  e supondo  $C, \rho, C_w, \rho_w$  constantes no intervalo  $\Delta T$ :

$$\begin{aligned} T_i^{n+1} &= \frac{(1-m^*.i.\Delta t)}{\Delta V_i \cdot \rho} \cdot T_i^n + \frac{(i-1)m^*.T_{i-1}^{n+1} \Delta t}{\rho \cdot \Delta V_i} \\ &+ \frac{m^*.T^* \Delta t}{\rho \cdot \Delta V_i} - \frac{Q_i^{n+1} \Delta t}{\rho \cdot C \cdot \Delta V_i} \end{aligned} \quad (4)$$

e

$$T_{wi}^{n+1} = T_{wi}^n + \frac{Q_i^{n+1} \cdot \Delta t}{\rho_w \cdot C_w \cdot \Delta V_w} \quad (5)$$

Assim, as expressões acima permitem o cálculo das temperaturu

ras médias nos volumes  $\Delta V_i$  e  $\Delta W_i$  no instante  $t_{n+1}$ , a partir dos valores já conhecidos no instante  $t_n$ .

O vazão  $m^*$  existe apenas nos NSV pontos iniciais em que foi discretizado o componente TM. O procedimento anterior aplica-se, também, nos volumes  $V_j$ ,  $j=1, N2$  da tubulação, onde não existe o fluxo lateral  $m^*$ .

#### Automatização do Procedimento e Teste

O procedimento anterior foi automatizado em um programa FORTRAN. Para a verificação dos mesmos analisou-se uma situação hipotética na qual a temperatura de ingresso no tanque de mistura (TM), mantém-se constante a  $600^\circ\text{C}$ . Como o volume do sódio é constante e o mesmo é renovado a cada instante, a temperatura final no tanque de mistura deve convergir para  $600^\circ\text{C}$ . Este valor é realmente obtido, como é apresentado na figura 4. Nesta figura vê-se a evolução das temperaturas do sódio nos pontos 34 (extremidade do tubo furado) e 40 (bocal de saída do TM) e no ponto 30 da tubulação (bocal do TD).

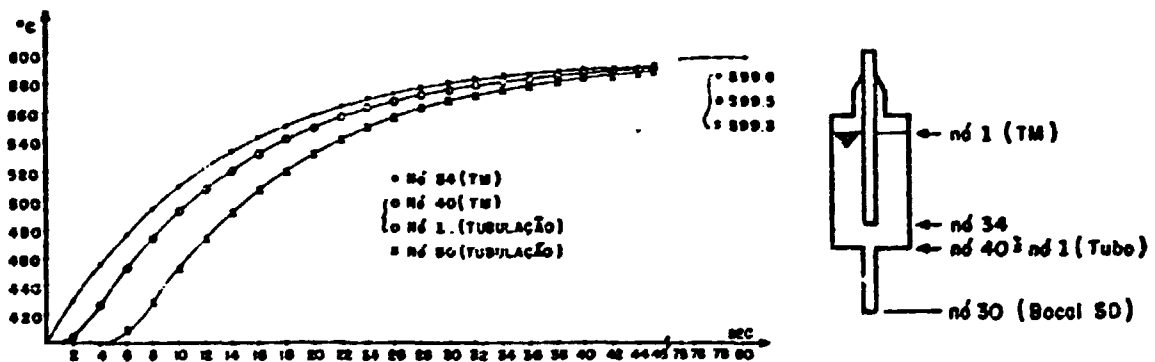


Figura 4 - Variação das temperaturas em três pontos típicos durante um escoamento estacionário

O tempo da análise, 80s, foi escolhido porque, com a vazão nominal de  $30 \text{ m}^3/\text{h}$  o volume de sódio que passa pelo TM, neste intervalo de tempo, é cerca de 660 l, portanto muito superior ao volume de sódio inicialmente a  $400^\circ\text{C}$  contido no TM (110 l).

Da figura 4 pode-se dizer que a frente de sódio atinge o reservatório TD após cerca de 5s depois de iniciado o fluxo. Este valor concorda com o cálculo do tempo necessário para o sódio, na camada  $i=NSV$  do IM (fig. 2), chegar ao ponto correspondente ao bocal do TD ( $i=N2$  da fig. 2) que é de cerca de 5.4s.

### 3. Choque Térmico Frio

#### Análise Termohidráulica

Esta é a situação típica de funcionamento do circuito SS-050, durante uma campanha de provas onde se testa uma seção de provas a choques térmicos. Esta situação é a mais crítica para o circuito a jusante da seção de provas. A evolução da temperatura do sódio de ingresso ( $T^*$ ), no tanque de mistura é apresentado na figura 5.

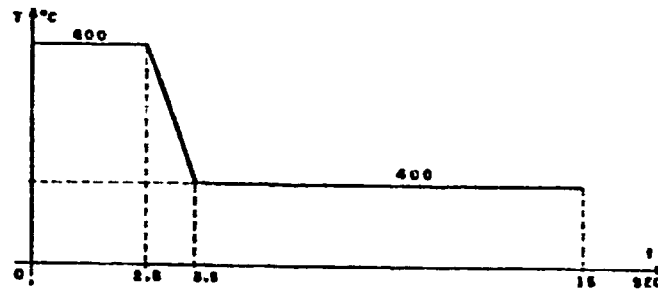


Figura 5 - Choque térmico frio de  $-200^{\circ}\text{C/s}$

O resultado da análise termohidráulica, em termos da evolução das temperaturas do sódio em 3 pontos do modelo é apresentado nas figuras 6.a e 6.b. Pela figura 6.b pode-se notar que, no nó 34 (extremidade do tubo furado), a temperatura aumenta a taxa de  $15.5^{\circ}\text{C/s}$  aproximadamente e no bocal de saída do tanque de mistura, nó 40, esta taxa cai para  $12.5^{\circ}\text{C/s}$ , enquanto que no nó 30 da tubulação (bocal do TD), cai para  $10^{\circ}\text{C/s}$ . Estes resultados mostram como a presença do tanque de mistura reduz sensivelmente a gravidade do choque térmico no bocal de saída deste e na tubulação a jusante do mesmo.

O intervalo de tempo (Time-Step) usado nos dois transitórios mostrados anteriormente, respeitou a seguinte expressão:

$$\text{Time-step} < \frac{L_i}{N_i \cdot V_{ELi}} \quad (6)$$

onde  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $N_1$ ,  $N_2$  estão definidos na figura 2 e  $V_{ELi}$  é a velocidade do sódio no trecho  $L_i$ ,  $i=1,2$ .

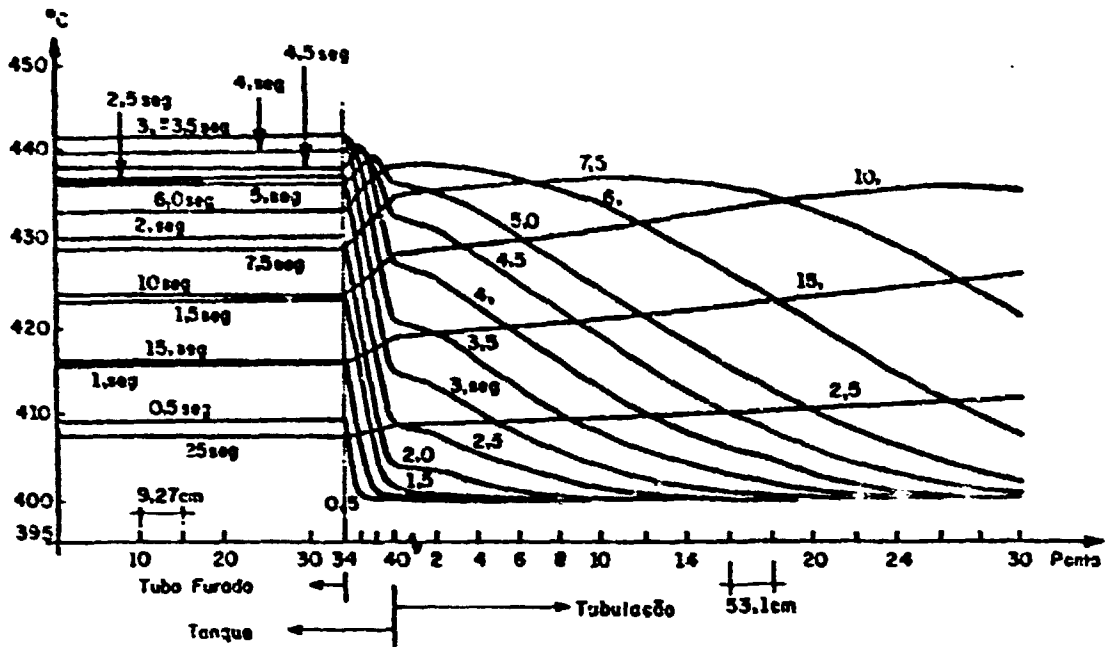


Figura 6.a - Variação das temperaturas, ao longo do trecho modelado, para alguns instantes de tempo

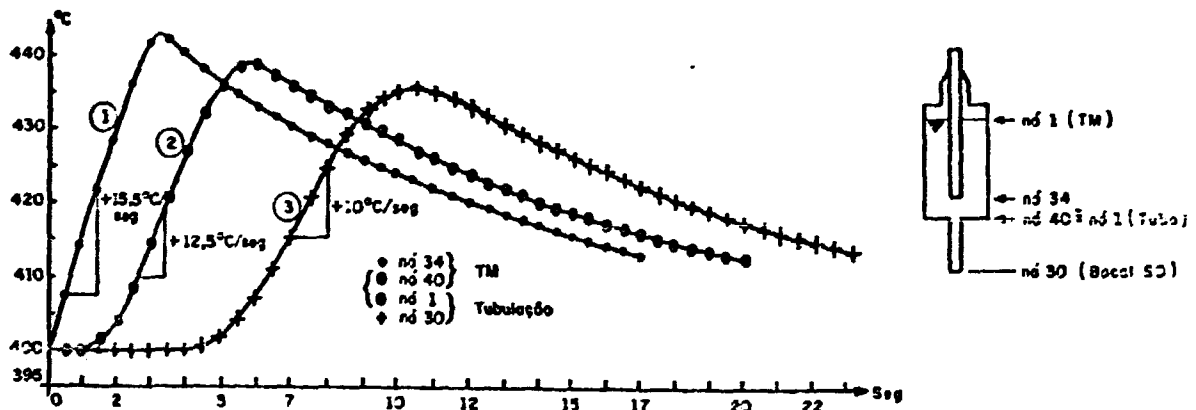


Figura 6.b - Variação das temperaturas, ao longo do tempo, em três pontos

#### Influência do Time-Step nos Resultados

Foi feito um estudo comparativo das temperaturas obtidas durante o choque térmico frio supondo 2 valores de time-step:

. TSTEP=0.01. com o qual foram obtidos os resultados apresentados nas figuras 6.a e 6.b.

. TSTEP=0.005

Os resultados obtidos com estes valores são idênticos, para fins práticos, como mostra a figura 7, onde indica-se o valor T0.01-T0.005 em vários instantes para os pontos já apresentados na figu



ra 6.b, sendo:

- . T0.01 = temperatura obtida com TSTEP=0.01
- . T0.005 = idem, TSTEP=0.005

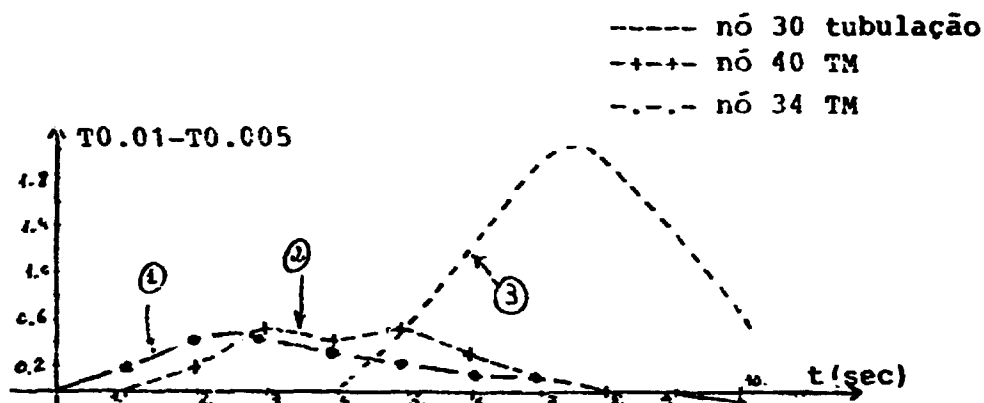


Figura 7 - Influência do Time-Step nos Resultados

O aumento do valor T0.01-T0.005 é devido a propagação de erros que se acumulam a medida que o cálculo evolui de um ponto para outro, nos instantes iniciais, enquanto sua diminuição com o passar do tempo pode ser atribuída a tendência de uniformização das temperaturas. As diferenças encontradas são insignificantes do ponto de vista prático para o dimensionamento e/ou verificação termo-mecânica dos componentes banhados pelo sódio do TM.

#### 4. Análise Térmica no Fundo do TM

A partir dos resultados obtidos com a análise termo-hidráulica, apresentada no item anterior, é possível efetuar análises térmicas nas paredes metálicas em qualquer ponto do circuito entre o TM e o TD, devido a variação de temperatura sofrida pelo sódio durante um choque térmico em uma campanha de provas.

##### Bocal do Fundo Torosférico do TM

A geometria do fundo do TM é apresentada na figura 8. A forte variação geométrica do fundo induz uma forte variação no coeficiente de troca de calor por convexão ( $h$ ) de 21950 até 1500  $W/m^2 \text{ } ^\circ C$ . Assim, existem no fundo do TM e em seu bocal de saída em particular, dois efeitos que se somam:

- . Gradiente Térmico na Espessura - produzido pela variação da temperatura do sódio no tempo.
- . Gradiente Térmico ao longo do fundo - devido a variação de  $h$  ocorre a variação da temperatura média, em um mesmo instante de

tempo, em pontos diferentes do fundo.

### Análise Térmica

Para a obtenção do campo de temperaturas foi utilizado o modelo a elementos finitos apresentado na figura 8. O programa térmico utilizado é capaz de efetuar análises térmicas em regime estacionário ou transiente.

Devido ao isolamento térmico previsto e a curta duração do transiente, a superfície externa do fundo/modelo foi considerada adiabática. Na superfície interna foram definidos valores de  $h$  por zonas, como indicado na figura 8. A temperatura do sódio imposta ao modelo é aquela apresentada na figura 6.b, curva 2. A partir dos 12. s cessa o fluxo portanto a temperatura do sódio permanece constante no valor alcançado neste instante (1). As partes cilíndricas do modelo se estendem por um comprimento mínimo de  $2\sqrt{rt}$ , onde  $r$  e  $t$  são, respectivamente, o raio e a espessura da parte interessada.

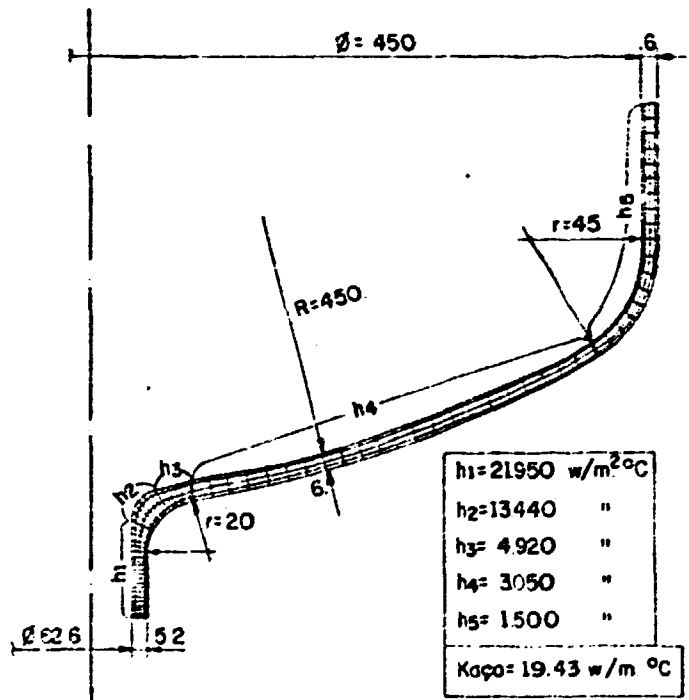


Figura 8 - Modelo de elementos finitos do fundo do TM utilizado na análise térmica (360 nós e 355 elementos).

### Resultados

Os resultados obtidos, em termos de temperaturas na seção em que ocorre o máximo  $\Delta T$  na espessura (seção no meio do "joelho" do bocal), são apresentados na figura 9 para alguns instantes de tempo selecionados. Na mesma figura também são apresentadas as temperatu

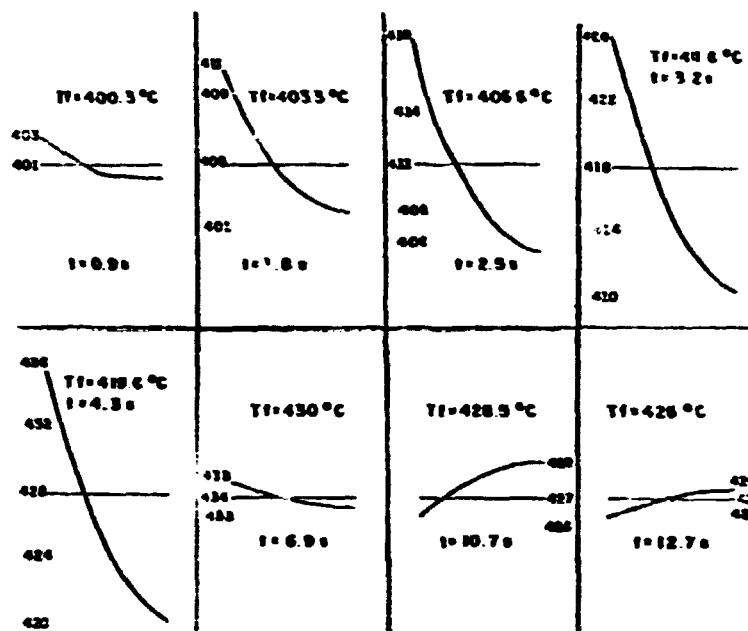


Figura 9 - Resultados da análise térmica, no bocal do fundo do TM ras médias na referida seção e na calota esférica que a circunda,  $T_f$ .

Da figura 9 se observa: a)  $\Delta T_{\max} = 16^\circ\text{C}$ ; b) o gradiente max. entre a calota esférica e o bocal é de  $9^\circ\text{C}$ ; c) os valores máximos ocorrem praticamente no mesmo instante; d) verifica-se uma inversão no  $\Delta T$  na espessura, o que provocará tensões térmicas de flexão alternadas; e) idem, no  $\Delta T$  entre o bocal e a calota que o circunda, provocando tensões térmicas alternadas de membrana.

Na figura 10 são apresentados os resultados em termos da evolução das temperaturas médias na calota esférica que circunda o bocal e na seção no meio do "joelho" do bocal.

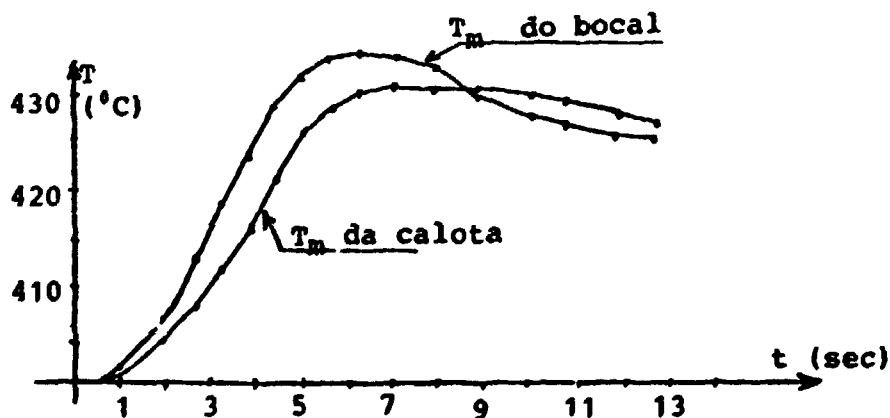


Figura 10 - Temperaturas médias no bocal e na calota esférica

Tais resultados comportam-se dentro do previsto e permitirão o cálculo das tensões térmicas neste bocal, oriundas do choque térmico produzido na seção de provas do circuito.

#### Estimativa das Tensões Térmicas

As tensões térmicas na seção mais crítica do bocal do fundo do TM, seção no meio do "joelho" do bocal, podem ser estimadas como sendo [4]:

$$\sigma = - (E.\alpha. \Delta t)/(1-\mu) \quad (7)$$

Esta expressão (7) se aplica quando, nos instantes iniciais, existem fortes gradientes térmicos em jogo. Para o aço do bocal tem-se:  $E=183000$  MPa (módulo de elasticidade),  $\mu=0.3$ , (coeficiente de Poisson),  $\alpha=1.67 \cdot 10^{-5}$  mm/mm °C (coeficiente de dilatação térmica),  $\Delta T=16$  °C (gradiente térmico max. na espessura),  $S_m=105$  MPa (tensão admissível à temperatura em questão).

Portanto, o gradiente térmico na espessura ( $\Delta T=16$  °C) provocará tensões térmicas máximas da ordem de 70 MPa (de flexão).

Devido ao gradiente entre a temperatura média do bocal e a da calota esférica ( $\Delta T_m$ ) podemos estimar a tensão como sendo metade do valor expresso pela eq. (7) o que resulta, para  $\Delta T_m=9$  °C, em cerca de 40 MPa (de membrana).

Devido aos dois efeitos existentes no fundo do TM, cujos gradientes máximos ocorrem praticamente nos mesmos instantes, as tensões térmicas máximas são da ordem de 110 MPa, em primeira aproximação. O "range das tensões térmicas", utilizado nas verificações da norma, será maior que o valor acima indicado.

Para o cálculo preciso destas tensões térmicas será desenvolvida uma análise termo-mecânica em que serão calculadas as tensões em cada instante, durante o choque térmico, no bocal do fundo do TM. Estas tensões, juntamente com aquelas oriundas dos carregamentos mecânicos (vibrações, peso próprio, pressão, etc.) servirão para a verificação detalhada do projeto estrutural do circuito a sódio SS-050.

#### 5. Comentários Finais/Conclusões

A formulação desenvolvida para a análise termo-hidráulica apresentou resultados satisfatórios e permitirá a obtenção das curvas de variação da temperatura nos pontos críticos da tubulação para diversas hipóteses de choque térmico.

A existência do tanque de mistura (TM) reduz sensivelmente o choque térmico nos componentes a jusante do mesmo (de  $-200^{\circ}\text{C/s}$  na seção de provas para cerca de 10 ou  $12^{\circ}\text{C/s}$ ) como evidenciado na análise termo-hidráulica. A partir dos resultados desta última foi obtido o campo de temperatura no bocal do fundo do TM para um choque térmico, na SdP, de  $-200^{\circ}\text{C/s}$ . Os resultados mostram o caráter cíclico que terão as tensões térmicas oriundas de um choque térmico, cujo conhecimento preciso é necessário para a verificação a fadiga de um componente ou equipamento nuclear. E principalmente se os mesmos são de uma central rápida refrigerada a sódio.

#### 6. Referências

- [1] CBR 05.00.N0209/0 - "Nota Descrittiva e di Funzionamento".
- [2] C.A.J. Miranda - "Revisão do Dossiê de Dimensionamento do Circuito a Sódio SS-050". Seminário realizado no IEN/RJ em Nov/87.
- [3] C.A.J. Miranda e A.N. Gebrim - "Evolução da Temperatura do Sódio na Saída do Componente 05-BM até o Componente 05-SD Durante um Choque Térmico Frio". Nota Técnica DIMEC-01/87 de 24/06/87 - IEN/RJ.
- [4] J.F. Harvey - "Theory and Design of Modern PRESSURE VESSELS" . IInd Edition. Van Nostrand R. Company (1974).