



## DIAGRAMA DE INTERAÇÃO PARA COMPONENTES DE TUBULAÇÃO SUBMETIDOS A CARREGAMENTO TÉRMICO CÍCLICO

**Carlos J. C. de Vilhena**

PETROBRAS/CENPES

Cidade Universitária quadra 7, Ilha do Fundão

21949-900 - Rio de Janeiro, RJ, Brasil

**Luiz Landau**

**José L. D. Alves**

COPPE/UFRJ, Programa de Engenharia Civil

Cidade Universitária, Centro de Tecnologia bl. I2000 / MM05D

21949-900 - Rio de Janeiro, RJ, Brasil

***Resumo.** Este trabalho propõe uma metodologia para a construção de diagramas de interação a serem utilizados na análise do comportamento inelástico de componentes de tubulação submetidos a carregamentos cíclicos de natureza termo-mecânica. Esse carregamento corresponde à aplicação simultânea de uma pressão interna e de um gradiente de temperatura na direção axial. Os diagramas de interação têm aplicação direta em projeto, pois permitem determinar o comportamento esperado do componente ao final de uma história de carregamento, em função dos níveis de tensão primária e secundária, calculadas supondo apenas o comportamento elástico do material. A metodologia proposta para a construção desses diagramas utiliza-se de modelos de elementos finitos (ANSYS) e inclui o levantamento das propriedades elastoplásticas e de fluência do material. Essa metodologia foi aplicada a um problema típico, consistindo de um tubo longo e espesso, fabricado em Incoloy 800H, e submetido a uma pressão interna constante e a um gradiente térmico cíclico causado pela variação linear de temperatura ao longo de um trecho de seu comprimento. Para esse problema foi gerado o diagrama de interação referente ao comportamento de “ratcheting”.*

***Palavras-chave:** Fluência, Plasticidade, Carregamento Cíclico*

### 1. INTRODUÇÃO

Componentes de tubulação trabalham, em geral, submetidos ao efeito conjunto de tensões primárias e secundárias. As tensões primárias são aquelas provenientes de esforços externos, tais como pressão interna ou peso próprio, que exigem o surgimento de um campo de tensões para o equilíbrio das forças. Já as tensões secundárias são aquelas provenientes de deslocamentos impostos ou dilatações diferenciais, que surgem como decorrência da continuidade do campo de deformações resultante. O surgimento de deformações inelásticas,

devidas, por exemplo, à plastificação ou fluência, limitam ou aliviam as tensões secundárias, enquanto que as tensões primárias só são aliviadas com a diminuição nos esforços externos.

O efeito conjunto das tensões primárias e secundárias pode submeter o componente a tensões da ordem do limite de escoamento, provocando deformações plásticas. Se as condições de temperatura variam de forma cíclica, o dano causado ao material cresce devido à fadiga térmica. Carregamentos térmicos cíclicos envolvendo valores elevados de temperatura vão ocasionar também deformações permanentes devido à fluência. O fenômeno da fluência caracteriza-se pelo surgimento de deformações inelásticas dependentes do tempo ativado pelos níveis de temperatura e tensão. Devido à fluência, componentes submetidos a tensões primárias vão sofrer acúmulo de deformações inelásticas, enquanto que componentes submetidos a tensões secundárias vão sofrer uma relaxação das mesmas.

Assim sendo, nos componentes de tubulação submetidos a carregamentos térmicos cíclicos envolvendo temperaturas elevadas verifica-se uma complexa interação entre os comportamentos elastoplástico e de fluência do material, que, em conjunto com as características cíclicas do carregamento, resulta normalmente em um comportamento de “ratchetting”. O “ratchetting” corresponde ao mecanismo de falha onde desenvolve-se um padrão de crescimento estrutural devido ao acúmulo de deformações permanentes ao final de cada ciclo térmico, resultando na falha do componente por ruptura ou deformação excessiva.

## **2. DIAGRAMAS DE INTERAÇÃO**

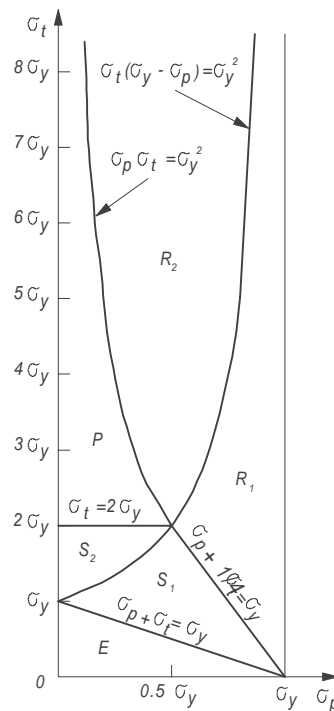
Dentre as diversas abordagens utilizadas no estudo de componentes submetidos a carregamentos cíclicos de natureza termo-mecânica, destaca-se o diagrama de interação, devido à possibilidade de uso como ferramenta de projeto. Um diagrama de interação apresenta, de forma gráfica, as variações no comportamento esperado de um componente, em função do nível de carregamento aplicado. Sua construção exige um estudo do comportamento do componente ao final da história de carregamento, para diversas combinações na intensidade das tensões primária e secundária. O diagrama resultante será função da geometria do componente, das propriedades do material e da história do carregamento.

A forma mais conhecida do diagrama de interação é o chamado Diagrama de Bree (BREE, 1967), mostrado na Figura 1 para o caso de um cilindro de parede fina sujeito a um fluxo de calor cíclico através da parede. Através de um estudo analítico da distribuição de tensão e deformação na espessura, ao longo dos ciclos térmicos, Bree definiu as fronteiras das seis regiões apresentadas na Figura 1, relativas aos diferentes comportamentos possíveis. Os eixos do diagrama correspondem às tensões primária e secundária, calculadas supondo apenas o comportamento elástico do material, parametrizadas pelo limite de escoamento.

O comportamento de “shakedown” caracteriza-se pelo surgimento de deformações plásticas apenas no primeiro ciclo térmico e em quantidade tal que garanta um comportamento puramente elástico ao longo dos demais ciclos. Na região de plasticidade alternada, as superfícies interna e externa do cilindro sofrem deformação plástica com sinais invertidos e que mudam de sinal a cada meio ciclo, sem acúmulo de deformações ao longo dos ciclos. O mecanismo de falha associado à região P é a fadiga de baixo ciclo. Finalmente, tem-se as regiões de “ratchetting” onde ocorre o acúmulo incremental de deformações plásticas.

Devido à sua simplicidade, os diagramas de interação são muito empregados no projeto de componentes sujeitos a carregamentos cíclicos a altas temperaturas. Uma versão do diagrama de Bree, baseada em um trabalho posterior de O'DONNELL e POROWSKI (1974), é adotada pelo Code Case N-47 (ASME, 1990) para o cálculo das deformações inelásticas acumuladas. No entanto, o desenvolvimento de diagramas de interação a partir de modelos analíticos, exige diversas simplificações que podem limitar muito sua aplicabilidade. Visando superar essas

limitações, o Método dos Elementos Finitos tem sido empregado na determinação do comportamento inelástico esperado, permitindo uma representação mais precisa da geometria, da história de carregamento e das propriedades elastoplásticas e de fluência do material. No presente trabalho, utilizou-se o programa ANSYS versão 5.3.



<i>Regime de tensão</i>	<i>Comportamento</i>
R <sub>1</sub> e R <sub>2</sub>	“Ratchetting”
S <sub>1</sub> e S <sub>2</sub>	“Shakedown” após primeiro ciclo
P	Plasticidade alternada
E	Elasticidade

Figura 1 - Diagrama de Bree para material plástico perfeito com tensão de escoamento independente da temperatura e sem considerar o efeito da fluência.

### 3. DESCRIÇÃO DO MODELO ESTUDADO

O objetivo desse trabalho foi desenvolver uma estratégia para a construção de diagramas de interação específicos para componentes de tubulação sujeitos a um gradiente cíclico de temperatura aplicado ao longo de um trecho de seu comprimento. Essa situação corresponde a componentes reais onde ocorre uma alteração nas condições de isolamento térmico ao longo de seu comprimento, conforme apresentado na Figura 2. Esse desenvolvimento baseou-se em um problema hipotético representativo das condições reais encontradas no cone de saída.

O problema hipotético, apresentado na Figura 3, corresponde a um tubo longo e espesso submetido à aplicação simultânea de uma pressão interna constante e um gradiente axial de temperatura que varia de forma cíclica. O gradiente térmico corresponde a uma variação na temperatura ao longo de um trecho do tubo, a partir do valor de 38 °C aplicado na extremidade inferior, até o valor de 760 °C aplicado na extremidade superior. No sentido radial o gradiente de temperatura foi desprezado. O material adotado para o tubo foi o Incoloy 800H.

Cada ciclo de carregamento é iniciado com a fase de aquecimento quando as temperaturas

da extremidade superior e do trecho com gradiente térmico são elevadas até os valores máximos do ciclo. Essas temperaturas são então mantidas constantes durante 10000 h, sendo o ciclo concluído com a fase de resfriamento, quando a temperatura de 38 °C é restabelecida ao longo de todo o tubo. Dez ciclos de carregamento são aplicados, totalizando 100000 h. O gradiente térmico é estático, não ocorrendo deslocamento ao longo do comprimento do tubo.

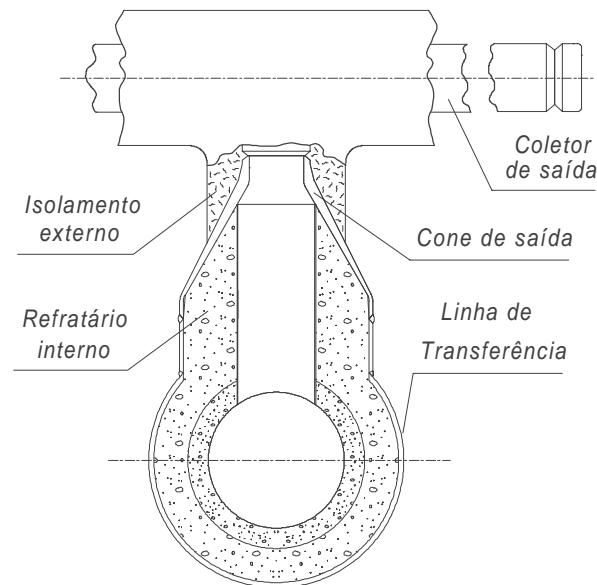


Figura 2 - Detalhe do cone de saída de um forno reformador.

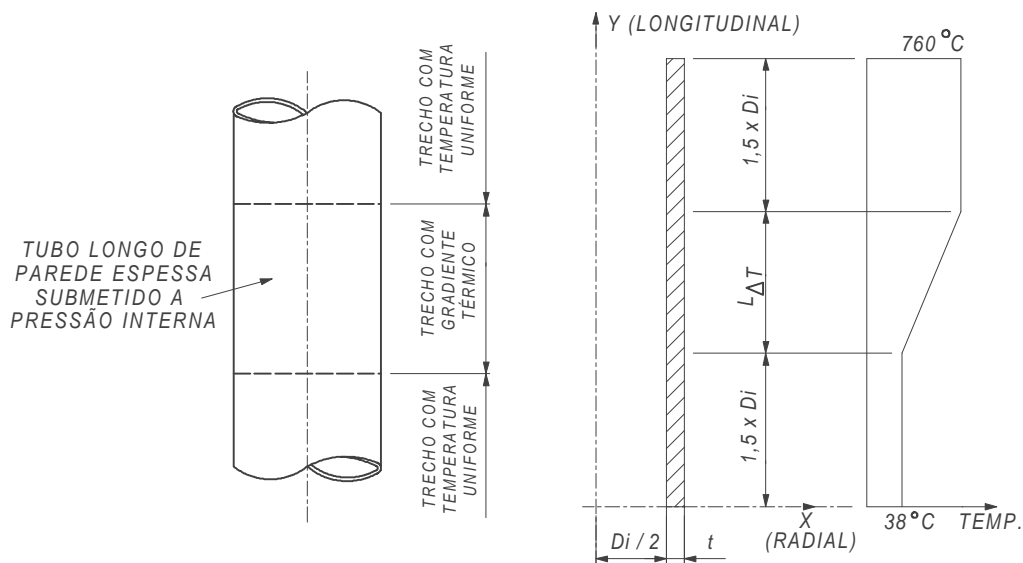


Figura 3 - Problema hipotético estudado e modelo axissimétrico adotado.

Na fase de aquecimento, deformações plásticas são esperadas nas regiões onde as tensões ultrapassem o limite de escoamento do material. O campo de tensões resultante sofrerá relaxação e redistribuição durante a fase de operação contínua, nas regiões com temperatura e tensão elevadas o suficiente para ativar a fluência. Finalmente, no resfriamento espera-se o surgimento de deformações plásticas no sentido inverso das verificadas no aquecimento.

Para representar esse problema, foi adotado o modelo axissimétrico apresentado na Figura 3, construído com o elemento PLANE42 (ANSYS, 1996), que corresponde a um elemento quadrilátero isoparamétrico, com quatro nós e dois graus de liberdade por nó (translação nas direções x e y), possuindo capacidade de modelar plasticidade e fluência.

As condições de contorno e o comprimento do modelo foram definidos de tal forma a garantir uma distribuição de tensões e deformações compatível com o comportamento de um tubo longo. Nos nós da base foi aplicada uma restrição ao deslocamento na direção  $y$ , enquanto que para os nós do topo foi definida uma vinculação entre os deslocamentos na direção  $y$ . Essas condições de contorno garantiram aos nós do topo um deslocamento livre nas duas direções sem que a seção correspondente perdesse o paralelismo com a base.

Com o objetivo de se obter as tensões correspondentes à pressão interna em todas as direções, o carregamento de pressão foi aplicado também na face superior dos elementos do topo com um valor dado pela Eq. (1).

$$p_{topo} = \frac{\pi \cdot D_i^2}{4} \cdot \frac{p_{int}}{\frac{\pi}{4} \cdot [(D_i + 2 \cdot t)^2 - D_i^2]} \quad (1)$$

onde:  $D_i$  - diâmetro interno do tubo;  
 $t$  - espessura de parede;  
 $p_{int}$  - pressão interna.

Em função do tempo de processamento requerido pelos passos de carga correspondentes à operação contínua, o número de ciclos de carregamento aplicados aos modelos foi limitado em apenas cinco. Os resultados ao final dos dez ciclos foram extrapolados conforme Eq. (2). Nessa extrapolação foi assumido que a variação nos resultados, observada entre o quarto e o quinto ciclo, se mantém constante até o final da história de carregamento. Essa extrapolação se mostrou conservativa já que, observando-se os resultados ao final de cada ciclo, verificou-se que a variação dos mesmos em relação ao final do ciclo anterior foi sempre decrescente.

$$R_{10} = R_5 + 5 \cdot (R_5 - R_4) \quad (2)$$

onde:  $R_4$  - resultado ao final do quarto ciclo;  
 $R_5$  - resultado ao final do quinto ciclo;  
 $R_{10}$  - resultado ao final do décimo ciclo;

## 5. LEVANTAMENTO DAS PROPRIEDADES DO MATERIAL

### 5.1 Propriedades elastoplásticas

Para modelar o comportamento elastoplástico do material foram levantadas propriedades lineares e propriedades não lineares supondo comportamento isotrópico dependente da temperatura na faixa de 38 °C a 870 °C. As propriedades lineares requeridas são o módulo de elasticidade e o coeficiente de dilatação térmica, obtidos do Code Case N-47 (ASME, 1990), além do coeficiente de Poisson  $\nu$ , obtido do “American Society of Metals” (ASM, 1989).

Para o comportamento elastoplástico foi adotado o modelo com encruamento cinemático bilinear, onde a curva tensão-deformação monotônica é aproximada por dois segmentos de reta: um referente ao comportamento elástico e o outro correspondente ao comportamento elastoplástico. Para esse modelo, as propriedades não lineares requeridas são a tensão de escoamento  $\sigma_0$  e o módulo elastoplástico  $E_p$ . Os valores da Tabela 1 foram levantados das curvas tensão-deformação instantâneas apresentadas no Code Case N-47 (ASME, 1990).

Tabela 1 - Valores adotados para as propriedades não lineares do Incoloy 800H.

Temp., °C	38	371	593	760	871
$\sigma_o$ , MPa	181,3	140,0	120	108,9	89,6
$E_p$ , MPa	6219	4399	3978	3640	3413

## 5.2 Propriedades de fluência

Para modelar o comportamento de fluência é necessário definir equações constitutivas que relacionem a taxa de deformação por fluência com a história de carregamento. Para os modelos desse trabalho foi escolhida a Eq. (3) composta por dois termos: o primeiro referente à fluência primária e o segundo referente à fluência secundária.

$$\frac{\Delta \varepsilon^c}{\Delta t} = C1 \cdot \sigma^{C2} \cdot \varepsilon^{C3} \cdot e^{-C4/T} + C7 \cdot \sigma^{C8} \cdot e^{-C10/T} \quad (3)$$

onde:  $\frac{\Delta \varepsilon^c}{\Delta t}$  - taxa de deformação por fluência;

$\varepsilon$  - deformação equivalente;

$\sigma$  - tensão equivalente;

$T$  - temperatura absoluta;

$e$  - base neperiana.

As constantes da Eq. (3) foram determinadas através do ajuste, pelo método dos mínimos quadrados, dessa equação aos resultados de ensaios de fluência do Incoloy 800H, levantados das curvas tensão-deformação isocronológicas do Code Case N-47. Os valores adotados para essas constantes estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Constantes de fluência.

Constante	C1	C2	C3	C4	C7	C8	C10
Valor	$5,807 \times 10^{-27}$	12,1772	-1,3241	128781	$1,968 \times 10^{-11}$	6,6055	89937

## 6. CONSTRUÇÃO DO DIAGRAMA DE INTERAÇÃO

### 6.1 Seleção das grandezas a serem manipuladas

O modelo descrito no item 3 apresenta basicamente cinco grandezas cujos valores podem ser manipulados com o objetivo de variar o nível de carregamento aplicado: o diâmetro interno  $D_i$ , a espessura de parede  $t$ , o comprimento do trecho com gradiente  $L_{\Delta T}$ , a pressão interna  $P_{int}$  e o gradiente térmico  $\Delta T$ . Dentre essas grandezas, o diâmetro interno e a espessura de parede são as únicas cujo valor afeta tanto o nível de carregamento primário quanto o secundário. As demais grandezas afetam apenas um dos dois tipos de tensão.

Em uma situação real de projeto, as únicas grandezas que podem ser variadas para atender os requisitos estabelecidos, são a espessura de parede e o comprimento do trecho com gradiente, já que as demais são definidas previamente pelas condições operacionais. No entanto, a espessura de parede como variável manipulada apresenta o inconveniente de seu valor afetar simultaneamente os dois tipos de tensão, o que complicaria a definição dos valores

necessários à construção do diagrama de interação. Assim sendo, escolheu-se a pressão interna e o comprimento do trecho com gradiente como grandezas manipuladas.

## 6.2 Valores adotados para as grandezas

Para as grandezas com valor constante foram adotados os valores indicados na Figura 6. Para as grandezas manipuladas, foram selecionados valores de forma a se cobrir uma faixa razoável dos eixos do diagrama de interação. Os valores de tensão empregados no cálculo dos níveis de carregamento, foram obtidos de modelos do ANSYS mais simples, onde foi considerado apenas o comportamento elástico. O resultado utilizado foi aquele referente ao valor máximo da tensão equivalente de von Mises. O valor adotado para a tensão de escoamento foi 108,9 MPa, que corresponde à propriedade do material à temperatura de 760 °C.

O cálculo das pressões necessárias para se obter os diversos níveis de carregamento primário se deu de forma muito simples já que, em um modelo elástico, a dependência entre as tensões atuantes e a pressão interna é linear. Assim, verificou-se que para se obter um nível de carregamento primário de 10%, era necessário uma pressão interna de 2,96 MPa.

Já no cálculo dos valores do comprimento do trecho com gradiente necessários para se obter os diversos níveis de carregamento secundário, foram utilizados modelos do ANSYS idênticos aos modelos completos, mas assumindo o comportamento do material como sendo apenas elástico. Os resultados estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Valores adotados na definição de cada nível de carregamento secundário.

$L_{\Delta T}$ (mm)	76,2	101,6	127,0	152,4	203,2	304,8	457,2
$\frac{\sigma_t}{\sigma_y}$	6,71	5,65	4,78	4,09	3,09	2,06	1,39

onde:  $L_{\Delta T}$  - comprimento do trecho com gradiente;

$\sigma_t$  - máxima tensão térmica elástica (carregamento secundário);

$\sigma_y$  - tensão de escoamento do material(=108,9 MPa).

## 6.3 Levantamento dos resultados para construção do diagrama de interação

Para cada ponto do diagrama de interação foi utilizado um modelo completo diferente, variando-se os valores definidos para as grandezas manipuladas, de forma a se cobrir faixas razoáveis dos níveis de carregamento primário e secundário.

Utilizando a ferramenta de parametrização do ANSYS, foi construído um arquivo padrão com todos os comandos necessários à definição da geometria e propriedades do material, criação da malha, aplicação das condições de contorno e carregamento, análise e pós-processamento. Todas as grandezas relacionadas à geração do modelo foram parametrizadas de forma a tornar simples, rápida e segura a definição de novas condições de carregamento e geometria e o levantamento dos resultados correspondentes.

A partir da análise de resultados preliminares, constatou-se que o problema hipotético estudado não apresenta uma possibilidade única em termos do comportamento esperado para uma determinada geometria e história de carregamento. Pelo menos dois tipos diferentes de comportamento (deformação inelástica alternada e “ratchetting”) foram observados em pontos

diferentes de um mesmo modelo, conforme apresentado nas Figuras 4 e 5 para o caso com  $P_{int} = 2,96 \text{ MPa}$  e  $L_{\Delta T} = 76,2 \text{ mm}$ .

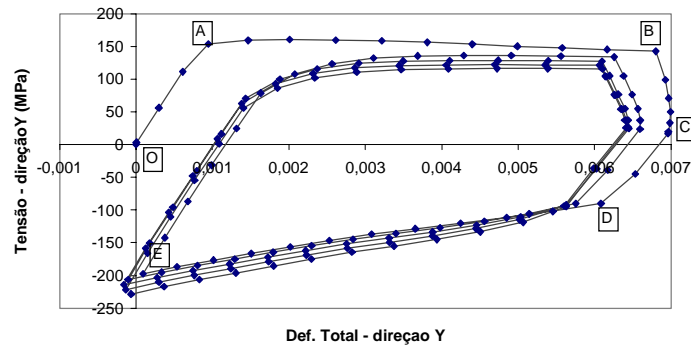


Figura 4 - Tensão x deformação total na direção longitudinal - superfície externa na extremidade superior do trecho com gradiente. Deformação inelástica alternada.

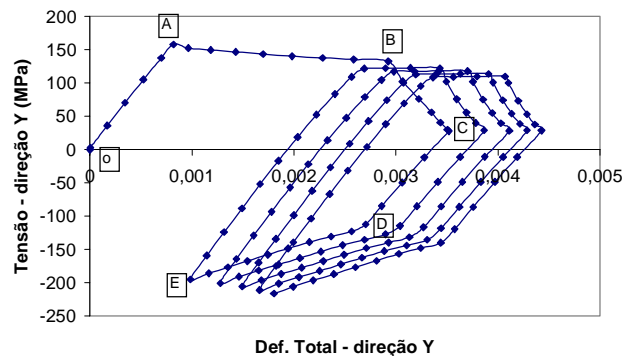


Figura 5 - Tensão x deformação total na direção longitudinal - superfície externa acima da extremidade superior do trecho com gradiente. Comportamento de "ratchetting".

Nessas figuras tem-se os diagramas de tensão x deformação total na direção longitudinal para dois pontos do modelo, representando a evolução desses resultados ao longo de cinco ciclos de carregamento. O estado inicial está representado pelo ponto O. O aquecimento do primeiro ciclo está representado pelos segmentos OA (fase elástica) e AB (fase elastoplástica). A fase de operação contínua está representada pelo segmento BC. Finalmente o resfriamento está representado pelos segmentos CD (elástica) e DE (fase elastoplástica), ocorrendo o fechamento do primeiro ciclo no ponto E. Os demais ciclos acompanham a forma do primeiro.

Como um diagrama de interação admite a definição de um único comportamento para cada ponto, seriam necessários pelo menos dois diagramas de interação para descrever de forma completa o comportamento do problema hipotético. Nesse trabalho optou-se por construir apenas o diagrama de interação referente ao comportamento de "ratchetting".

Assim sendo, para cada nível de carregamento primário e secundário, o único resultado requerido para a construção do diagrama de interação passou a ser o valor máximo esperado para a deformação residual acumulada no final do décimo ciclo de carregamento. Para cada modelo, esse valor foi calculado pela equação (2) baseado nos máximos valores obtidos para a deformação total equivalente de von Mises ao final do quarto e quinto ciclos. Os resultados obtidos para aos diversos níveis de carregamento, estão apresentados na tabela 4. A partir desses valores foi gerado o diagrama de interação apresentado na figura 6, onde as curvas correspondem a valores constantes para a deformação total acumulada no final dos dez ciclos de carregamento e os pontos representados correspondem aos resultados da Tabela 4.



Tabela 4 - Deformação total acumulada (%) ao final do décimo ciclo. Resultados obtidos com os modelos do ANSYS.

	NP=0,05	NP=0,10	NP=0,20	NP=0,30	NP=0,35	NP=0,40	NP=0,50
NS=1,39	0,18	0,19	0,19	0,21	0,47	1,02	4,03
NS=2,06	0,26	0,28	0,29	0,28	0,47	1,02	4,05
NS=3,09	0,38	0,41	0,43	0,41	0,57	1,13	4,08
NS=4,09	0,42	0,47	0,54	0,60	0,88	1,28	4,16
NS=4,78	0,43	0,51	0,63	0,85	1,10	1,45	4,18
NS=5,65	0,41	0,52	0,68	0,98	1,24	1,57	4,21
NS=6,71	0,44	0,50	0,69	1,02	1,28	1,61	4,21

onde:  $NP = \frac{\sigma_p}{\sigma_y}$  - nível de carregamento primário;

$NS = \frac{\sigma_t}{\sigma_y}$  - nível de carregamento secundário

$\sigma_p$  - máxima tensão primária elástica (devida à pressão interna);

$\sigma_t$  - máxima tensão térmica elástica (devida ao gradiente térmico);

$\sigma_y$  - tensão de escoamento do material (=108,9 MPa).

## 7. CONCLUSÃO

O diagrama de interação da Figura 6 permite uma avaliação rápida e precisa da resposta inelástica do componente, para diferentes níveis de carregamento. No entanto, sua aplicação como ferramenta de projeto está condicionada à análise da influência das grandezas que foram mantidas constantes nos resultados inelásticos obtidos. Provavelmente, essa análise irá demonstrar que esse diagrama pode ser aplicado a uma faixa de valores do diâmetro e da espessura do tubo. Para a terceira grandeza mantida constante, ou seja, o gradiente térmico, se antevê que alterações nos níveis de temperatura vão necessariamente resultar em modificações nos resultados inelásticos, devido à influência nas propriedades do material.

Para o problema estudado neste trabalho, ficou demonstrado que o comportamento esperado para uma determinada geometria e níveis de carregamento não pode ser descrito em um único diagrama de interação. É provável que se consiga combinações da geometria e carregamento onde os quatro tipos de comportamento ocorram simultaneamente em diferentes pontos do tubo.

## REFERÊNCIAS

ANSYS, 1996, *Elements Reference*, Release 5.3, Houston, ANSYS Inc.

ASM, 1989, *High - Temperature Property Data: Ferrous Alloys*, 2<sup>a</sup> ed., Ohio, American Society of Metals.

ASME, 1990, *Boiler and Pressure Vessel Code Case N-47-29 - Class 1 Components in Elevated Temperature Service*, New York, The American Society of Mechanical Engineers.

BREE, J., 1967, "Elastic-Plastic Behaviour of Thin Tubes Subjected to Internal Pressure and Intermittent High-heat Fluxes with Application to Fast-Nuclear-Reactor Fuel Elements". In: *Journal of Strain Analysis*, v.2 No.3, *Transactions of ASME*, The American Society of Mechanical Engineers, pp. 226-238.

O'DONNELL, W.J., POROWSKI, J, 1974, "Upper Bounds for Accumulated Strains due to Creep Ratcheting", *Journal of Pressure Vessel Technology*, v. 96, *Transactions of the ASME*, The American Society of Mechanical Engineers, pp. 150-154.

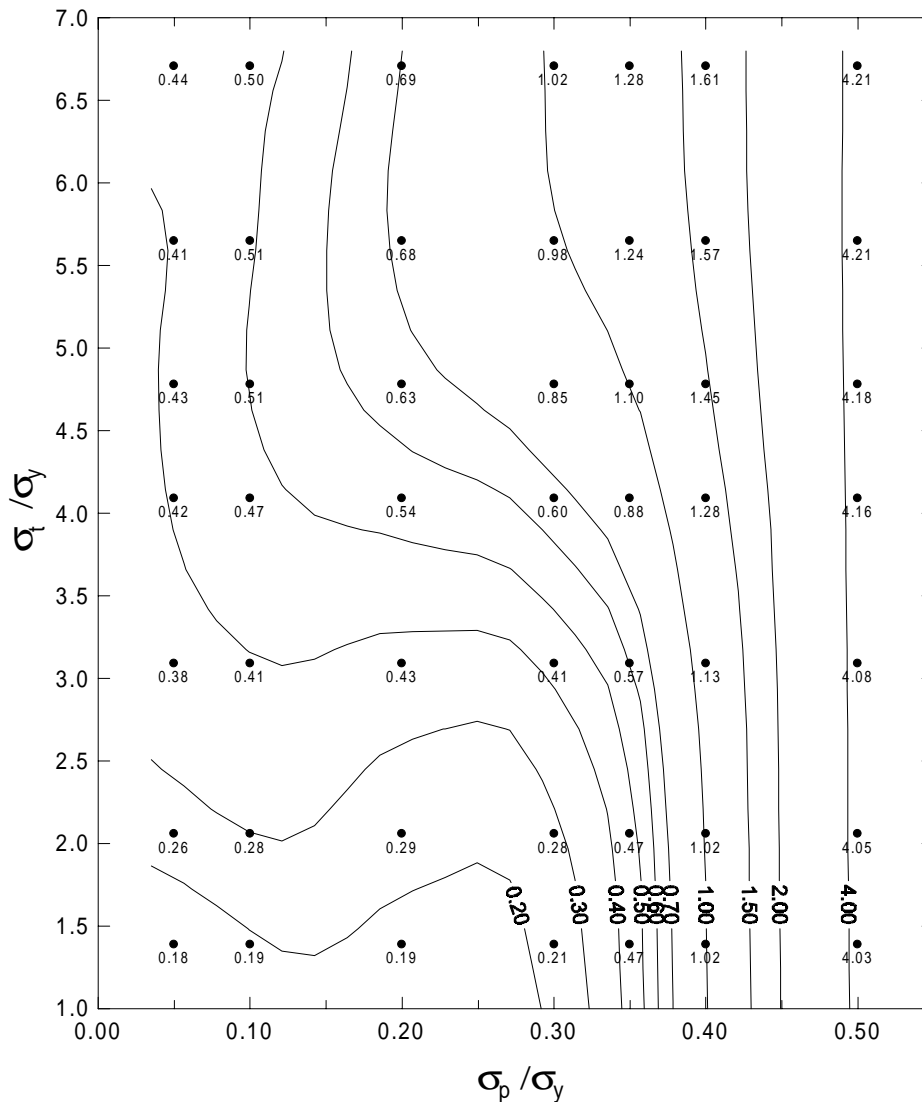


Figura 6 - Diagrama de interação para o comportamento de “ratchetting” ( $D_i = 203$  mm,  $t = 38$  mm,  $\Delta T =$  de  $37,8$  °C a  $760$  °C) -  $\sigma_{esc} = 108,9$  MPa.

### INTERACTION DIAGRAMS FOR PIPING COMPONENTS SUBJECTED TO CYCLIC THERMAL LOADING

**Abstract.** This work proposes a method to the construction of interaction diagrams to be used in the analysis of the inelastic behavior of piping components subjected to cyclic thermo-mechanical loading. This loading is composed by the simultaneous application of an internal pressure and a longitudinal temperature gradient. The interaction diagrams are very useful as design tools, since they present the expected behavior of the component subjected to a loading history, as a function of the pressure and thermal stress calculated on a purely elastic basis. The method presented to the construction of these diagrams makes use of finite element models (ANSYS), and includes the calculation of the elasto-plastic and creep material properties. This method was applied to a typical situation of a long thick-walled tube, made of Incoloy 800H, and subjected to a constant internal pressure and cyclic thermal gradient caused by a linear variation of temperature along a part of its length. The interaction diagram corresponding to the ratchetting behavior for this problem was generated.

**Key-words:** Creep, Plasticity, Cyclic Loading