

Relatório de Pesquisa e Desenvolvimento



SEPLAN/PR — SECRETARIA DE PLANEJAMENTO DA PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA

CNPq — CONSELHO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO CIENTÍFICO E TECNOLÓGICO

LCC — LABORATÓRIO DE COMPUTAÇÃO CIENTÍFICA



**PEDIDOS DE CÓPIA DESTE RELATÓRIO FAVOR DIRIGIR-SE A :
REQUEST FOR COPY OF THIS REPORT PLEASE ADDRESS TO :**

**Biblioteca do LCC
Av. Wenceslau Braz, 71 - Fundos
CEP 22.290 - Rio de Janeiro - RJ
Brasil**

LCC -- N.º 009/80

**SISTEMA TUBO – PROCEDIMENTOS PARA
A ANÁLISE SÍSMICA E VERIFICAÇÃO DE
TENSÕES**

20

A ser apresentado no II Congresso Latino Americano sobre Métodos Computacionais para Engenharia, a realizar-se em Curitiba, de 8 a 10 de dezembro de 1980

SISTEMA TUBO
PROCEDIMENTOS PARA A ANÁLISE SÍSMICA E
VERIFICAÇÃO DE TENSÕES

Hélio José Corrêa Barbosa
João Nisan Correia Guerreiro
Elsol Magalhães Toledo

Laboratório de Computação Científica - CNPq
Departamento de Pesquisa e Desenvolvimento
Rio de Janeiro - RJ

SUMÁRIO

Apresentam-se os procedimentos recentemente incorporados ao SISTEMA TUBO quais sejam: a Análise Sísmica e a Verificação de Tensões de acordo com a Norma ASME-Boiler and Pressure Vessel Code-Section III.

- A Análise Sísmica compreende tanto a consideração de movimento uniforme dos apoios, quanto a consideração da excitação múltipla dos mesmos, e a obtenção da resposta espectral para ambos os casos.

- O módulo para a Verificação de Tensões utiliza as tensões, resultantes das combinações dos casos de carregamentos especificados pelo usuário, na verificação automática das tensões admissíveis para as Tubulações Classe 1 e 2, segundo os critérios NB-3650 e NC-3650 da ASME.

- Discute-se a implementação desses procedimentos no SISTEMA TUBO, e apresenta-se um exemplo numérico que cobre as diferentes etapas da análise de tensões em uma tubulação.

1. INTRODUÇÃO

Os requisitos de segurança na indústria nuclear implicam em que efeitos sísmicos sejam levados em consideração no projeto dos componentes de uma usina nuclear. No caso específico de tubulações é importante considerar a excitação não uniforme dos apoios, já que estes poderão estar submetidos a excitações distintas. Além disso, a aprovação de um projeto de tubulações implica na verificação dos critérios da norma especificada.

A complexidade envolvida na análise de uma tubulação nuclear requer necessariamente o desenvolvimento de programas automáticos cujos procedimentos de cálculo devem conter basicamente as diversas opções de análise de tensões, para carregamentos típicos, e verificação das mesmas segundo critérios aprovados em normas.

Dentro desta perspectiva situa-se o desenvolvimento do SISTEMA TUBO [1]. Assim, no item 2 algumas características básicas do Sistema são relacionadas de forma sumária. Nos itens seguintes apresentam-se os procedimentos de Análise Sísmica para excitação não uniforme dos apoios e Verificação de Tensões segundo a ASME-Boiler and Pressure Vessel Code-Section III [2] para Tubulações Classe 1 e Classe 2.

2. O SISTEMA TUBO

O SISTEMA TUBO é um programa automático de cálculo para a análise linear estática e dinâmica de tubulações, capaz de efetuar uma análise completa de tensões segundo a Norma ASME-Boiler and Pressure Vessel Code, Section III.

Em sua concepção procura-se manter a filosofia de um Sistema geral de análise, cuja característica básica é possuir uma estrutura modular que visa facilitar sua atualização e expansão.

Por outro lado, sua especificidade é evidenciada tanto pela entrada de dados orientada à análise de tubulações (em particular na definição da geometria, propriedades dos materiais e solicitações), quanto pela biblioteca de elementos finitos e procedimentos de análise disponíveis.

O SISTEMA TUBO, no estágio atual do seu desenvolvimento, conta com as seguintes facilidades:

a) Entrada de Dados

- Orientada à Análise de Tubulações
- Existência de tabelas embutidas

b) Biblioteca de Elementos Finitos

- Elemento de viga
- Elemento de tubo de eixo reto
- Elemento de tubo de eixo curvo
- Elemento de mola
- Elemento com matriz lida

c) Apoios

- Rígidos
- Elásticos
- Restrições dinâmicas

d) Liberações

e) Solicitações

- Peso próprio (tubulação + revestimento + conteúdo)
- Pressão interna por ramal
- Expansão térmica por ramal
- Cargas concentradas (dependentes ou não do tempo)
- Movimentos de apoio
- Sismo
- Combinação de carregamentos

f) Tipos de Procedimentos

- Análise estática
- Cálculo de frequências e modos naturais de vibração
- Análise sísmica por resposta espectral
 - . Excitação uniforme dos apoios
 - . Excitação múltipla dos apoios
- Resposta dinâmica
 - . por superposição modal
 - . por integração direta

- Verificação de tensões
 - . Tubulações Classe 1
 - . Tubulações Classe 2

O esquema geral de alocação de áreas na memória e as técnicas numéricas empregadas estão descritos em [1].

3. ANÁLISE SÍSMICA

Dada a complexidade do conjunto estrutura-componentes de uma usina nuclear é usual que se faça, para fins de análise, uma separação do conjunto em vários subsistemas. Observe-se também que, para uma mesma estrutura, mais de um modelo pode vir a ser criado, de acordo com os objetivos da análise. Dessa forma é usual que a excitação a ser transmitida (input) a uma tubulação seja definida a partir da resposta (output) obtida do modelo criado para a estrutura que lhe serve de apoio quando submetida à excitação sísmica prevista no projeto.

A resposta do modelo básico é dada normalmente em termos de uma história no tempo de acelerações, velocidades e deslocamentos em pontos da estrutura, ou na forma de espectros de resposta calculados nos pontos de interesse. Como a tubulação pode se apoiar em prédios diferentes, ou em níveis diferentes de um mesmo prédio, seus apoios serão submetidos, no caso geral, a excitações distintas caracterizando assim um problema de excitação múltipla de apoios.

3.1. Equações de Movimento e Métodos de Solução

A equação de movimento, na forma discretizada, de um sistema estrutural submetido a deslocamentos prescritos em seus apoios se escreve:

$$\begin{bmatrix} M_{-ll} & M_{-lp} \\ M_{-pl} & M_{-pp} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_{-l} \\ \ddot{u}_{-p} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{-ll} & C_{-lp} \\ C_{-pl} & C_{-pp} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_{-l} \\ \dot{u}_{-p} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{-ll} & K_{-lp} \\ K_{-pl} & K_{-pp} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_{-l} \\ u_{-p} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ F_{-p} \end{Bmatrix} \quad (3.1)$$

onde as matrizes de massa, amortecimento e rigidez do sistema, M ,

\underline{C} e \underline{K} , estão particionadas segundo os graus de liberdade livres, \underline{u}_l , e os prescritos, $\underline{\bar{u}}_p$, correspondentes aos movimentos dos apoios. \underline{F}_p é a reação nos apoios e os pontos indicam derivação no tempo.

Quando se dispõe da história no tempo dos deslocamentos, velocidades e acelerações de cada um dos apoios é possível integrar a Eq. (3.1) e obter os deslocamentos, velocidades e acelerações totais (em relação a um referencial inercial) dos demais pontos nodais da estrutura.

Entretanto, como o código ASME classifica as tensões em primárias e secundárias, é usual a decomposição dos deslocamentos em duas parcelas:

$$\begin{Bmatrix} \underline{u}_l \\ \underline{\bar{u}}_p \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \underline{u}_l^e \\ \underline{\bar{u}}_p \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \underline{u}_l^d \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3.2)$$

As tensões secundárias estão associadas ao campo de deslocamentos pseudo-estáticos \underline{u}_l^e , que surge ao se aplicar os movimentos prescritos $\underline{\bar{u}}_p$ aos apoios, e é dado pela Eq. (3.1) quando não são considerados os termos relativos à velocidade e aceleração:

$$\underline{u}_l^e = \underline{R} \underline{\bar{u}}_p \quad (3.3)$$

onde:

$$\underline{R} = -\underline{K}_{ll}^{-1} \underline{K}_{lp}$$

é a matriz das funções de influência relativas aos apoios.

O vetor \underline{u}_l^d é a diferença entre o deslocamento total \underline{u}_l e a parcela pseudo-estática \underline{u}_l^e e as tensões a ele associadas são consideradas primárias.

Substituindo (3.3) e (3.2) em (3.1) obtém-se a equação de movimento em termos do deslocamento relativo \underline{u}_l^d :

$$\underline{M}_{ll} \ddot{\underline{u}}_l^d + \underline{C}_{ll} \dot{\underline{u}}_l^d + \underline{K}_{ll} \underline{u}_l^d = [-\underline{M}_{ll} \underline{R} - \underline{M}_{lp}] \ddot{\underline{\bar{u}}}_p + [-\underline{C}_{ll} \underline{R} - \underline{C}_{lp}] \dot{\underline{\bar{u}}}_p \quad (3.4)$$

Quando a matriz de amortecimento é proporcional à matriz de rigidez ou quando se despreza a parcela correspondente ao amortecimento no vetor de ações aplicadas, a equação de movimento se reduz a:

$$\underline{M}_{ll} \ddot{\underline{u}}^d + \underline{C}_{ll} \dot{\underline{u}}^d + \underline{K}_{ll} \underline{u}^d = - [\underline{M}_{ll} \underline{R} + \underline{M}_{lp}] \ddot{\underline{u}}_p \quad (3.5)$$

As frequências ω_i e modos naturais ϕ_i de vibração livre não amortecida do sistema são obtidos do problema de autovalor:

$$[\omega^2 \underline{M}_{ll} - \underline{K}_{ll}] \phi = 0 \quad (3.6)$$

Quando são válidas as relações de ortogonalidade:

$$\phi_i^T \underline{M}_{ll} \phi_j = \delta_{ij} \quad (3.7a)$$

$$\phi_i^T \underline{C}_{ll} \phi_j = 2\delta_{ij} \xi_i \omega_i \quad (3.7b)$$

$$\phi_i^T \underline{K}_{ll} \phi_j = \delta_{ij} \omega_i^2 \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad (3.7c)$$

onde δ_{ij} é o delta de Kronecker e ξ_i é a percentagem de amortecimento crítico do modo i , é possível desacoplar as Eqs. (3.5) através da transformação linear:

$$\underline{u}_l^d = \underline{\phi} \underline{\eta} \quad (3.8)$$

onde $\underline{\phi}$ é a matriz modal com os m ($m \leq n$) primeiros modos naturais do sistema. As equações desacopladas têm a forma:

$$\ddot{\eta}_i + 2\xi_i \omega_i \dot{\eta}_i + \omega_i^2 \eta_i = p_i(t) \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (3.9)$$

com

$$p_j(t) = -\phi_j^T [\underline{M}_{ll} \underline{R} + \underline{M}_{lp}] \ddot{\underline{u}}_p(t) \quad (3.10)$$

Considerando apenas a contribuição, sobre o modo i , do mo-

vimento de apoio segundo a direção j , $\bar{u}_p^j(t)$, tem-se:

$$\ddot{\eta}_i^j + 2\xi_i\omega_i\dot{\eta}_i^j + \omega_i^2\eta_i^j = \Gamma_i^j \ddot{u}_p^j(t) \quad (3.11)$$

onde

$$\Gamma_i^j = -\phi_i^T [M_{ll}^j \underline{r}^j + M_{lp}^j] \quad (3.12)$$

e \underline{r}^j e M_{lp}^j são as colunas de ordem j das matrizes \underline{R} e \underline{M}_{lp} , respectivamente. A resposta total em coordenadas modais é:

$$\eta_i = \sum_i \eta_i^j \quad (3.13)$$

Os métodos mais comumente adotados para obtenção da resposta do sistema são indicados a seguir.

3.1.1. Resposta no Tempo

Consiste na integração das equações de movimento através de um algoritmo numérico. Nesse caso, o SISTEMA TUBO oferece duas possibilidades.

A primeira delas é integrar diretamente o sistema de equações (3.5) bastando ao usuário definir a aceleração dos apoios $\bar{u}_p(t)$. Este procedimento está implementado no módulo de resposta no tempo por integração direta passo-a-passo.

A segunda é integrar as m equações desacopladas (3.9). Este procedimento está implementado no módulo de resposta no tempo por superposição modal e uma descrição mais detalhada de ambos os procedimentos é dada em [3].

3.1.2. Resposta Espectral

Utiliza o conceito de espectro de resposta [4] que permite avaliar, para cada modo, o valor máximo de determinada resposta de interesse (deslocamento, aceleração, momento, etc.).

Assim, chamando de $SA^j(\omega_i, \xi_i)$ a aceleração espectral para

o modo i correspondente à excitação $\ddot{v}_p^j(t)$ do apoio j , o valor máximo de η_i^j na Eq. (3.11) é dado por:

$$\eta_{i \max}^j = \Gamma_i^j \frac{SA^j(\omega_i, \xi_i)}{\omega_i^2} \quad (3.14)$$

e ocorre no instante de tempo t_i^j não conhecido.

Uma estimativa da resposta máxima, no modo i , levando em conta a aplicação simultânea de todos os movimentos de apoio pode ser feita por:

$$\eta_{i \max} = \left[\sum_j \eta_{i \max}^j \right]^{1/2} \quad (3.15)$$

ou, conservativamente, por soma absoluta:

$$\eta_{i \max} = \sum_j |\eta_{i \max}^j| \quad (3.16)$$

O campo de deslocamentos correspondente é:

$$(u_{\xi}^d)_i = \eta_{i \max} \phi_i \quad (3.17)$$

a partir do qual se obtêm os esforços solicitantes.

Obtidos os valores representativos dos máximos de cada variável de interesse em cada modo submetido a todos os movimentos de apoio, esses valores poderão ser combinados para a obtenção do valor representativo do máximo levando em conta todos os modos.

O SISTEMA TUBO dispõe das seguintes opções para combinação dos máximos modais:

a) Soma Absoluta

$$Q = \sum_{i=1}^m |Q_i| \quad (3.18)$$

onde Q_i é o valor representativo do máximo da variável de inte-

resse no modo i e m é o número de modos considerados.

b) Raiz quadrada da soma dos quadrados (RQSQ)

$$Q = \left[\sum_{i=1}^m Q_i^2 \right]^{1/2} \quad (3.19)$$

No caso de existência de frequências naturais próximas [5] estão disponíveis as opções:

a) PQSQ com agrupamentos

$$Q = \left[\sum_{i=1}^m Q_i^2 + \sum_{g=1}^p \sum_{l=j}^k \sum_{n=j}^k |Q_{lg} Q_{ng}| \right]^{1/2} \quad l \neq n \quad (3.20)$$

onde Q_{lg} e Q_{ng} são as respostas modais correspondentes aos modos l e n , respectivamente e que pertencem ao grupo g ; j e k são os modos inicial e final, respectivamente do grupo g . O número de grupos de frequências próximas é p . Um grupo de modos abrange aqueles modos cujas frequências estão entre a primeira do grupo e uma 10% mais alta. Os grupos são formados a partir da frequência mais baixa e nenhuma frequência poderá estar em mais de um grupo.

b) Método 10%

$$Q = \left[\sum_{i=1}^m Q_i^2 + 2 \sum |Q_l Q_n| \right]^{1/2} \quad l \neq n \quad (3.21)$$

onde o segundo somatório se aplica aos pares de modos l e n para os quais se tenha:

$$\frac{\omega_n - \omega_l}{\omega_l} \leq 0.1 \quad i \leq l < n \leq m$$

c) Soma Dupla

$$Q = \left[\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m |Q_i Q_j| c_{ij} \right]^{1/2} \quad (3.22)$$

com

$$\varepsilon_{ij} = \left\{ 1 + \left[\frac{\omega'_i - \omega'_j}{\xi'_i \omega'_i + \xi'_j \omega'_j} \right]^2 \right\}^{-1}$$

$$\omega'_k = \omega_k (1 - \xi_k^2)^{1/2}$$

$$\xi'_k = \xi_k + \frac{2}{t_d \omega_k}$$

onde t_d é o tempo de duração do sismo.

d) Amplitude máxima mais RQSQ das restantes

$$Q = |Q_k| + \left[\sum_{i=1}^m Q_i^2 \right]^{1/2} \quad i \neq k \quad (3.23)$$

onde o modo k é aquele que dá o maior valor para a variável de interesse e fica assim excluído da segunda parcela.

As expressões (3.19) a (3.22) são as apresentadas no Regulatory Guide 1.92 [5] e as expressões (3.18) e (3.23) são encontradas em outros programas, como o KWU-ROHR [6].

3.2. Entrada de Dados

Os dados de entrada para a obtenção da resposta no tempo através do SISTEMA TUBO estão descritos em [3] e aqueles correspondentes à resposta espectral para excitação uniforme dos apoios em [1].

Lo início, no caso da resposta espectral, é necessário que o usuário especifique o número de frequências e modos naturais a serem calculados na etapa de solução do auto-problema, Equação (3.6). Esses resultados são armazenados em arquivos permanentes e o podem ser utilizados em análises subsequentes ("RESTART") evitando a repetição da solução do problema de autoválor.

A definição do número de modos a serem considerados na resposta é feita a partir do valor fornecido para a frequência má-

xima. Modos com frequência superior a esta não serão considerados.

Os espectros a serem utilizados podem ser de acelerações, velocidades ou deslocamentos e são fornecidos, por pontos, em função do período (s) ou da frequência (Hz). Os valores espectrais para as frequências naturais são obtidos por interpolação linear dos valores dados ou de seus logaritmos.

Finalmente, para cada caso de carregamento, o usuário define o conjunto de direções (apoios) associado ao espectro de cada excitação atuante nesse carregamento.

Os resultados de uma análise sísmica pelo método espectral são armazenados juntamente com os resultados de todos os carregamentos estáticos a fim de que possam ser combinados, de acordo com a especificação do usuário, na etapa de verificação de tensões.

4. VERIFICAÇÃO DE TENSÕES

4.1. Introdução

Segundo a Norma ASME-Section III-Division 1 (que vem sendo utilizada nos projetos de tubulações de usinas nucleares montadas no Brasil), a verificação de tensões em tubulações pode ser feita seguindo-se dois procedimentos básicos:

- Análise Detalhada (NB-3200 e NC-3200)
- Análise Simplificada (NB-3600 e NC-3600)

A análise detalhada torna-se extremamente dispendiosa quando aplicada a geometrias e carregamentos complexos tal como ocorre nos sistemas de tubulações. Dessa forma a análise detalhada só é efetuada quando o projeto não atende aos requisitos previstos na análise simplificada e não se deseja introduzir alterações no projeto.

Em ambos os casos devem ser consideradas todas as condições de carregamento descritas nas Especificações de Projeto e que são classificadas pela ASME em condições de projeto, condições de serviços e condições de teste.

No SISTEMA TUBO foram implementados os procedimentos de análise simplificada de acordo com os itens NB-3600 e NC-3600 para verificação de tensões em tubulações de Classe 1 e 2, respectivamente.

A utilização do Sistema nas verificações de tensões requer a definição de :

- a) Tipo de verificação
- b) Combinações de carregamentos
- c) Tabela de índices de intensificação de tensões utilizadas

a) Em virtude da estrutura de grupos de elementos utilizada pelo programa [1], a definição do tipo de verificação a ser efetuada, Classe 1 ou 2 é feita a nível desses grupos. Neste caso todos os elementos de um grupo terão a mesma verificação. Opcionalmente pode-se verificar apenas alguns elementos dentro de um determinado grupo.

b) Uma vez obtidas as respostas para todas as solicitações de fine-se como uma combinação de carregamentos qualquer combinação linear dos carregamentos estáticos e/ou dinâmicos analisados. Qualquer caso de carregamento a ser utilizado numa verificação de tensões deve ser definido como uma combinação de carregamentos.

c) As intensidades das tensões obtidas a partir de uma determinada combinação de carregamentos, antes de serem comparadas com as tensões admissíveis, deverão ser intensificadas por índices de tensões que dependem do tipo de solicitação e do tipo e geometria do componente analisado.

A Tabela NB-3681(a)-1 e a Fig. NC-3673.2(b)-1 fornecem os valores desses índices para os componentes mais comumente empregados em tubulações.

Visando facilitar a utilização do programa estas tabelas foram implementadas no sistema, de tal forma que cada linha dessas tabelas está associada a um número e a referência a esse número na descrição de um elemento de tubo é suficiente para que o programa gere internamente toda a linha da tabela.

4.2. Verificação de Tensões em Tubulações de Classe 1

O procedimento para verificação de tensões em tubulações nucleares de Classe 1, descrito no item NB-3650 da Subseção NB da ASME-III, pode ser dividido em duas partes:

- a) Consideração das Condições de Projeto
- b) Consideração dos Limites de Serviço

a) A verificação das Condições de Projeto (Equação 9 da NB-3652) consiste no cálculo da intensidade de tensão primária e com paração deste valor com a tensão admissível correspondente. Na determinação da intensidade de tensão primária, são considera - das tanto a tensão circunferencial gerada pela pressão interna de projeto, quanto a tensão longitudinal gerada pelo momento re sultante obtido da combinação de todas as cargas mecânicas de projeto (peso próprio, sobrecargas, sismos, etc.), descritas nas Especificações de Projeto.

Na utilização do SISTEMA TUBO, para a verificação da Equação 9, deve-se indicar apenas o número da combinação de carregamentos a ser utilizada. São impressos então os valores das duas parcelas de tensões, intensificadas pelos índices correspondentes, a sua soma e a relação entre a soma e a tensão admissível.

b) De acordo com a NB-3653, a consideração dos limites de ser viço têm como objetivo qualificar ou não o projeto para supor tar as variações de carregamentos, provenientes de alterações que ocorram durante o funcionamento normal da planta. Desta for ma, as equações (10) a (13) da NB-3653, procuram estabelecer li mites nas cargas cíclicas, de tal maneira que fique assegurada a resistência à fadiga.

As Especificações de Projeto devem descrever cada um dos es tados de carga e o número de ciclos correspondentes, a que a tu bulação estará sujeita. Uma vez definidos os grupos de carregamentos a serem utilizaçõs nas verificações das equações (10) a (13) da NB-3653, devem ser tomados todos os pares de carga que possam ser formados com estes grupos de carregamentos. Para cada par, devem ser calculadas as diferenças entre as pressões in ternas, os momentos nas seções, os gradientes térmicos e as ten

sões em descontinuidades, relativos a cada um dos carregamentos que formam o par. Os valores destas diferenças, que chamaremos de faixas ("range") de tensões, são utilizados nas equações (10) a (13).

A equação (10) tem como objetivo, limitar a faixa da intensidade de tensão primária mais tensão secundária, devida a faixa de pressão interna, momentos de gradientes térmicos na parede da tubulação. A satisfação desta equação, teoricamente assegura que a tubulação não sofrerá ciclos incrementais de deformação plástica. Neste caso, a faixa de intensidade de tensão de pico (S_p) é calculada diretamente através da equação (11) da NB-3653 e o valor da amplitude de tensão (tensão alternada, S_a) para entrada nas curvas de fadiga apresentadas no Apêndice I da Subseção NA, é calculada diretamente: $S_a = S_p/2$.

Se a equação (10) não é satisfeita, então tanto a equação (12) quanto a equação (13) da NB-3653, deverão ser verificadas e neste caso, é calculado um fator $K_e > 1.0$, que será utilizado na equação (14) para majorar a tensão alternada (S_a) de entrada nas curvas de fadiga.

O passo final na utilização das equações (10) a (14) de NB-3653, é o cálculo do fator de utilização acumulado ("cumulative usage factor") utilizando um critério linear, descrito na NB-3222.4. Se a equação (9) é satisfeita e o fator de utilização é menor que 1.0, então, do ponto de vista da NB-3650, a tubulação é aceitável.

Na utilização do SISTEMA TUBO, o usuário deve indicar as combinações e números de ciclos correspondentes a serem utilizados na equação (10), e dentre estes, quais os que, no caso de verificação através das equações (12) e (13), terão consideradas as parcelas de momentos destas equações.

Uma vez definidas as combinações de carregamentos, dois procedimentos podem ser seguidos pelo programa:

- Verificação global
- Verificação por pares

Na verificação global, são formadas as faixas máximas de

pressão interna, momentos e gradientes térmicos, considerando-se todos os carregamentos especificados para a equação (10), de uma única vez. Com estas faixas máximas calcula-se a tensão alternada ou utilizando-se as equações (10) e (11) ou utilizando-se as equações (12), (13) e (14) se a equação (10) não for satisfeita. O valor da tensão alternada assim obtido é utilizado para entrada na curva de fadiga e obtenção do número de ciclos admissíveis. Se o fator de utilização for menor que 1.0, o projeto é aceitável.

Na verificação por pares, cada par formado com os carregamentos especificados para a equação (10), é tomado separadamente. Para cada par, repete-se o procedimento anterior sendo que apenas aqueles que não satisfazem a equação (10), deverão satisfazer as equações (12) e (13). Uma vez calculadas as tensões alternadas para todos os pares, calcula-se o fator de utilização acumulado (U) de acordo com a NB-3222.4. Caso este fator seja maior que 1.0, pode-se utilizar os critérios da NB-3200.

A Figura 1 apresenta o fluxograma relativo ao cálculo do fator de utilização em tubulações de Classe 1.

4.3. Verificação de Tensões em Tubulações Classe 2

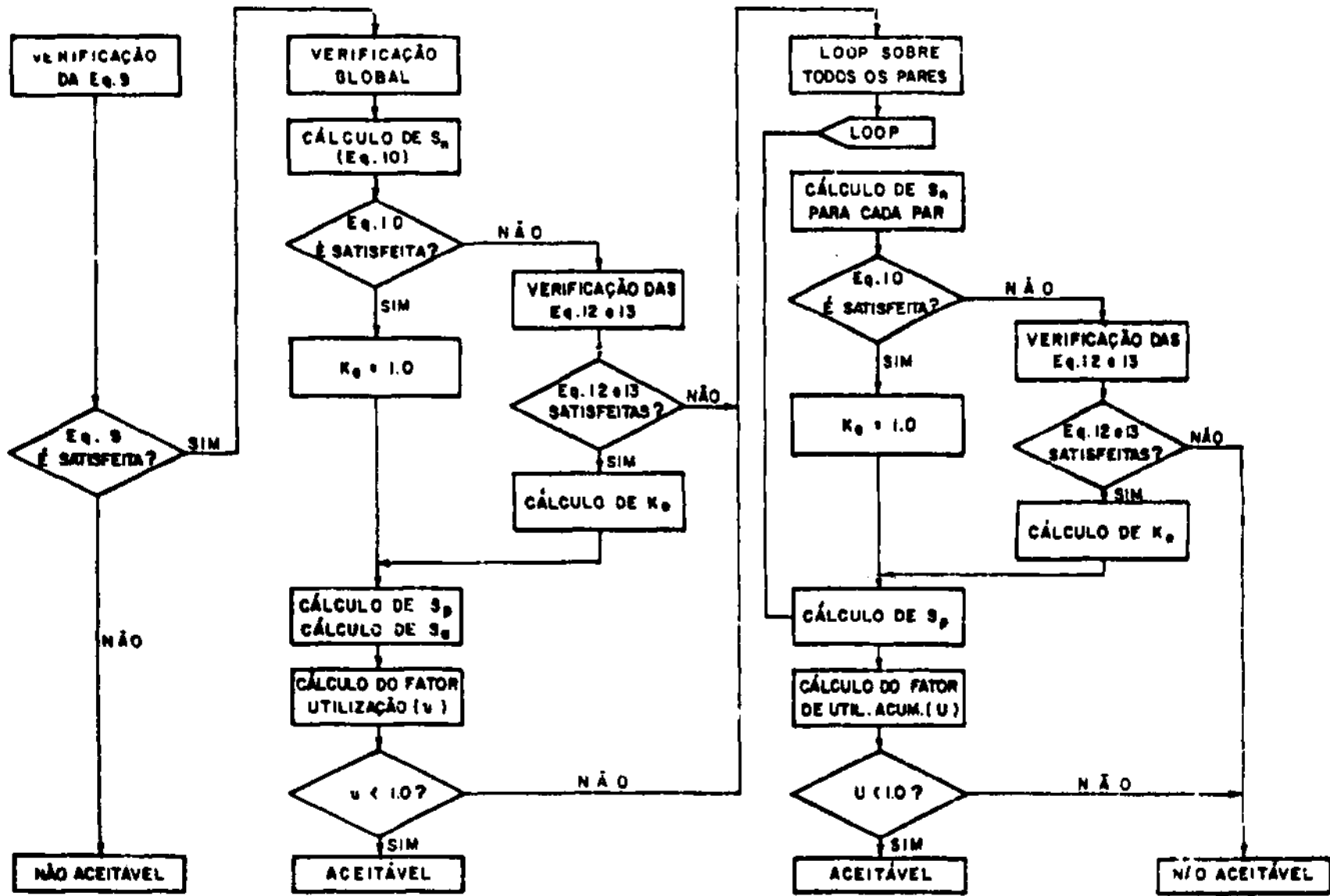
Com relação a verificação de tensões em componentes de tubulações Classe 2, o item NC-3600 da norma prevê que as intensidades de tensões calculadas em cada uma das equações sejam compostas de parcelas correspondentes a pressão interna de projeto, pressão de pico, cargas permanentes, cargas ocasionais, expansão térmica e movimentos não repetidos de apoios.

O programa desenvolvido está apto a determinar as intensidades de tensão para cada uma das equações (8) a (11), conforme subparágrafos NC-3652.1 a NC-3652.3.

Desta forma o usuário deve relacionar e fornecer ao programa, para cada equação a ser verificada, as combinações de carregamento a serem utilizadas.

Para cada equação a ser verificada o programa determina o valor da intensidade de tensão total, bem como de cada parcela que a compõe e a taxa de intensidade de tensão que é definida co

Fig. 1. Fluxograma para Cálculo do Fator de Utilização



mo o quociente da intensidade de tensão pelo valor da tensão admissível.

Cada componente satisfaz ou não os requisitos da norma conforme esse índice seja respectivamente menor ou maior que 1.

Na Tabela I são apresentados para as diversas condições de solicitação, as equações a serem verificadas e os correspondentes valores tomados como tensão admissível.

TABELA I

Condições	Nº das Equações a serem verificadas	Tensão de Comparação (S_{adm})
Projeto	8	SH
Nível A	10	SA
	11	SA+SH
Nível B	8	SH
	9	1.2*SH
	10	SA
	11	SA+SH
Nível C	9	1.8*SH
Nível D	9	2.4*SH
Teste	9	1.2*SH

onde: $SA = f(1.25*SC+0.25*SH)$ e

SH → Tensão básica admissível do material à temperatura máxima (quente)

SC → Tensão básica admissível do material à temperatura mínima (fria)

SA → Faixa de tensões admissíveis para as tensões de expansão

f ~ Fator de redução de tensões para condições cíclicas

5. EXEMPLO

O exemplo que se apresenta a seguir, retirado do Manual do PIPESD [7], ilustra a aplicação do SISTEMA TUBO na análise de uma tubulação cujo modelo discreto está mostrado na Figura 2.

Três casos de carregamentos estáticos foram analisados:

- 1) Peso próprio + pressão interna
- 2) Expansão térmica + movimentos de apoio
- 3) Expansão térmica + pressão interna

onde a pressão interna foi considerada apenas para o cálculo de tensões circunferenciais, embora o programa possa incluir sua contribuição na flexão.

Em seguida foram analisados dois carregamentos dinâmicos:

- 1) Sismo segundo as direções globais X e Y
- 2) Sismo segundo as direções globais Y e Z

definidos por seus espectros de resposta. No cálculo da resposta espectral foram utilizados 13 modos e, para combinação deles, o critério correspondente à equação (3.20).

Para estes casos de carregamento foram feitas, na referência [1], comparações entre os resultados obtidos com o SISTEMA TUBO e o programa PIPESD.

Três combinações de carregamentos foram utilizadas em verificações de equações da Classe 1:

- 1) Carregamento estático número 1
- 2) Carregamento estático número 2 + carregamento dinâmica número 1
- 3) Duas vezes o carregamento dinâmico número 1

Alguns resultados obtidos com o SISTEMA TUBO são comparados com resultados obtidos pelo programa PIPESD, nas Tabelas II a IV.

Na Tabela II, apresentam-se resultados relativos a esforços obtidos na combinação número 2.

A combinação número 3, foi utilizada para exemplificar uma verificação isolada da equação (10) da NB-3653 [2]. Como esta com

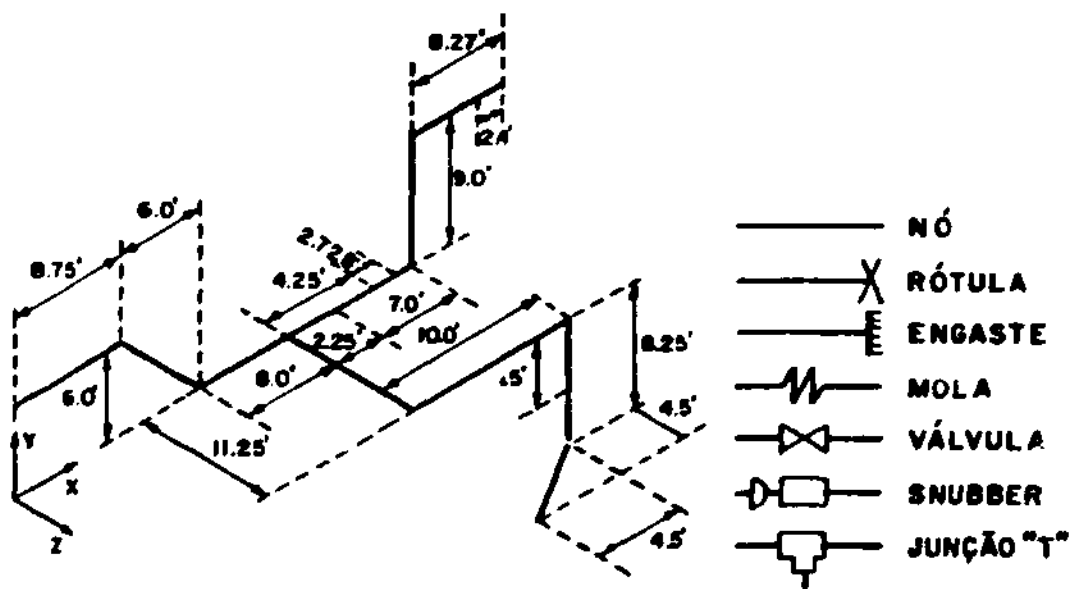
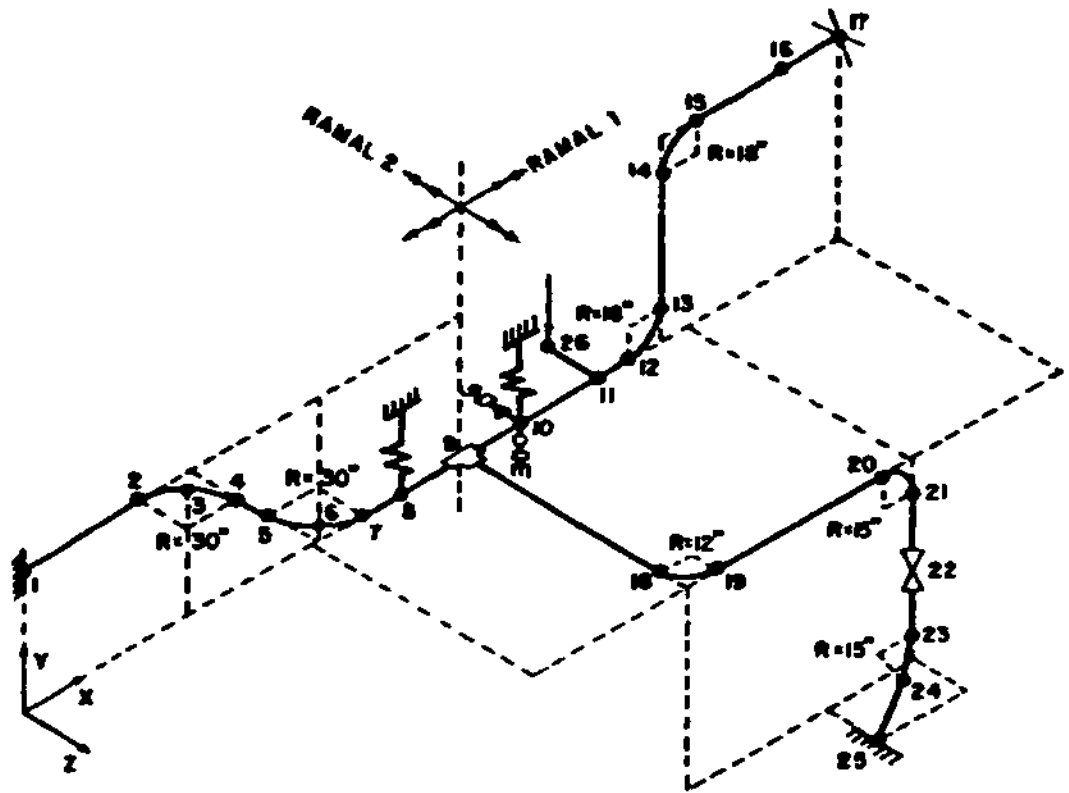


Fig. 2. Modelo da Tubulação Analisada

binação refere-se apenas a um sismo, a única parcela não nula na equação (10), é aquela referente à flexão. Na Tabela III são apresentados os valores das intensidades de tensão primária mais tensão secundária (S_n), já devidamente intensificadas e as relações entre estes valores e a tensão admissível (S_{adm}).

TABELA II. Esforços nas Extremidades dos Elementos
Combinação Número 2

Nó		Força X	Força Y	Força Z	Mom. X	Mom. Y	Mom. Z
4	T	3484.20	1605.50	1359.90	35286.0	13908.0	41264.0
	P	3394.65	1579.16	1378.23	33988.3	-14021.40	40032.1
12	T	484.05	- 589.27	265.32	17786.0	-27392.0	-48260.0
	P	432.70	- 527.62	212.41	16037.6	-26197.1	-44748.0
14	T	- 489.10	361.18	- 176.52	-29190.0	3886.4	54325.0
	P	- 465.75	334.26	- 165.74	-27543.2	2934.5	53315.3
22	T	-1223.30	-2141.30	-1248.90	55218.0	-17687.0	-12565.0
	P	-1227.02	-2104.63	-1228.59	54381.0	-16331.5	-15082.0

T - Resultados obtidos com o SISTEMA TUBO

P - Resultados obtidos com o programa PIPESD

TABELA III. Intensidades de Tensão Primária + Tensão Secundária. Combinação Número 3

Nó		Tensão Flexão	S_n	S_n/S_{adm}
5	T	2146.7	2146.7	0.0239
	P	2141.3	2141.3	0.0238
6	T	8322.4	8322.4	0.0925
	P	8424.0	8424.0	0.0936
10	T	1574.7	1574.7	0.0175
	P	1443.1	1443.1	0.0160
23	T	9403.7	9403.7	0.1140
	P	9386.2	9386.2	0.1138

As intensidades de tensão de pico (S_p), foram calculados pa

ra as combinações número 1 e número 2. Neste caso, estas intensidades de tensão são calculadas automaticamente para três faixas de tensão:

- 1) Combinação 1
- 2) Combinação 1 menos combinação 2
- 3) Combinação 2

Na Tabela IV, alguns valores das intensidades de tensão de pico, para a faixa referente à combinação 1 menos a combinação 2, são apresentados juntamente com as parcelas que os compõe.

TABELA IV. Intensidades de Tensão de Pico
Combinação 1 menos Combinação 2

Nº	Tensão Circunf.	Tensão Flexão	Grad.Lin. Temp.	Grad. Não Linear	S _p	
1	T	4781.3	5630.2	1681.6	2242.1	14335.0
	P	4781.3	5550.7	1681.6	2242.1	14255.7
11	T	6311.2	3335.1	2858.7	2242.1	14747.0
	P	6311.3	3278.5	2858.7	2242.1	14690.5
18	T	3292.8	4785.6	1362.4	1816.5	11257.0
	P	3292.8	4705.3	1362.4	1816.5	11177.1
19	T	4346.5	10107.0	2316.1	1816.5	18586.0
	P	4346.5	10075.0	2316.1	1816.5	18554.1

As diferenças verificadas nos resultados se devem, possivelmente, ao fato de que no SISTEMA TUBO usou-se matriz de massa consistente e foram retidos todos os graus de liberdade do problema estático no cálculo das frequências naturais, o que não é feito no PIPESD. Alteram-se, dessa forma, os resultados numéricos correspondentes às expressões (3.10) e (3.14).

6. CONCLUSÕES

Com a implementação dos procedimentos descritos fica o SISTEMA TUBO em condições de ser aplicado a tubulações desde as análises iniciais do projeto, como expansão térmica, posicionamento de apoios, determinação de deslocamentos e tensões, até a verificação final das equações do código ASME.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho faz parte do Projeto "Análise Dinâmica de Tubulações e Cascas" financiado pela CNEN e FINEP.

BIBLIOGRAFIA

- [1] GALEÃO, A.C.N.R.; GUERREIRO, J.N.C.; BARBOSA, H.J.C. - "Um Sistema Automático para a Análise Estrutural de Tubulações", III Simpósio sobre Sistemas Computacionais para Engenharia Civil e I Congresso Latino-Americano sobre Métodos Computacionais para Engenharia, Porto Alegre, Brasil, dez., 1979.
- [2] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, Division I, Nuclear Power Plant Components, 1977.
- [3] GALEÃO, A.C.N.R.; BARBOSA, H.J.C. - "Excitação Múltipla de Suportes: Formulação e Implementação no SISTEMA TUBO", a ser apresentado no I Simpósio Brasileiro de Tubulações e Vasos de Pressão, Salvador, Brasil, nov., 1980.
- [4] NEWMARK, N.M.; ROSENBLEUTH, E. - "Fundamentals of Earthquake Engineering", Prentice Hall Inc., 1971.
- [5] U.S. Nuclear Regulatory Commission, Regulatory Guide 1.92 - "Combining Modal Responses and Spatial Components in Seismic Response Analysis", feb., 1976.
- [6] KWU-ROHR - Manual do Usuário.
- [7] PIPESD - Pipe Static and Dynamic Analysis Software System, User Information Manual, Control Data Corporation, 1977.