



Relatório de Pesquisa e Desenvolvimento

LCC -
Nº 016/80
DEZEMBRO

DINÂMICA DE TUBULAÇÕES SUJEITA
A RESTRICÇÕES COM FOLGA

DINÂMICA DE TUBULAÇÕES SUJEITA A RESTRIÇÕES COM FOLGA

Abimael F.D. Loula

João N.C. Guerreiro

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

SUMÁRIO

Suportes com folga têm sido utilizados no projeto de tubulações, para funcionarem tanto como limitadores das amplitudes de vibração quanto como dissipadores de energia e protetores de equipamentos próximos à rede e que possam vir a ser danificados no caso da ruptura de um tubo. Nestes casos, o modelo linear freqüentemente utilizado na descrição do comportamento do tubo, perde a sua validade uma vez que as folgas dos suportes introduzem não linearidades nas condições de contorno do problema. Além disso, em situações como a que ocorre no choque coteamento de tubulações (pipe-whip), torna-se necessária uma boa avaliação da capacidade de dissipação de energia, por plastificação tanto do tubo quanto dos suportes. O modelo torna-se mais complexo envolvendo agora não linearidades do material, sendo as técnicas incrementais e iterativas normalmente utilizadas na resolução destes problemas.

Neste trabalho, o princípio dos trabalhos virtuais na sua forma incremental, é utilizado na formulação do problema de vibrações de tubulações planas, de comportamento elastoplástico, submetidas a restrições com folga, também de comportamento elastoplástico e com amortecimento viscoso. Considera-se ainda a possibilidade de movimentos uniformes de apoios, que simulam a ação de sismos. O método dos elementos finitos juntamente com um algoritmo de integração no tempo, são utilizados para a resolução do problema. Alguns exemplos ilustram aplicações do programa desenvolvido.

(autor).
✓

1. Introdução

Em muitas situações o modelo linear não é suficiente para descrever o comportamento mecânico de tubulações reais, torna-se então necessário a consideração de efeitos não lineares. As não linearidades mais freqüentes na análise estrutural de tubulações são aquelas provenientes do comportamento inelástico do material (plasticidade) e as decorrentes da consideração de restrições com folga (não linearidade nas condições de contorno). Podem ainda ocorrer não linearidades geométricas, devidas a grandes deformações ou grandes deslocamentos da tubulação. Este último tipo porém, parece não ser de grande interesse, pois em geral as tubulações são providas de restrições (apoios, suportes, amortecedores, etc.) que visam justamente a limitação dos deslocamentos máximos e das amplitudes de suas vibrações.

Restrições com folga são freqüentes em tubos de trocadores de calor, visando o controle das vibrações induzidas pelo escoamento [1, 2, 3]. Ocorrem também em tubulações em geral, com objetivo de limitar amplitudes de vibrações geradas por transientes termo-hidráulicos, sismo e excitações pulsáteis (bombeamento). Mesmo na análise estática de tubulações são consideradas restrições unilaterais, que só funcionam à compressão ou à tração. Nestes casos a não linearidade é devida apenas às condições de apoio, já que o tubo pode ser considerado em regime elástico.

Na análise do chicoteamento de tubulações de alta energia (pipe-whip) é fundamental a consideração de restrições com folga, e de deformações plásticas tanto no tubo quanto nas restrições. Este problema foi estudado anteriormente pelos autores do presente trabalho, e os principais resultados deste estudo estão apresentados nas referências [4, 5, 6], onde se pode encontrar uma análise da influência de parâmetros tais como: folga e posicionamento das restrições, rigidez e amortecimento das restrições e pressão interna do tubo.

O presente trabalho é uma continuação dos estudos anteriores com a inclusão dos seguintes tópicos: a) extensão do estudo a tubulações planas aperticadas; b) consideração de mais de uma restrição por deslocamento nodal o que permite simular folgas nos dois sentidos; c) consideração de excitação uniforme de base. Estas opções podem ser combinadas com as hipóteses de comportamento elástico ou elasto-plástico do tubo ou das restrições.

2. Formulação do Problema

Conforme foi ressaltado na introdução, neste estudo serão considerados dois tipos de não linearidade. A não linearidade física, decorrente da consideração do comportamento elastoplástico dos materiais do tubo e das restrições, e a não linearidade das condições de contorno, resultante da consideração de folgas nas restrições. Deste modo, a forma incremental do princípio dos trabalhos virtuais (P.T.V.) é a mais adequada para representar este problema.

2.1. Forma Incremental do P.T.V.

De acordo com o princípio dos trabalhos virtuais, a equação do movimento de um corpo B em uma configuração qualquer B_n é

$$\int_V \rho \ddot{\underline{u}}_n \cdot \hat{\underline{u}} \, dv + \int_V \underline{\sigma}_n \cdot \underline{\underline{\epsilon}} \, dv = \hat{W}^{II} + \int_V \rho \underline{b}_n \cdot \hat{\underline{u}} \, dv \quad (1)$$

onde ρ representa a massa específica de B , \underline{u}_n o campo de deslocamentos admissíveis, $\hat{\underline{u}}$ o campo de variações admissíveis ou deslocamentos virtuais. $\underline{\sigma}_n$ é o tensor de tensões na configuração B_n , e $\underline{\underline{\epsilon}}$ é o tensor de deformações. Como este estudo é restrito a pequenas deformações, tem-se:

$$\underline{\underline{\epsilon}} = \frac{1}{2}(\nabla \underline{u} + \nabla \underline{u}^T) \quad (2)$$

o símbolo $(-)$ é usado para indicar grandezas vetoriais ou tensoriais e $(.)$ para denotar produto escalar.

\hat{W}_n é o trabalho virtual das forças externas atuantes sobre B na configuração B_n , inclusive as reações decorrentes das restrições. O vetor \underline{b}_n representa as forças de massa provenientes do campo gravitacional (peso próprio) e de uma excitação de base uniforme, logo

$$\underline{b}(t) = \underline{g} - \underline{\underline{u}}_g(t) \quad (3)$$

onde \underline{g} é o vetor aceleração da gravidade e $\underline{\underline{u}}_g(t)$ representa a aceleração dos apoios, resultante de uma excitação uniforme.

Para se obter a forma incremental associada a expressão (1), considera-se uma nova configuração B_{n+1} próxima de B_n , e define-se:

$$\begin{aligned}
 \underline{u}_{n+1} &= \underline{u}_n + \Delta \underline{u} , \\
 \underline{\epsilon}_{n+1} &= \underline{\epsilon}_n + \Delta \underline{\epsilon} , \\
 \underline{\sigma}_{n+1} &= \underline{\sigma}_n + \Delta \underline{\sigma} ,
 \end{aligned}
 \tag{4a-c}$$

onde $\Delta \underline{u}$, $\Delta \underline{\epsilon}$ e $\Delta \underline{\sigma}$ correspondem a incrementos de deslocamentos, deformações e tensões, entre as configurações B_n e B_{n+1} . Em termos destes incrementos a expressão do P.T.V. na configuração B_{n+1} é.

$$\int_V \rho \underline{u}_{n+1} \cdot \hat{\underline{u}} \, dv + \int_V \Delta \underline{\sigma} \cdot \hat{\underline{\epsilon}} \, dv = \hat{W}_{n+1} + \int_V \rho \underline{b}_{n+1} \cdot \hat{\underline{u}} \, dv - \int_V \underline{\sigma}_n \cdot \hat{\underline{\epsilon}} \, dv
 \tag{5}$$

Usando a aproximação linear

$$\Delta \underline{\sigma} = \underline{D}_n \Delta \underline{\epsilon} ,
 \tag{6}$$

para a equação constitutiva incremental, obtém-se.

$$\int_V \rho \underline{u}_{n+1} \cdot \hat{\underline{u}} \, dv + \int_V \underline{D}_n \Delta \underline{\epsilon} \cdot \hat{\underline{\epsilon}} \, dv = \hat{W}_{n+1} + \int_V \rho \underline{b}_{n+1} \cdot \hat{\underline{u}} \, dv - \int_V \underline{\sigma}_n \cdot \hat{\underline{\epsilon}} \, dv ,
 \tag{7}$$

que é a expressão linearizada da forma incremental do P.T.V. No caso de materiais elastoplásticos o tensor constitutivo \underline{D}_n depende das propriedades elásticas, do critério de plastificação, que é uma função escalar das tensões e deformações plásticas, e da lei de fluência, que define de que modo se processam as deformações plásticas [7], [8].

2.2. Iterações de Equilíbrio

Para se obter uma melhor aproximação dos incrementos de deslocamentos e de tensões, podem ser realizadas iterações de equilíbrio, dentro de cada incremento, para tanto define-se:

$$\underline{u}_{n+1}^{(k)} = \underline{u}_{n+1}^{(k-1)} + \Delta \underline{u}^{(k)} , \quad k = 1, 2, 3, \dots
 \tag{8}$$

com,

$$\underline{u}_{n+1}^{(0)} = \underline{u}_n ,$$

onde k é a ordem da iteração que está sendo realizada no instante $n+1$. Este procedimento, aplicado a equação (7), conduz à seguinte equa

ção para a iteração de ordem k ,

$$\int_V \rho \ddot{u}_{n+1}^{(k)} \cdot \ddot{u} \, dv + \int_V D_{-n}^{(k)} \Delta \underline{\epsilon}^{(k)} \cdot \underline{\hat{\epsilon}} \, dv = \hat{W}_{n+1}^{(k)} + \int_V \rho b_{-n+1} \cdot \ddot{u} \, dv - \int_V \sigma_{n+1}^{(k-1)} \cdot \underline{\hat{\epsilon}} \, dv \quad (9)$$

cuja solução permite determinar o acréscimo de deslocamentos $\Delta \underline{u}^{(k)}$. A convergência é atingida quando $\|\Delta \underline{u}^{(k)}\|$ for menor que uma tolerância pré-fixada. Do ponto de vista computacional é sempre mais conveniente um procedimento iterativo, no qual o lado esquerdo da equação (9) é mantido constante, ou seja,

$$\int_V \rho \ddot{u}_{n+1}^{(k)} \cdot \ddot{u} \, dv + \int_V D_{-n} \Delta \underline{\epsilon}^{(k)} \cdot \underline{\hat{\epsilon}} \, dv = \hat{W}_{n+1}^{(k)} + \int_V \rho b_{-n+1} \cdot \ddot{u} \, dv - \int_V \sigma_{n+1}^{(k-1)} \cdot \underline{\hat{\epsilon}} \, dv \quad (10)$$

que apresenta, em relação a (9), a vantagem de não ser necessário recalcular a matriz do problema a cada iteração.

2.3. Modelo Mecânico da Tubulação

Neste estudo admite-se que a tubulação possa ser simulada como uma viga de seção tubular, e desprezam-se a inércia de rotação e a deformação por cortante. Restringe-se ainda ao caso de tubulações planas, de modo que a única componente de deformação que interessa ao problema é a componente axial ϵ_x , que neste caso particular é dada por

$$\epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} - z \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \quad (11)$$

onde u e w são os deslocamentos do eixo do tubo nas direções axial (segundo o eixo x) e transversal (segundo o eixo z). Igualmente, as tensões ficam restritas à componente axial σ_x , e portanto a equação constitutiva do material do tubo pode ser representada por um gráfico σ x ϵ . Neste estudo considera-se uma relação constitutiva elasto-plástica bilinear, com endurecimento isotrópico, conforme mostrado na Figura 1(a).

Deste modo a equação constitutiva incremental pode ser escrita como,

$$\Delta\sigma_x = E_n \Delta\epsilon_x$$

onde,

$$E_n = E \text{ para } \begin{cases} |\sigma_{xn}| < \sigma_{sn} \text{ (trecho elástico), ou} \\ |\sigma_{xn}| = \sigma_{sn} \text{ e } \sigma_{xn} \Delta\sigma_x < 0 \text{ (descarregamento)} \end{cases}$$

ou,

$$E_n = E_T, \text{ para } |\sigma_{xn}| = \sigma_s \text{ e } \sigma_{xn} \Delta\sigma_x \geq 0.$$

onde E é o módulo de elasticidade e E_T é o módulo tangente. σ_{sn} é a tensão de escoamento do material, num ensaio uniaxial, e varia com as deformações plásticas conforme o gráfico da Figura 1.

De acordo com estas hipóteses, a forma incremental e iterativa do P.T.V., para um tubo elastoplástico é dado por,

$$\int_0^L \rho A (\ddot{u}_{n+1}^{(k)} \hat{u} + \ddot{w}_{n+1}^{(k)} \hat{w}) dx + \int_0^L \int_A E_n \Delta\epsilon_x^{(k)} \hat{\epsilon}_x dAdx = \hat{W}_{n+1}^{(k)} + \int_0^L \rho A (b_{x(n+1)} \hat{u} + b_{z(n+1)} \hat{w}) dx - \int_0^L \int_A \sigma_{x(n+1)}^{(k-1)} \hat{\epsilon}_x dAdx, \quad (13)$$

onde A representa a área da seção transversal e L é o comprimento do tubo. É interessante notar que as integrais de área, indicadas em (13), não podem ser realizadas a priori, uma vez que E_n varia com a posição, em função da história das tensões e deformações plásticas, o mesmo acontecendo com a tensão σ_{xn} . Desse modo essas integrais serão realizadas numericamente, a cada passo no processo incremental. Para tanto, torna-se necessário armazenar os valores das tensões e deformações de cada ponto de integração [5,6].

2.4. Consideração de Restrições com Folga

Cada unidade de restrição é composta de uma mola de comportamento elastoplástico e de um amortecedor viscoso, colocados com uma folga inicial em relação à tubulação, de modo que a restrição só entra

em funcionamento quando o deslocamento da tubulação supera esta folga, conforme ilustram as figuras 1(b) e 1(c). Não há limitação quanto ao número total de unidades de restrição, nem quanto ao número de restrições colocadas em uma mesma seção transversal da tubulação.

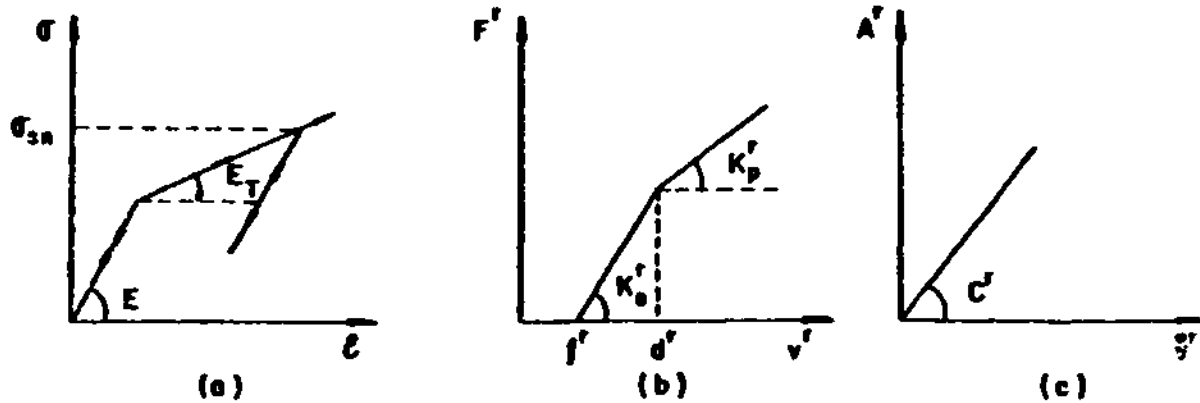


Figura 1. Características do tubo (a) e das restrições (b) e (c)

Admitindo que a tubulação esteja sujeita a N restrições deste tipo, a expressão do trabalho virtual das forças externas, incluindo as reações das restrições, é

$$\hat{W}_{n+1} = \hat{i}_{n+1} - \sum_{r=1}^N F_{n+1}^r \hat{v}^r - \sum_{r=1}^N H(v_{n+1}^r / f_{n+1}^r - 1) C_{n+1}^r \hat{v}^r \quad (14)$$

onde, \hat{i}_{n+1} representa o trabalho virtual das forças externas conhecidas. A primeira somatória representa o trabalho virtual das reações das molas e a segunda somatória o trabalho virtual das reações dos amortecedores. v^r é o deslocamento do eixo do tubo na direção da restrição r . A função $H(\xi)$ é definida da seguinte maneira:

$$H(\xi) = 0, \text{ para } \xi < 0, \text{ e}$$

$$H(\xi) = 1, \text{ para } \xi \geq 0. \quad (15)$$

Quando $v_{n+1}^r / f_{n+1}^r \geq 1$, o deslocamento do tubo supera a folga da restrição r , e portanto esta restrição entra em funcionamento. Admitte-se que a restrição não tem massa, e que após o choque permanece em contato com a tubulação, até que haja inversão no sentido da reação da mola. Devido a plastificação da restrição a folga f^r e o limite elástico d^r variam e torna-se necessário atualizá-los a cada incre -

mento de deformação plástica da restrição.

Para se obter a forma incremental linearizada de \hat{W}_{n+1} , admitam-se as seguintes aproximações

$$v_{n+1}^r = v_n^r + \Delta v^r ,$$

$$H(v_{n+1}^r/f_{n+1}^r - 1) = H(v_n^r/v_n^r - 1) ,$$

$$F_{n+1}^r = F_n^r + K_n^r \Delta v^r , \quad (15a-c)$$

onde K_n^r é dado por,

$$K_n^r = 0 \quad \text{para } v_n^r/f_n^r < 1$$

$$K_n^r = K_e^r \quad \text{para } \begin{cases} 1 \leq v_n^r/f_n^r < d_n^r/f_n^r , \text{ ou} \\ v_n^r/f_n^r = d_n^r/f_n^r \text{ e } v_n^r \dot{v}_n^r < 0 \end{cases}$$

$$K_n^r = K_p^r , \quad \text{para } v_n^r/f_n^r = f_n^r/f_n^r \text{ e } v_n^r \dot{v}_n^r \geq 0 .$$

Destas aproximações resulta,

$$\hat{W}_{n+1} = \hat{\tau}_{n+1}^r - \sum_{r=1}^N F_n^r \hat{v}^r - \sum_{r=1}^N K_n^r \Delta v^r \hat{v}^r - \sum_{r=1}^N H(v_n^r/f_n^r - 1) C^r \dot{v}_n^r \hat{v}^r , \quad (16)$$

que representa a primeira aproximação do trabalho virtual das forças externas na configuração B_{n+1} . De acordo com o esquema iterativo definido pela equação (13), a aproximação de ordem k de \hat{W}_{n+1} é dada por

$$\hat{W}_{n+1}^{(k)} = \hat{\tau}_{n+1}^r - \sum_{r=1}^N F_{n+1}^{(k-1)} \hat{v}^r - \sum_{r=1}^N K_n^r \Delta v^{r(k)} \hat{v}^r - \sum_{r=1}^N H(v_n^r/f_n^r - 1) C^r \dot{v}_n^{r(k)} \hat{v}^r . \quad (17)$$

Substituindo (17) em (13) obtém-se,

$$\begin{aligned} & \int_0^L \rho A (\ddot{u}_{n+1}^{(k)} \hat{u} + \ddot{w}_{n+1}^{(k)} \hat{w}) dx + \int_0^L \int_A E_n \Delta \epsilon_x^{(k)} \hat{\epsilon}_x dA dx + \sum_{r=1}^N K_n^r \Delta v^{r(k)} \hat{v}^r + \\ & + \sum_{r=1}^N H(v_n^r/f_n^r - 1) C^r \dot{v}_n^{r(k)} \hat{v}^r = \hat{\tau}_{n+1}^r - \sum_{r=1}^N F_{n+1}^{(k-1)} \hat{v}^r + \\ & + \int_0^L \rho A (b_{x(n+1)} \hat{u} + b_{z(n+1)} \hat{w}) dx - \int_0^L \int_A \sigma_{x(n+1)}^{(k-1)} \hat{\epsilon}_x dA dx , \quad (18) \end{aligned}$$

cuja solução representa a aproximação de ordem k na configuração B_{n+1} .

3. Método de Solução

Na solução deste problema utilizou-se o método dos elementos finitos para discretização espacial e o algoritmo de Newmark para discretização no tempo. O elemento finito utilizado foi o elemento de pórtico plano, com dois nós e três graus de liberdade por nó (função de interpolação cúbica para os deslocamentos transversais e linear para os deslocamentos axiais).

A aproximação de elementos finitos aplicada a equação (18) conduz ao seguinte sistema de equações diferenciais ordinárias no tempo.

$$\underline{M} \ddot{\underline{D}}_{n+1}^{(k)} + \underline{C}_n \dot{\underline{D}}_{n+1}^{(k)} + \underline{K}_n \Delta \underline{D}_{n+1}^{(k)} = \underline{F}_{n+1} + \underline{B}_{n+1} - \underline{P}_{n+1}^{(k-1)}, \quad (19)$$

onde \underline{M} , \underline{C}_n e \underline{K}_n são matrizes globais, obtidas a partir das respectivas matrizes dos elementos. \underline{M} é a matriz de massa, constante no tempo. \underline{C}_n é a matriz de amortecimento no instante n , e é devida ao amortecimento das restrições ou ao amortecimento estrutural do tubo. Neste estudo a matriz de amortecimento da estrutura é obtida por combinação linear da matriz de massa e da matriz de rigidez elástica. \underline{K}_n é a matriz de rigidez tangente à configuração B_n , e engloba a rigidez do tubo e a rigidez das restrições. $\ddot{\underline{D}}_{n+1}^{(k)}$ e $\dot{\underline{D}}_{n+1}^{(k)}$ são as aproximações de ordem k dos vetores de acelerações e velocidades no instante $n+1$. $\Delta \underline{D}_{n+1}^{(k)}$ corresponde ao vetor de incrementos de deslocamentos da iteração de ordem k , no instante $n+1$. O incremento de deslocamentos entre os instantes n e $n+1$, será denotado por $\Delta \underline{D}_k$, e é dado por,

$$\Delta \underline{D}_k = \sum_k \Delta \underline{D}_{n+1}^{(k)}. \quad (20)$$

O vetor \underline{F}_{n+1} resulta da discretização de \hat{f}_{n+1} , \underline{B}_{n+1} resulta da discretização da expressão do trabalho virtual das forças de massa, e $\underline{P}_{n+1}^{(k-1)}$ é obtido da discretização dos demais termos independentes da equação (18).

Para discretização no tempo de (19), utilizou-se o algoritmo de Newmark, adotando-se sempre os valores $\beta = 1/4$ e $\gamma = 1/2$ [9]. Neste caso as velocidades e acelerações no instante $n+1$ são aproximadas por:

$$\dot{\underline{D}}_{-n+1}^{(k)} = \frac{2}{\Delta t} c \underline{D}_{-k} - \dot{\underline{D}}_{-n} \quad (21)$$

$$\ddot{\underline{D}}_{-n+1}^{(k)} = \frac{4}{\Delta t^2} \Delta \underline{D}_{-k} - \frac{4}{\Delta t} \dot{\underline{D}}_{-n} - \ddot{\underline{D}}_{-n} \quad (22)$$

Substituindo estas aproximações em (19) e levando em conta a equação (2), obtém-se o seguinte sistema de equações algébricas lineares,

$$\left(\frac{4}{\Delta t^2} M + \frac{2}{\Delta t} C_{-n} + K_{-n} \right) \Delta \underline{D}_{-n}^{(k)} = \underline{F}_{-n+1} + \underline{B}_{-n+1} - \underline{P}_{-n+1}^{(k-1)} + M(\ddot{\underline{D}}_{-n} + \frac{4}{\Delta t} \dot{\underline{D}}_{-n} - \frac{4}{\Delta t^2} \Delta \underline{D}_{-k-1}) + C_{-n}(\dot{\underline{D}}_{-n} - \frac{2}{\Delta t} \Delta \underline{D}_{-k-1}) \quad (23)$$

cuja solução fornece o vetor $\Delta \underline{D}_{-n}^{(k)}$ de incrementos de deslocamentos da iteração de ordem k no instante $n+1$. As velocidades e acelerações no instante $n+1$ são calculadas, respectivamente, pelas equações (21) e (22).

4. Resultados

Os exemplos apresentados a seguir, visam ilustrar algumas situações em que pode ser necessária a consideração da iteração tubo-suportes com folga.

A análise mais detalhada da influência de parâmetros das restrições pode ser encontrada em [4], [5], [6], por exemplo.

Exemplo 1

O exemplo de tubulação apresentado na Figura 2, procura simular um tubo de trocador de calor. O tubo é preso em uma de suas extremidades, em uma placa de espessura relativamente grande e passa por furos em placas paralelas que lhe servem como guias e limitadores das vibrações induzidas pelo escoamento do fluido. Desta forma, na análise deste problema, torna-se necessária a consideração da iteração tubo-suporte. Como neste caso as deformações do tubo são pequenas, admite-se que o seu comportamento bem como o das restrições, é elástico.

O tubo tem as seguintes características:

- diâmetro médio: 1,3cm
- espessura: 0,3cm
- módulo de Young: $2,1 \times 10^7 \text{N/cm}^2$

- massa específica: $7,8 \times 10^{-5} \text{ N.s/cm}^4$

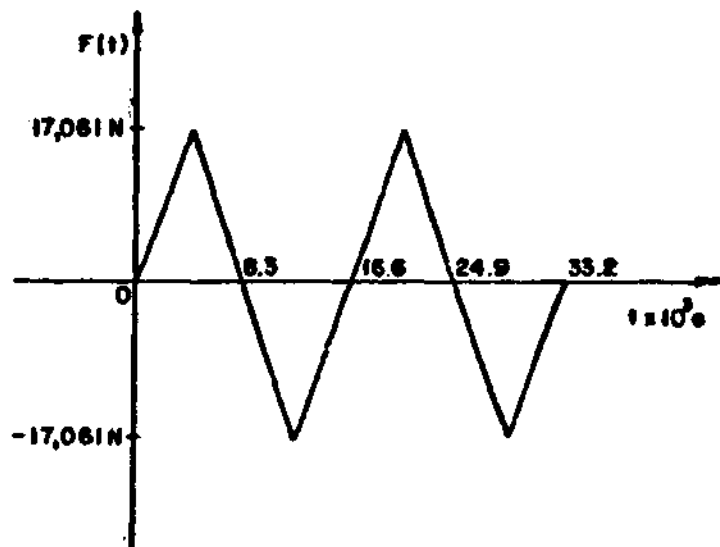
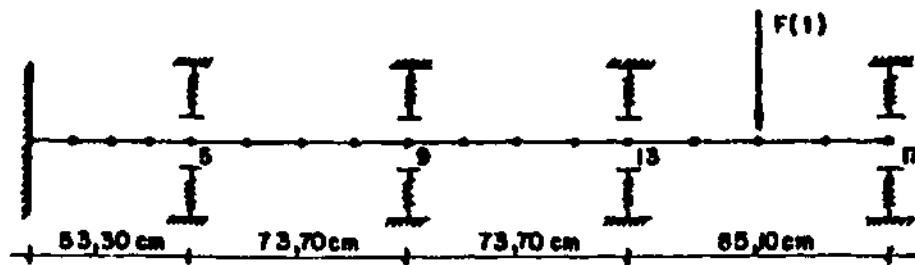


Figura 2. Exemplo número 1

Todas as restrições têm folga de $0,038 \text{ cm}$ e rigidez de $1,75 \times 10^4 \text{ N/cm}$. A força excitadora cuja história no tempo está mostrada na Figura 2, tem frequência igual à frequência de primeiro modo do tubo, calculada admitindo-se que não há folga nas restrições. Nas Figuras 3 e 4, estão traçadas as histórias no tempo dos deslocamentos dos pontos em que estão aplicadas as restrições.

Exemplo 2

Procura-se aqui, através de um exemplo simples, Figura 5, mostrar algumas modificações de comportamento, quando são ou não consideradas restrições com folga.

O tubo analisado foi considerado elastoplástico perfeito, está submetido a uma excitação de base igual a $980 \text{ sen } 40t \text{ cm/s}^2$ e tem as seguintes características:

- diâmetro médio: 10cm
- espessura: 5cm

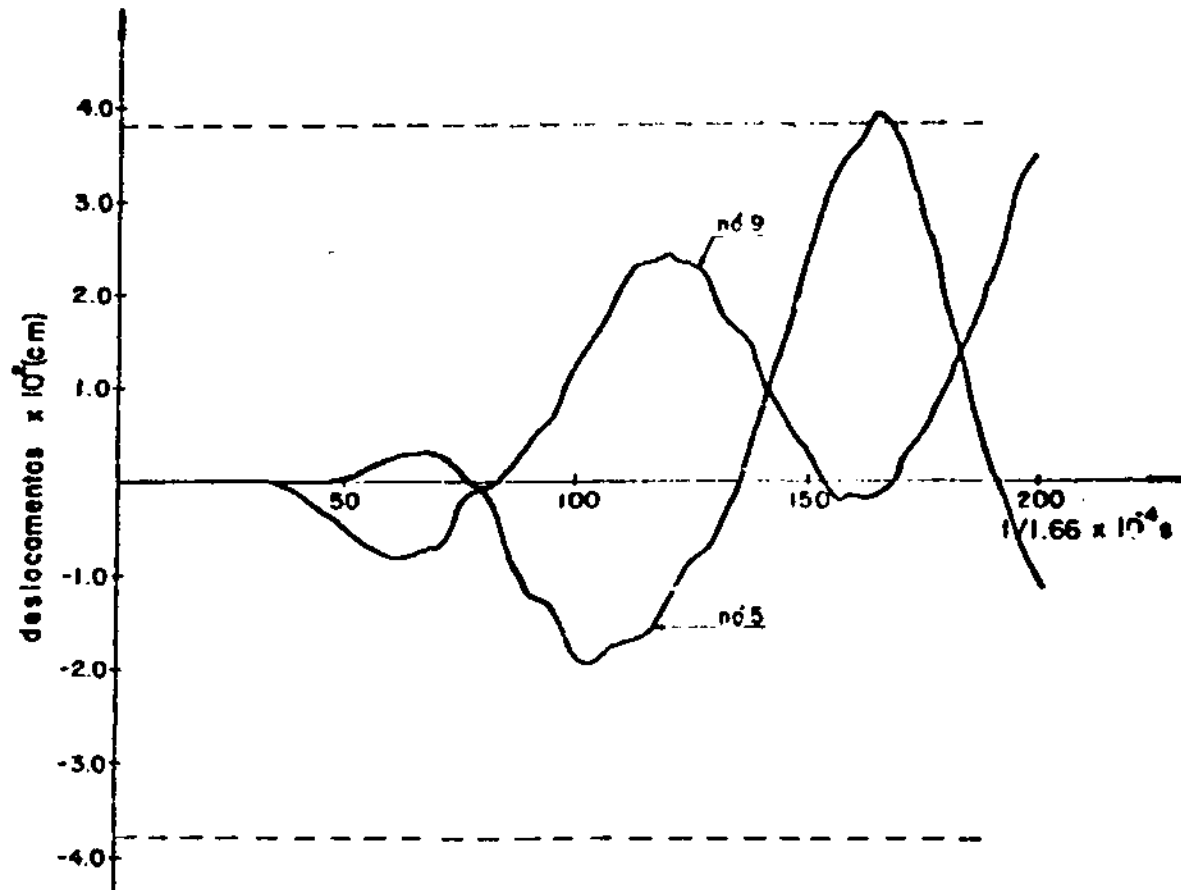


Figura 3. Histórias dos deslocamentos dos nós 5 e 9

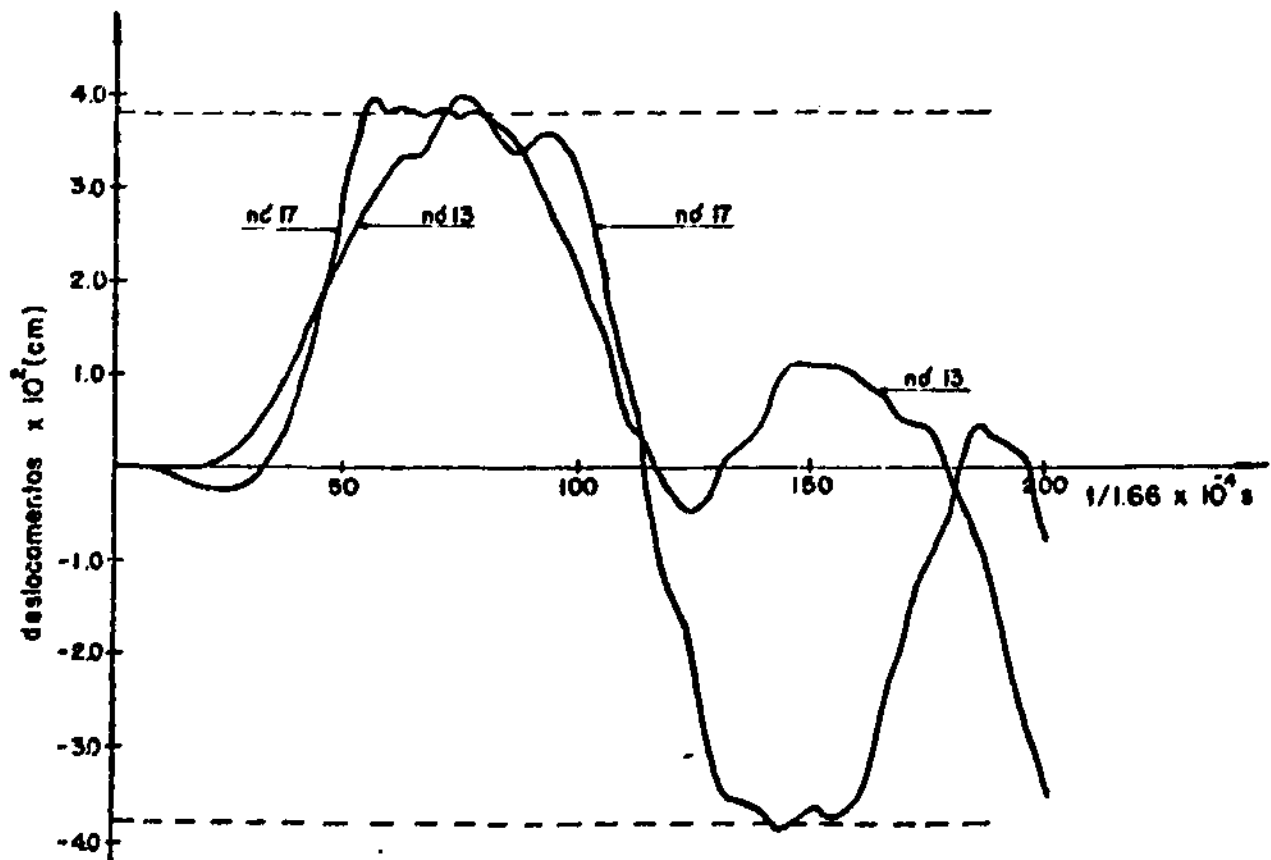


Figura 4. Histórias dos deslocamentos dos nós 13 e 17

- módulo de Young: $2,1 \times 10^7 \text{N/cm}^2$
- massa específica: $7,8 \times 10^{-5} \text{N.s/cm}^4$
- tensão de plastificação: $4,2 \times 10^4 \text{N/cm}^2$

As restrições são também elastoplásticas perfeitas e têm rigidez igual a $2,1 \times 10^5 \text{N/cm}$, força de plastificação igual a $4,2 \times 10^4 \text{N}$ e folga de 2,0cm.

Na Figura 6, estão mostradas as histórias no tempo dos deslocamentos da extremidade do tubo, quando se considera apenas a restrição inferior, quando são consideradas as duas restrições e sem restrições. Observa-se que as duas restrições têm um bom funcionamento, limitando as amplitudes do movimento do tubo. No caso em que apenas uma delas é colocada, a amplitude fica limitada em um sentido porém pode vir a crescer muito no outro. Isto deve-se provavelmente ao fato de que no período de tempo em que a resposta foi calculada, nem o tubo nem a mola experimentaram deformações plásticas e portanto não houve dissipação de energia.

Na Figura 7 estão traçadas as histórias dos momentos no engaste para os casos sem restrição e com a restrição inferior apenas. No caso sem restrição, os momentos variam de forma semelhante à variação de deslocamentos da extremidade o que deve-se ao fato de que a excitação de base tem frequência muito próxima à frequência do primeiro modo do tubo. No caso em que existe a restrição (com $K_e = 1,05 \times 10^5 \text{N/cm}$), observa-se uma perturbação na variação dos momentos e, como na história dos deslocamentos, um aumento da frequência da resposta, em relação ao caso sem restrições, provavelmente devido ao fato de que neste caso, não apenas o primeiro modo tem contribuição significativa para a resposta da estrutura. observa-se também que no caso com restrição, os momentos podem assumir valores maiores do que aqueles assumidos quando não há restrições.

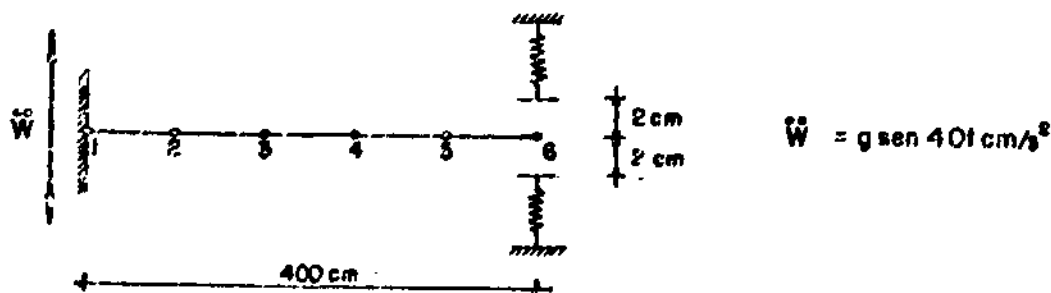


Figura 5. Exemplo número 2 - excitação de base

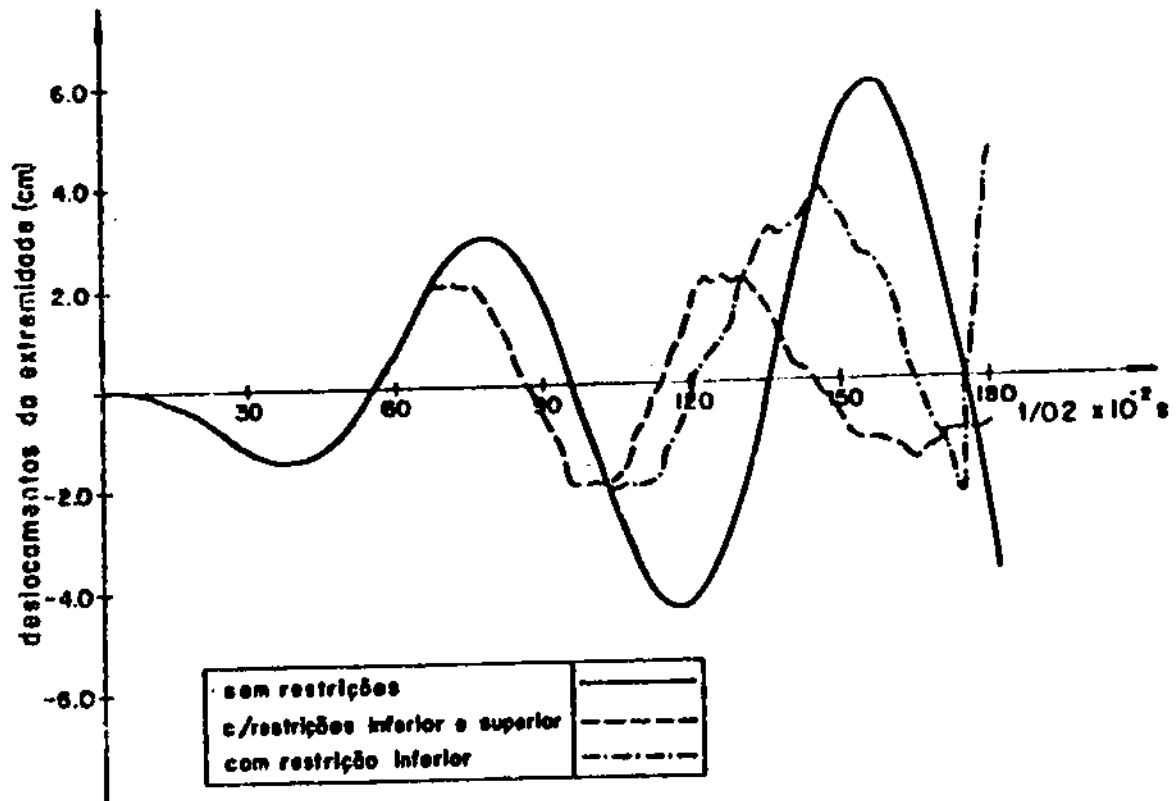


Figura 6. Histórias dos deslocamentos da extremidade

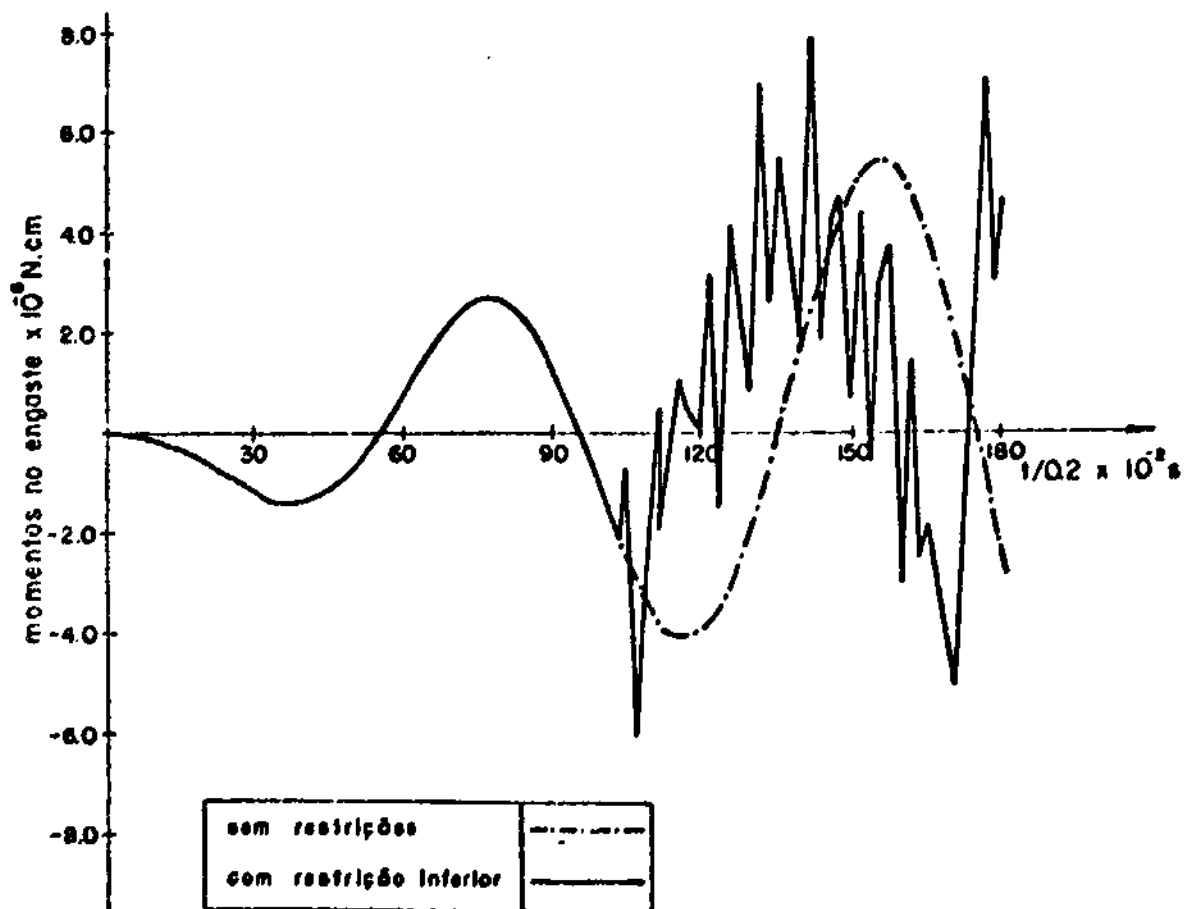


Figura 7. Histórias dos momentos no engaste

Exemplo 3

A tubulação apresentada na Figura 8, foi submetida a dois pulsos triangulares, defasados de 0.1s e aplicados nos nós 6 e 8 conforme mostra a figura. O tubo tem diâmetro médio de 20cm, espessura de 0,5cm e demais propriedades iguais às dos exemplos anteriores. A restrição colocada no nó 8 tem o seu diagrama de força x deslocamento mostrado na Figura 8.

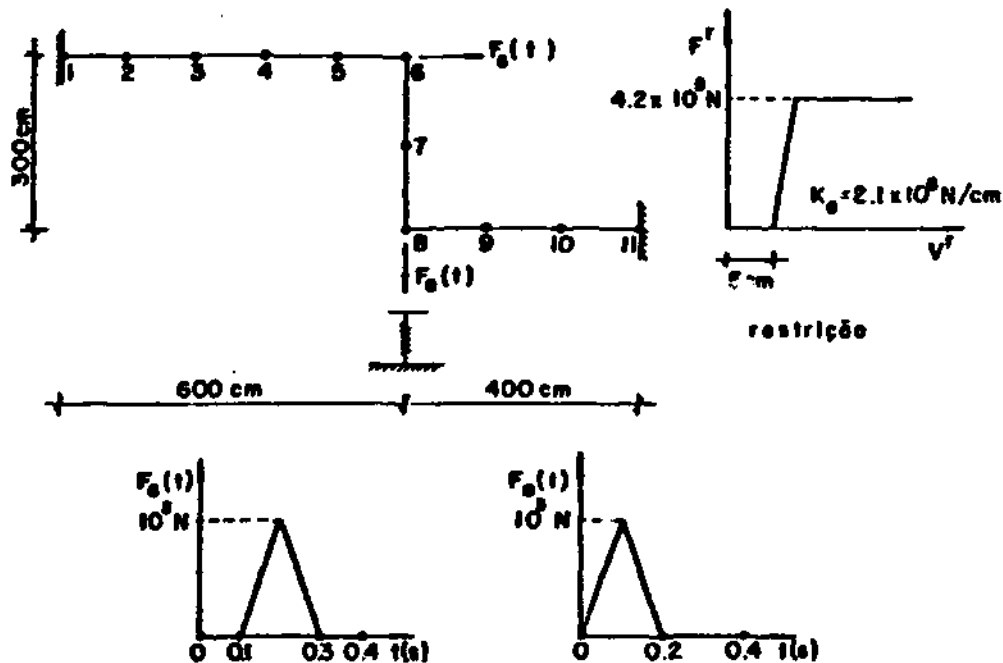


Figura 8. Exemplo número 3

Na Figura 9, é apresentado um diagrama no qual as regiões hachuradas correspondem àquelas que experimentaram deformações plásticas quando não é considerada a restrição. Quando a restrição é considerada, todo o tubo permanece no regime elástico e apenas a restrição experimenta pequenas deformações plásticas.

As histórias dos deslocamentos verticais do nó 8, onde ocorrem os valores máximos, estão mostrados na Figura 10, observando-se aí a eficiência da restrição como limitadora das amplitudes do movimento do tubo. Pode-se notar também que no caso sem restrição, devido ao fato do tubo ter se deformado plasticamente, a amplitude das suas oscilações vai se reduzindo uma vez que há dissipação de energia.

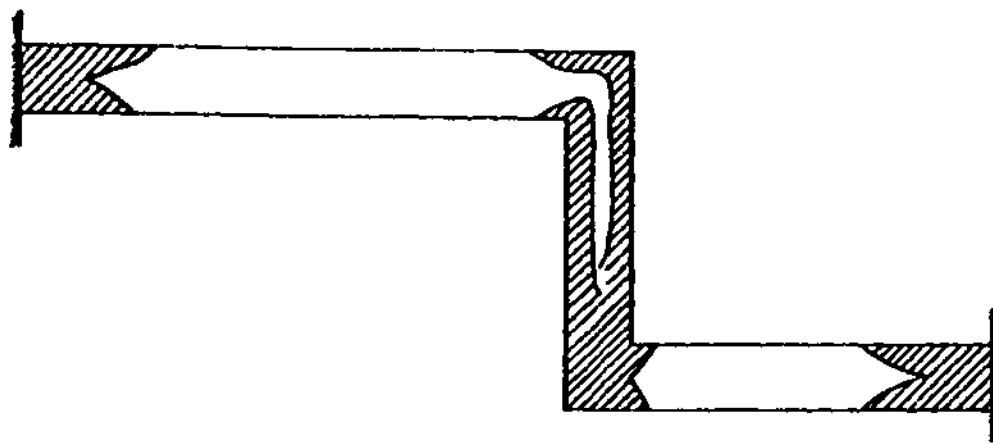


Figura 9. Regiões que experimentam deformações plásticas quando não se considera a restrição

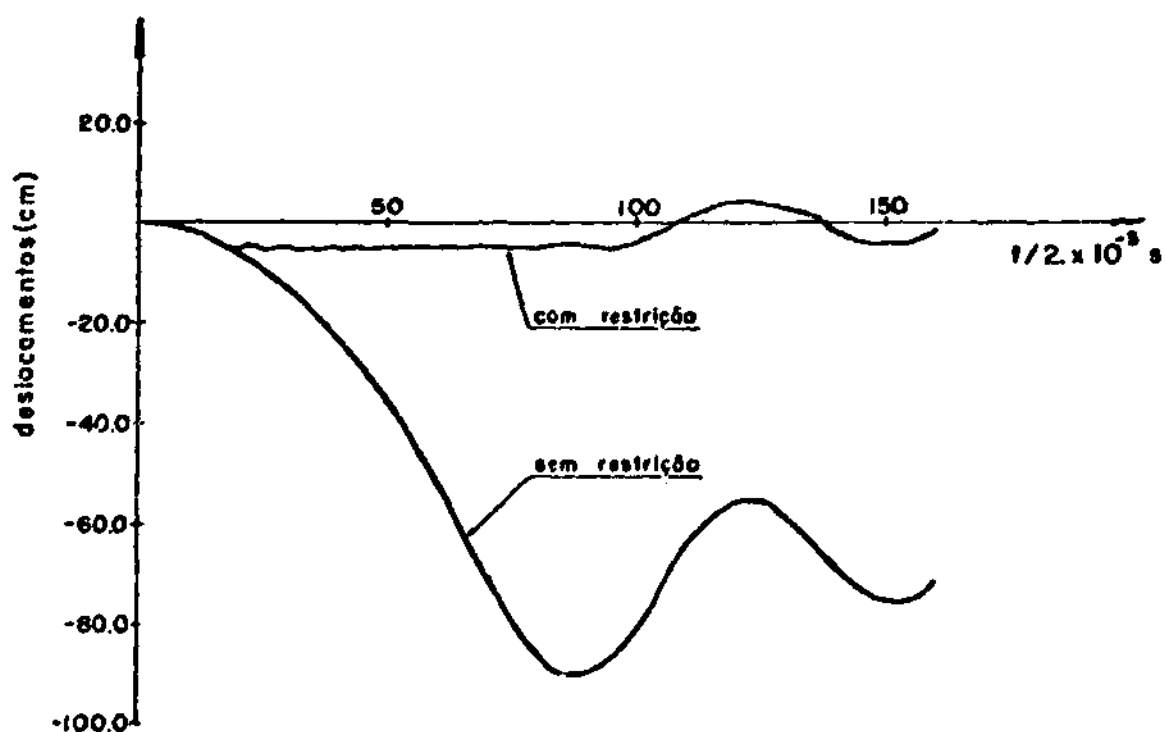


Figura 10. Histórias dos deslocamentos do nó 8

5. Conclusões

Apesar dos exemplos analisados não terem caráter geral mas sim representarem situações particulares idealizadas, está claro que as restrições com folga podem ser utilizadas como limitadores de amplitudes de vibrações em tubulações, sem que introduzam esforços adi -

cionais durante o funcionamento normal das mesmas. Entretanto, uma análise adequada do comportamento do sistema tubo-restrições, torna-se necessária a fim de que o dimensionamento e posicionamento correto destas, conduzam a sistemas capazes de funcionarem como bons absorvedores e dissipadores de energia.

Bibliografia

- [1] Lee, K.N. and Hollmeier, R.J., "Gapped restraints and pipe whipping", IV SMIRT, paper F4/2, San Francisco, USA, (1977).
- [2] Shin, Y.S.; Jendrzeczyk, J.A. and Wambsganss, M.W., "The effect of tube-support interaction on the dynamic response of heat exchanger tubes", IV SMIRT, paper F6/5, San Francisco, USA, (1977).
- [3] Ko, P.L. and Rogers, R.J., "Analytical and experimental studies of tube/support interactions in multi-span heat exchanger tubes", V SMIRT, paper F9/4, Berlin, (1979).
- [4] Loula, A.F.; Galeão, A.C. e Guerreiro, J.N., "Um modelo de elementos finitos para o estudo do chicoteamento em tubulações de alta energia", Anais da Conferência sobre Análise, Projeto e Construção de Estruturas de Centrais Nucleares", pp. 983-998, Porto Alegre, (1978).
- [5] Guerreiro, J.N.C.; Galeão, A.C. e Loula, A.F., "Pipe-whip- Um programa geral de análise", Anais do V Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, ABCM, vol. D, pp. 119-129, Campinas, SP, (1979).
- [6] Guerreiro, J.N.C.; Galeão, A.C. e Loula, A.F., "Estudo de influência de parâmetros do chicoteamento de tubulações", Revista Brasileira de Ciências Mecânicas, vol. II, nº 1, pp. 1-10, ABCM, (1980).
- [7] Feijão, R. e Taroco, E., "Introducción a Plasticidad y su Formulaci6n Variacional", II Escola de Matemática Aplicada, LCC/CNPq, Rio de Janeiro, (1980).
- [8] Bathe, K.J., "Static and dynamic geometric and material non linear analysis using ADINA", Report 82448-2, MIT, Mass., (1977).

- [9] Newmark, N.M., "A method of computation for structural dynamics", Proc. ASCE, vol. 85, EM-3, pp. 67-94. (1959).