

BSB/GPT/15

VII SEMINÁRIO NACIONAL DE  
PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA

GRUPO II

PRODUÇÃO TÉRMICA

(GPT)

VIBRAÇÕES EM TUBULAÇÕES  
DE USINAS NUCLEARES

Autores: Manoel Regis Lima Verde Leal  
Luiz Bevilacqua  
Empresa: PROMON ENGENHARIA S.A.

Brasília - DF - Brasil

1984

## 1. INTRODUÇÃO

Mesmo uma rápida análise na experiência operacional da maioria das usinas nucleares em operação comercial é suficiente para indicar que tubulação, e seus acessórios, são um dos principais itens envolvidos em eventos relacionados com a segurança nuclear (1,2), muitos dos quais ocasionando o desligamento de emergência do reator.

Em um dos importantes trabalhos sobre confiabilidade de tubulações em usinas nucleares, Bush (4) conclue que a probabilidade de falha em tubulações nucleares situa-se na faixa de  $10^{-4}$  a  $10^{-6}$  por reator ano, sendo a maior probabilidade relativa às tubulações mais finas. É interessante notar que a maior parte das falhas ocorre mais por falta de flexibilidade adequada da tubulação do que por falta de suportes. A severidade das falhas consideradas varia desde pequenos vazamentos até completa ruptura da parede da tubulação.

No trabalho encomendado pelo Electric Power Research Institute (EPRI), sobre confiabilidade de tubulações de usinas nucleares, Basin e Burns (4) indicam que a causa mais frequente das falhas de tubulação são as vibrações, com aproximadamente 25% de incidência nas falhas analisadas. Neste trabalho também é estimado um tempo para ocorrência de falhas relacionadas com a segurança de aproximadamente três anos para usinas do tipo PWR e quatro e meio anos para as do tipo BWR. Apesar deste trabalho ser baseado principalmente nos relatórios de eventos relacionados com a segurança de usinas (Licensee Event Reports - LER), o que deixa de fora muitas falhas de tubulações de sistemas não nucleares, as estatísticas e conclusões indicadas servem para alertar os projetistas de tubulações sobre áreas críticas que devem ser analisadas mais cuidadosamente.

A literatura técnica apresenta ainda outros trabalhos onde são discutidos casos específicos de problemas associados a vibrações em tubulações como por exemplo a referência (5) que trata do caso de vibrações induzidas pelo escoamento em instalação de válvula alívio e da referência (6) onde é apresentada uma análise teórica de vibrações auto-excitadas devido a válvulas de controle operando com pequenas aberturas.

A variedade de causas de vibrações em tubulação que se observa numa análise dessa literatura técnica aliada à complexidade teórica dos fenômenos associados torna bastante difícil a missão do projetista de tubulação. A prática usual tem sido evitar uma análise detalhada na fase de projeto, usando-se apenas margens de segurança maiores nas áreas onde se espera ocorrência do problema, e tomar medidas corretivas no período de comissionamento, se necessário.

2.

Os atrasos e custos adicionais de manutenção e montagem acarretados por essa prática têm estimulado o estudo mais profundo dos fenômenos envolvidos nos problemas de vibrações em tubulações.

O intuito deste trabalho é identificar as principais causas do problema para permitir ao projetista de tubulação identificar melhor as áreas críticas e tomar medidas corretivas ainda na fase de projeto. Os métodos de análise de vibrações são também apresentados para fornecer subsídios ao projetista na seleção dos métodos de análise dinâmica e para a conversão dos resultados experimentais em fontes de excitação que possam ser utilizadas na determinação das solicitações na tubulação para tomar medidas corretivas quando o problema só é identificado durante o comissionamento ou operação do sistema.

## 2. CAUSAS DE VIBRAÇÕES

As causas de vibrações em tubulações são inúmeras mas para efeito de estudo podem ser agrupadas em duas categorias:

Vibrações mecânicas  
Vibrações induzidas pelo escoamento

Como as medidas corretivas para cada tipo de causa são diferentes é de fundamental importância a identificação desta causa.

### 2.1 Vibrações Mecânicas

As vibrações mecânicas são as causadas por agentes externos que se constituem essencialmente de equipamentos rotativos e alternativos tais como bombas e compressores. As vibrações desses equipamentos são transmitidas diretamente às tubulações a eles ligadas podendo ser ampliadas ou atenuadas dependendo das características das tubulações e seus suportes.

Quando são detetadas na fase de comissionamento a causa pode, de um modo geral, ser facilmente identificada através de medidas das frequências principais de vibração da tubulação que estão relacionadas com parâmetros bem definidos dos equipamentos tais como RPM e frequência de passagem das pás.

Para se minimizar este tipo de vibração, deve-se primeiramente procurar limitar os níveis de vibração dos equipamentos em si, através de um projeto adequado de suas fundações e da fixação dos equipamentos a elas, da inclusão de requisitos de testes e limites máximos admissíveis de vibração nas especificações dos equipamentos e da escolha criteriosa do tipo de equipamento para cada aplicação.

Do lado da tubulação algumas providências podem ser tomadas também na fase de projeto visando diminuir os efeitos das vibrações. As mais comumente usadas são:

- selecionar o espaçamento dos suportes de modo que as frequências naturais da tubulação não estejam próximas das frequências de excitação;
- prever suportes de grande rigidez para as tubulações;
- utilizar conexões flexíveis entre o equipamento e a tubulação.

Normalmente as frequências envolvidas neste tipo de vibração são relativamente altas de modo que a utilização de amortecedores de vibração como suportes é de pouca ou nenhuma valia para corrigir o problema.

Nas usinas nucleares este tipo de fenômeno é particularmente importante devido ao grande porte dos equipamentos envolvidos.

## 2.2 Vibrações Induzidas pelo Escoamento

Este grupo de vibrações engloba um número considerável de fenômenos tais como escoamento pulsante, turbulência, instabilidade de equipamentos de controle de vazão, transientes termohidráulicos, cavitação, instabilidade de escoamento bifásico e instabilidades fluido-elásticas.

Ac contrário das vibrações mecânicas, as causas específicas das vibrações induzidas pelo escoamento são difíceis de serem identificadas por simples medida dos níveis e frequências das vibrações em questão.

Isto dificulta consideravelmente a decisão de que medidas corretivas devem ser tomadas para eliminar as causas ficando o projetista da tubulação com a responsabilidade de adequar os suportes da linha aos esforços esperados que devem ser estimados ou calculados conforme descrito no parágrafo 3 deste trabalho.

A decisão de se analisar este tipo de fenômeno ainda na fase de projeto é uma decisão econômica uma vez que se trata normalmente de análises caras que necessitam de profissionais altamente especializados e exaustiva utilização de computadores digitais.

Todavia é importante identificar-se, ainda na fase de projeto, as áreas onde existam condições favoráveis ao aparecimento de vibrações induzidas pelo escoamento para que artifícios de projetos possam ser utilizados

4.

para minimizar o potencial de ocorrência dos fenômenos que causariam essas vibrações.

#### 2.1.1 Escoamento Pulsante

Este tipo de escoamento ocorre em tubulações associadas a bombas e compressores alternativos e pode acarretar sérios problemas se não for devidamente considerado. Um sistema onde ocorre com frequência este problema é o sistema de alimentação do circuito primário (charging system) onde ele é apontado como responsável pela metade das falhas de tubulação ocorridas nas usinas americanas (4), devido a existência de bombas alternativas.

O uso de amortecedores de pulsação é o meio mais comum para se contornar este problema. Em alguns casos a utilização de bombas alternativas de múltiplos cilindros diminui o nível de vibrações.

É importante aqui também manter as frequências naturais da tubulação afastadas das frequências excitadoras através de locação conveniente dos suportes.

#### 2.1.2 Turbulência

As fontes mais comuns de turbulência em escoamento interno à tubulação são as restrições ao fluxo (orifício de quebra de pressão, válvulas), mudanças de direção (Tês, curvas), altas velocidades, rugosidades e bombas centrífugas.

No projeto deve ser evitado sempre que possível a existência de várias destas fontes de turbulência em um mesmo trecho de tubulação, principalmente quando altas velocidades não podem ser evitadas.

#### 2.1.3 Instabilidade de Equipamento de Controle de Vazão

Válvulas e outros equipamentos de controle de vazão quando operando muito estrangulada são suscetíveis a instabilidades que podem acarretar vibrações auto-excitadas cujos efeitos são transmitidos não só ao escoamento como também a partes da própria válvula que vibram e transmitem suas vibrações diretamente à tubulação. Este fenômeno é analisado em (6) e uma ocorrência com sérias consequências desse tipo de instabilidade é relatado em (7).

Quando o sistema tem que operar a cargas parciais com vazões muito menores que a vazão de projeto, deve ser previsto uma válvula de controle de menor diâmetro, em "by pass" com a válvula principal, que assume o

controle da vazão quando esta atinge um certo valor mínimo.

Esta prática é largamente utilizada para o controle de vazão de água de alimentação das usinas nucleares.

#### 2.1.4 Transientes Termohidráulicos

Este título engloba uma família de fenômenos associados com as variações de condições de operação dos sistemas, quer por manobras controladas quer por acidentes.

Dentre estes fenômenos convém salientar o golpe de ariete, "steam-hammer", descarga de válvulas de segurança, ruptura de tubulações (blow down), evaporação brusca de condensado (flashing). As causas mais comuns desses fenômenos são as manobras bruscas ou acidentes tais como paradas e partidas de bombas, fechamento ou abertura brusca de válvulas, ruptura de tubulação, etc.

Estes fenômenos são normalmente identificados e analisados na fase de projeto. Os esforços produzidos são principalmente no sentido axial da tubulação sendo portanto mais críticos para os suportes que para a tubulação propriamente dita.

#### 2.1.5 Cavitação

Escoamento de fluido com pressões próximas da pressão de saturação são particularmente suscetíveis a ocorrência de cavitação. Variações de área, tais como orifícios de quebra de pressão e válvulas de controle, e sucção de bombas são os locais mais comuns de ocorrência deste fenômeno. Uma seleção cuidadosa da válvula de controle, como mostra a referência (8), a localização adequada dos orifícios de quebra de pressão e a observação dos requisitos de NPSH das bombas são as grandes ferramentas ao alcance do projetista para evitar as vibrações e destruição de material acarretada pela cavitação.

#### 2.1.6 Instabilidade de Escoamento Bifásico

A ocorrência de escoamento bifásico em usinas nucleares dá-se principalmente nas linhas de condensado. Existem sete tipos de escoamento bifásico distintos dependendo da configuração das fases líquida e vapor. Alguns destes tipos de escoamentos possuem instabilidades inerentes e o tipo "slug flow" deve ser evitado devido às oscilações de vazão e pulsos de pressão causados pelo arraste periódico de

6.

massas de líquido pelo vapor. A referência (9) sugere artifícios que podem ser usados pelo projetista para escapar do "slug flow".

### 2.1.7 Instabilidade Fluido-Elástica

Quando uma tubulação está sujeita a escoamento interno, podem ocorrer velocidades críticas para as quais a tubulação começa a vibrar com amplitudes crescentes, isto é, passa a ter um comportamento instável (10). A velocidade crítica depende da distância entre os suportes, da flexibilidade do tubo e da massa fluido + tubo. Em geral este tipo de fenômeno pode ser evitado com uma locação de suporte conveniente. É interessante observar que a flutuação da velocidade de escoamento agrava o fenômeno de instabilidade. O caso de tubulações com uma extremidade livre é o mais crítico, podendo ocorrer para velocidades de escoamento acima de crítica o chicoteamento da tubulação.

## 3. ANÁLISE DE VIBRAÇÕES

3.1 A análise de tubulações para resistir a solicitações dinâmicas segue em geral duas grandes linhas. Uma mais tradicional e cada vez em menor uso, que se limita a afastar a frequência natural da tubulação da frequência dominante de excitação. Procura-se evitar deste modo que a ressonância introduza esforços e deslocamentos muito severos levando eventualmente ao colapso por fadiga. Esta técnica apesar de simples conduz a bons resultados sempre que a fonte excitadora tem frequência bem definida. Este é o caso por exemplo de excitações induzidas por motores ou bombas.

O segundo enfoque é usado quando a fonte de excitação não tem aquelas características, tendo um comportamento mais de caráter aleatório ou atuando como choque, já não se pode conduzir a análise apenas recorrendo às frequências naturais de tubulação. Em princípio podem ser utilizados três enfoques para o tratamento deste tipo de problemas:

- 1) Métodos estocásticos
- 2) Resposta no tempo
- 3) Métodos quase estáticos

Nos métodos estocásticos, admite-se que o fenômeno é estacionário e procura-se relacionar de densidade espectral de entrada - excitação - com a função de densidade espectral de resposta - tubulação -, obtendo-se daí informações importantes de natureza estatística, como o desvio padrão de variáveis relevantes - deslocamentos ou esforços - que nos

permitem avaliar as suas respectivas probabilidades de ocorrência.

Para casos bastante simples, este tipo de análise se aplica sem grandes dificuldades (11). No entanto quando se trata de sistemas com um grande número de graus de liberdade as dificuldades envolvidas são maiores e em geral não são utilizados nos casos de tubulações.

Os métodos de resposta no tempo são particularmente úteis quando se tem o registro da variação da intensidade de força excitadora contra o tempo. Nestes casos é possível se obter a resposta de estrutura através de técnicas de integração no tempo. Esta técnica tem sido cada vez mais empregada em virtude das facilidades computacionais que se desenvolveram recentemente, e vale a pena uma descrição sucinta do método.

Inicialmente a tubulação é discretizada em elementos de viga e massas concentradas nos nós (Ilustração 3.1-1). O modelo discretizado permite que se escreva o equilíbrio dinâmico para cada massa obtendo-se então um sistema de equações que tem a seguinte forma:

$$[M] \ddot{u} + [K] u = [F] \quad [1]$$

onde  $[M]$  e  $[K]$  são matrizes de massa e rigidez,  $u$  é o vetor de deslocamentos e  $[F]$  o vetor de forças externas. Conhecido  $[F]$  como função do tempo pode-se resolver a equação [1] ou utilizando técnicas de integração numérica diretamente sobre equação [1] ou transformando-a primeiro em um sistema mais simples, utilizando-se para isto os modos naturais de vibração. Posta na sua forma simplificada, o sistema [1] reduz-se a um sistema desacoplado de  $n$  equações e  $n$  incógnitas podendo cada uma delas ser resolvida independentemente através de técnicas relativamente simples. Em resumo o problema reduz-se a integrar:

$$m_k \ddot{v}_k + W_k^2 v_k = f_k(t) \quad [2] \quad k = 1, 2, n$$

onde  $W_k$  representa a frequência natural do sistema de ordem  $k$ . Pelo menos duas observações devem ser feitas para utilização deste método:

- a) A discretização da tubulação deve ser feita de tal modo que todas as frequências naturais significativas sejam abrangidas pelo modelo. Estas frequências naturais significativas estão relacionadas com o período de  $F(t)$ .
- b) Os programas disponíveis utilizam diferentes técnicas de integração no tempo e o intervalo de integração que é definido pelo usuário, pode ser



8.

crítico para a confiabilidade dos resultados.

Apesar da facilidade da formulação do modelo matemático e da disponibilidade de programas de computação, esta técnica é relativamente cara e sua utilização fica em geral restrita a problemas do tipo de transientes termohidráulicos que provocam excitação violenta na tubulação. Neste tipo de problemas faz-se em geral uma análise do escoamento considerando a tubulação como rígida e em seguida com os resultados obtidos em seções críticas como curvas e reduções faz-se a análise da tubulação. Atualmente começam a aparecer alguns estudos sobre a influência de flexibilidade da tubulação na obtenção dos esforços ocasionados pelos transientes termohidráulicos.

O terceiro enfoque para a análise de vibrações em tubulações faz uso do resultado anterior de um modo simplificado procurando obter apenas os esforços máximos que ocorrem ao longo do tempo sem a preocupação de determinar a sua história. Esta técnica é útil quando a excitação externa tem um caráter periódico do tipo aleatório. São os casos por exemplo de excitações induzidas pelo escoamento ou por efeitos sísmicos.

Vamos tomar o caso da excitação sísmica para ilustrar esta técnica. Conhecida a excitação nos suportes da tubulação pode-se determinar quais as acelerações máximas que elas causam sobre vários sistemas com um grau de liberdade com frequências diferentes. Obtem-se então um espectro de respostas conforme a Ilustração 3.1-2.

Se a tubulação estiver solicitada por uma excitação na direção x apenas, a resposta em termos de deslocamentos máximos, para cada modo pode ser obtida do seguinte modo:

$$U_{kx} = v_{kx} g_{kx} \frac{a_{kx}}{W_k^2}$$

$$U_{ky} = v_{ky} g_{kx} \frac{a_{kx}}{W_k^2}$$

$$U_{kz} = v_{kz} g_{kx} \frac{a_{kx}}{W_k^2}$$

onde  $g_{kx}$  é o fator de participação de massa, que depende apenas das características dinâmicas de tubulação,  $v_{kx}$  o modo de vibração associado à frequência  $W_k$  e  $a_{kx}$  a aceleração do espectro de

resposta correspondente à frequência  $W_k$ . Para se obter a aceleração máxima total proveniente de superposição dos vários modos usam-se diversos critérios. Um deles é a combinação da resposta para os vários modos com a soma dos quadrados. Isto é:

$$U_{x\max} = \left( \sum_{k=1}^n \delta_{kxx}^2 a_{kx}^2 \right)^{1/2};$$

$$U_{y\max} = \left( \sum_{k=1}^n \delta_{kyx}^2 a_{kx}^2 \right)^{1/2};$$

$$U_{k\max} = \left( \sum_{k=1}^n \delta_{kzx}^2 a_{kx}^2 \right)^{1/2}$$

$$\text{onde } \delta_{kij} = v_{ki} g_{kj} \frac{1}{W_k^2}$$

Quando se tem uma excitação nas três direções x, y e z, o método segue orientação semelhante. Teríamos por exemplo, combinando as respostas nas três direções:

$$U_{x\max} = \left( \sum_{k=1}^n \delta_{kxx}^2 a_{kx}^2 + \sum_{k=1}^n \delta_{kxy}^2 a_{ky}^2 + \sum_{k=1}^n \delta_{kxz}^2 a_{kx}^2 \right)^{1/2}$$

e expressões semelhantes para  $U_y$  e  $U_z$ .

Esta técnica é de uso corrente para excitações sísmicas e como veremos adiante pode ser adaptada para excitações originadas pelo escoamento interno.

Em termos de computação seu custo é bem inferior à resposta no tempo. Não existe integração no tempo, bastando determinar as frequências e modos naturais de vibração da tubulação.

As três técnicas de análise expostas acima podem ser utilizadas tanto a nível de projeto como a nível de verificação de tensões induzidas pelo escoamento.

Como já foi dito nos parágrafos 1 e 2 deste trabalho vários fatores provocam vibrações nas tubulações. Frequentemente uma previsão do comportamento da fonte de excitação é difícil para fins de projeto. As vibrações induzidas por escoamento caem dentro desta categoria.

Torna-se necessário portanto em algumas ocasiões, uma verificação do nível de vibrações de uma tubulação na fase de testes para se determinar se as tensões estão satisfatórias e abaixo do limite de duração exigido

10.

para evitar a rutura por fadiga. O problema a ser tratado parte agora de dados experimentais e a partir deles devem-se determinar algumas características das fontes excitadoras.

As técnicas para obtenção de dados experimentais e os equipamentos usados estão descritos na referência (12). Em geral o projetista dispõe essencialmente das seguintes informações:

- a) História no tempo dos deslocamentos, velocidades ou acelerações em certas seções.
- b) Função de densidade espectral, de resposta para acelerações, deslocamentos e velocidades para seções típicas de tubulação e os respectivos valores médios (RMS).

O problema central é gerar um tipo de solicitação dinâmica a partir dos dados experimentais que cobrem apenas alguns pontos característicos do sistema. Quando as funções de densidade espectral são regulares, e concentradas em faixas de frequência bem características (Ilustração 3.1-3(a)) pode-se eventualmente utilizar alguns métodos de análise aleatória para a determinação dessas características da fonte de excitação. Nestes casos admite-se em geral que a função de densidade espectral da fonte é uma constante para todas as faixas de frequência (ruído branco). Muitas vezes porém este não é o caso, sendo a função de densidade espectral muito irregular (Ilustração 3.1-3(b)).

Grandes flutuações da intensidade de pressão na linha, a excitação provocada por placas de orifício onde se localiza grandes perdas de carga - podem chegar a 800m da coluna d'água - são casos típicos. A solução precisa deste problema é muito complexa. Um método aproximado que vem apresentando resultados satisfatórios recorre a determinação de um espectro de resposta equivalente.

Seja a função de densidade espectral de deslocamento, por exemplo, para uma seção testada no campo dada pela (Ilustração 3.1-4).

Podemos dividir esta função em algumas faixas características de frequência, conforme mostra a Ilustração 3.1-4. Para cada faixa podemos calcular o valor médio (RMS) do deslocamento, e admitindo-se uma distribuição gaussiana com média zero, o valor máximo esperado dentro de uma probabilidade definida será:

$$\delta_{x_i \max} (a) = k \delta_{x_i} (a);$$

$\delta_{x_i} (a)$  é o valor médio para a faixa  $\Delta W_i$

Para  $k = 3$ , a probabilidade de ocorrência de deslocamento acima de  $\delta_{\max}$  é de 0,4%.

Admitindo-se que estes deslocamentos sejam provocados por um sismo equivalente; caracterizado por um espectro de resposta conforme mostra a Ilustração 3.1-5 podemos avaliar os deslocamentos máximos conforme vimos anteriormente:

$$\delta_{x_i \max}^2 = \sum \frac{\delta^2}{\Delta W_i} a_{kxx}^2 x_i^2 + \sum \frac{\delta^2}{\Delta W_i} a_{kxy}^2 y_i^2 + \sum \frac{\delta^2}{\Delta W_i} a_{kxz}^2 z_i^2$$

Tendo-se a função de densidade espectral para as outras duas direções procede-se de modo semelhante para obter:

$$\delta_{y_i \max}^2 = \sum \frac{\delta^2}{\Delta W_i} a_{kyx}^2 x_i^2 + \sum \frac{\delta^2}{\Delta W_i} a_{kyy}^2 y_i^2 + \sum \frac{\delta^2}{\Delta W_i} a_{kyz}^2 z_i^2$$

$$\delta_{z_i \max}^2 = \sum \frac{\delta^2}{\Delta W_i} a_{kzx}^2 x_i^2 + \sum \frac{\delta^2}{\Delta W_i} a_{kzy}^2 y_i^2 + \sum \frac{\delta^2}{\Delta W_i} a_{kzz}^2 z_i^2$$

Este sistema tem nove incógnitas  $a_{x_1}, a_{x_2}, \dots, a_{z_3}$  e nove equações 3 para cada faixa de frequência  $\Delta W_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ). Podemos então em princípio determinar os valores das acelerações do espectro de resposta equivalente.

Certamente esta é uma descrição sumária, que não cabe desenvolver dentro do escopo deste trabalho. Convém destacar que esta técnica é nova e necessita de desenvolvimento teórico mais elaborado. Entretanto os primeiros resultados mostraram que é um caminho possível para a determinação dos esforços em tubulações partindo de dados experimentais, sem um esforço computacional muito grande.

#### 4. CONCLUSÕES

A seriedade do problema de falhas em tubulações de usinas nucleares está amplamente registrada na literatura. Apesar desta literatura não indicar como consequência um grande impacto na disponibilidade da usina o impacto na sua segurança e na segurança de seus operadores é significativo.

Ao que tudo indica, muitas dessas falhas registradas são decorrentes de causas que não foram levadas em conta na fase de projeto. A razão disto é que não existe ainda uma metodologia e critérios estabelecidos em normas e padrões

12.

que permitam a definição e avaliação das fontes de excitação. Portanto é importante identificar-se ainda na fase de projeto as áreas críticas que deverão ser observadas na fase de testes e quando detectado o problema o mesmo deve ser criteriosamente analisado.

Os fatores abordados neste trabalho de uma maneira qualitativa deverão servir de ajuda ao projetista nesta tarefa.

Os métodos de análise descritos procuram orientar também o projetista na busca de ferramentas para resolver os problemas identificados.

13 de Dezembro de 1982

## Referências:

1. Scott, R.L. e Gallaher, R.B. - "Review of Safety - Related Events at Nuclear Power Plants in 1979", Nuclear Safety, Vol 20, nº 4, 1981;
2. MacCormack, K.E. e Gallaher, R.B. - "Review of Safety - Related Events at Nuclear Power Plants in 1980", Nuclear Safety, Vol. 23, nº 3, 1982.
3. Bush, S.H. - "Reliability of Piping in Light - Water Reactors", Nuclear Safety, Vol. 17, nº 5, 1976, pág. 568-579.
4. Basin, S.L. e Burns, E.T. - "Characteristics of Piping System Failures in Light Water Reactor", EPRI NP-438 Topical Report, 1977.
5. Coffman, J.T. e Bernstein, M.D. - "Failure of Safety Valves Due to Flow-Induced Vibration", Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 102, Fev. 1980, pág. 112-118.
6. Weaver, D.S. e Ziada, S. - "A Theoretical Model for Self-Excited Vibrations in Hydraulic Gates, Valves and Seals", Journal of Pressure Vessel Technology, Vol. 102, Fev. 1980, pág. 146-151.
7. Casto, W.R. - "Selected Safety - Related Occurrences Report in May and June 1977", Nuclear Safety, Vol. 18, nº 5, 1977, pág. 689-693.
8. Sowada, P. e Labert, D. - "Experience Combines with Theory to Counter Cavitation in Control Valves", Power, Vol. 120, nº 6, 1976, pág. 54-56.
9. Kern, R. - "How to Size Process Piping for Two-Phase Flow". Hydrocarbon Processing, Vol. 48, nº 10, 1969, pág. 105-116.
10. Galeão, A.C., Loula, A.F. e Bevilacqua, L. - "Dynamics of Beams Carrying Moving Loads", Proceedings of the III COBEN, Vol. D, 1975, pág. 881-894.
11. Lin, Y.K - "Probabilistic Theory of Structural Dynamics, " McGraw-Hill Book Co., 1967.
12. ANSI S2.10-1971, "Methods for Analysis and Presentation of Shock and Vibration Data", American National Standards Institute, 1971.

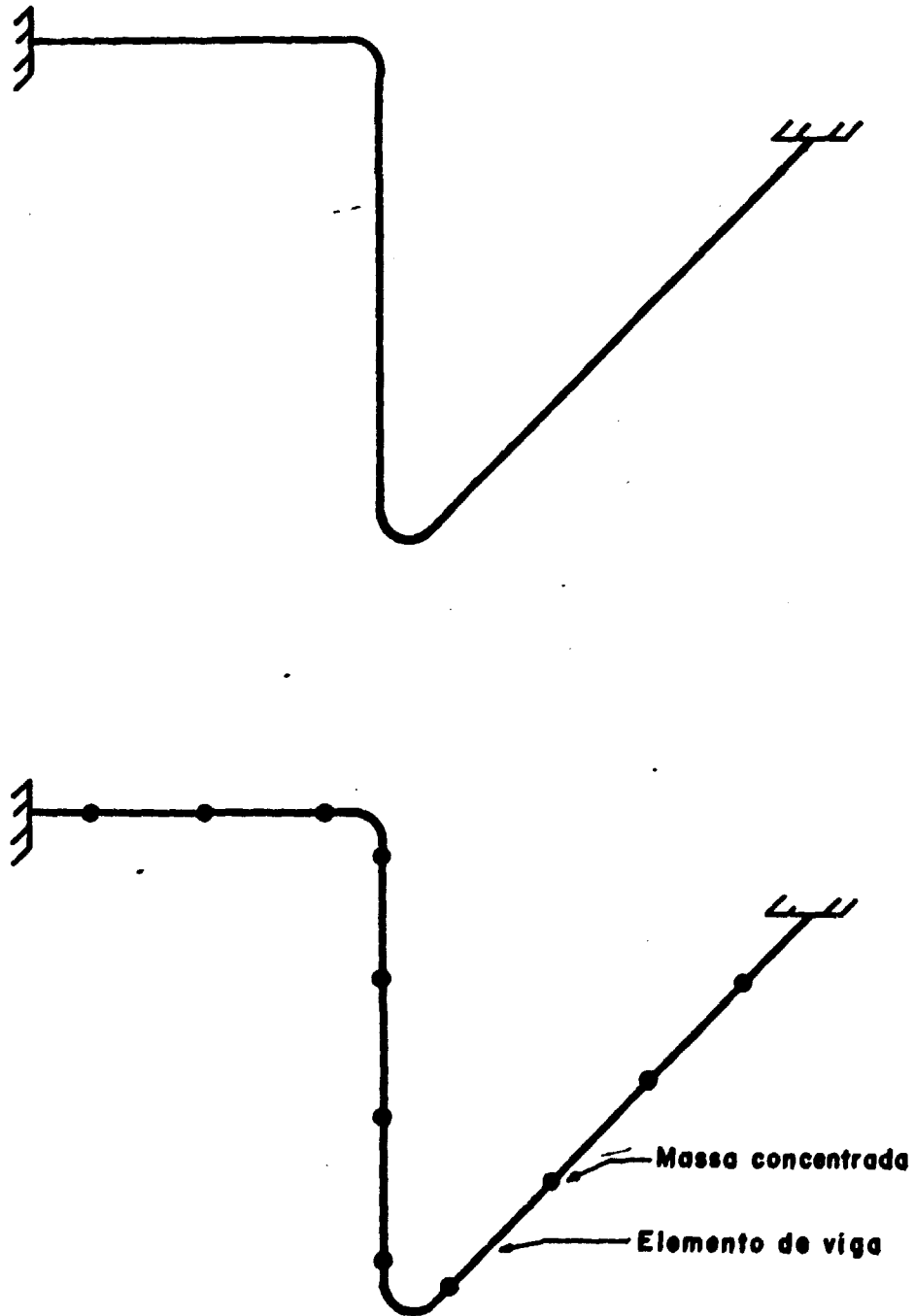


ILUSTRAÇÃO 3.1-1

DISCRETIZAÇÃO DE UMA TUBULAÇÃO

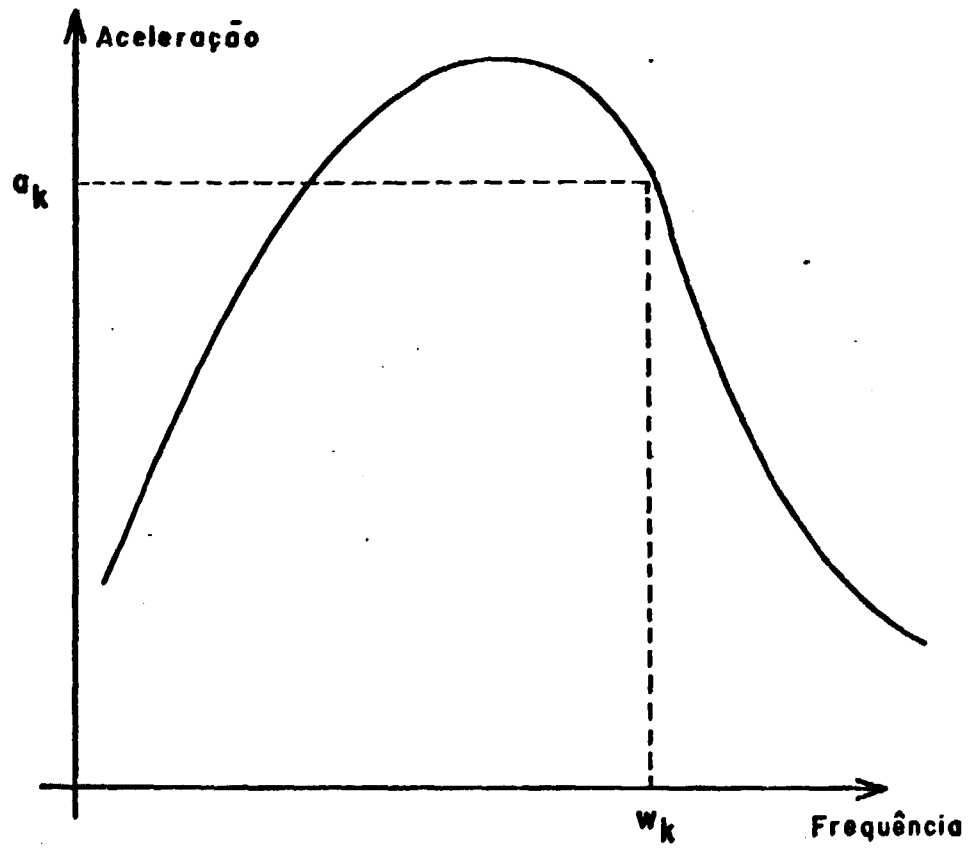
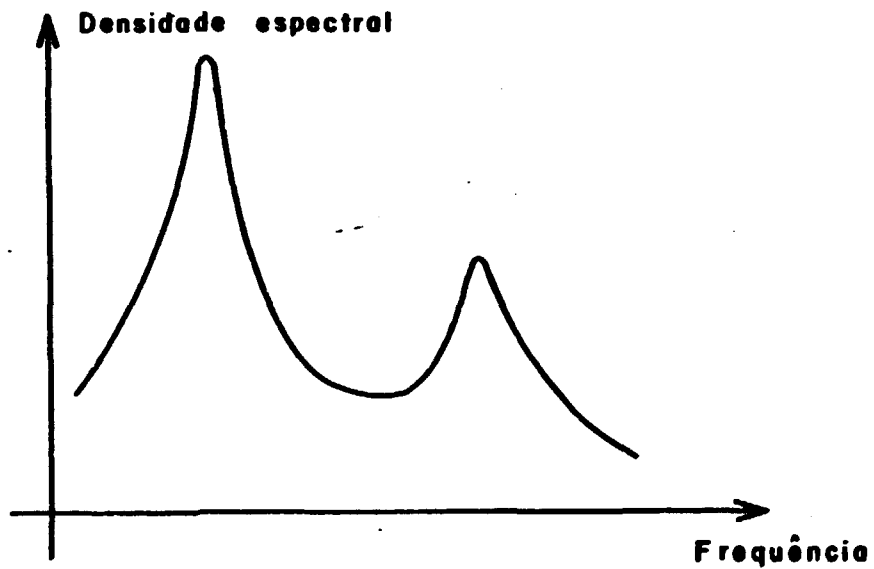


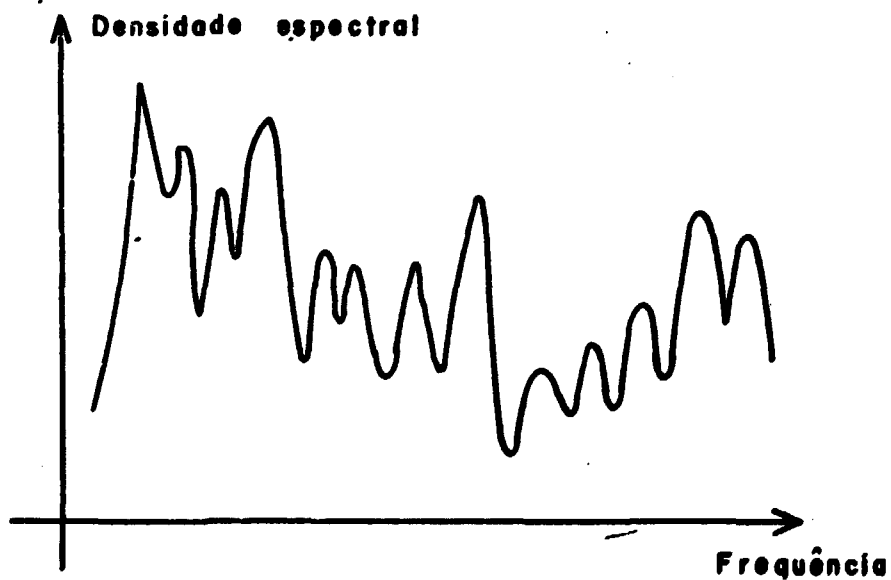
ILUSTRAÇÃO 3.1-2

ESPECTRO DE RESPOSTA TÍPICO





a-) Com frequências características



b-) Sem frequências características

ILUSTRAÇÃO 3.1-3

FUNÇÕES TÍPICAS DE DENSIDADE ESPECTRAL

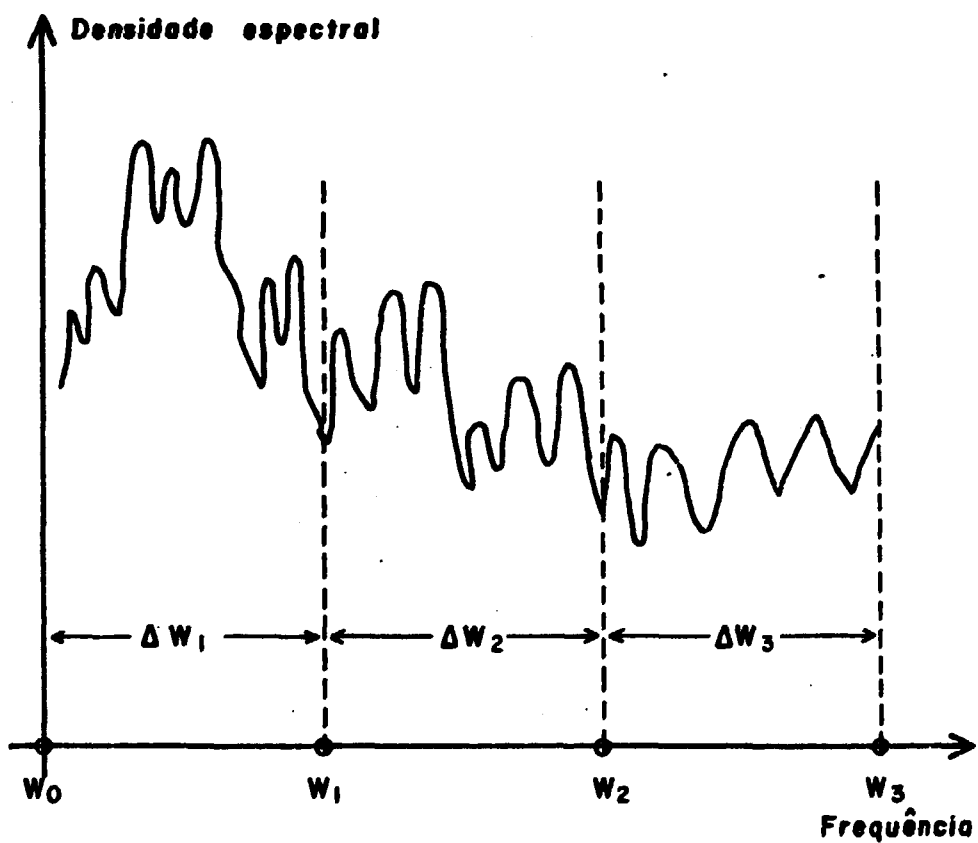


ILUSTRAÇÃO 3.1-4

DIVISÃO DA FUNÇÃO DE DENSIDADE ESPECTRAL  
EM SEGMENTOS

18.

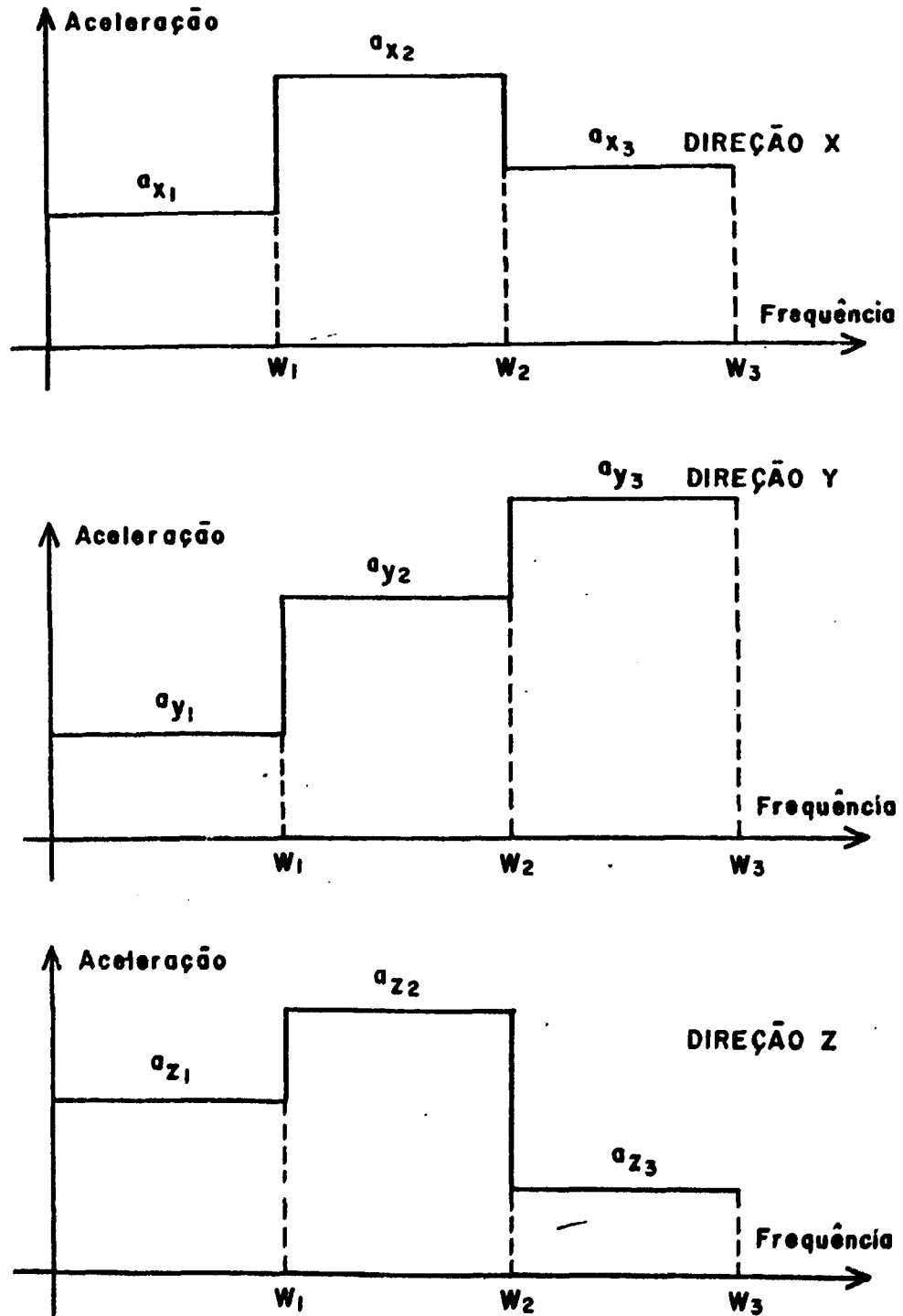


ILUSTRAÇÃO 3.1-5

ESPECTROS DE RESPOSTA GERADOS COM AS FUNÇÕES  
DE DENSIDADE ESPECTRAL