

2

Situação no assunto

2.1.

Aspectos Gerais

Os sistemas ditos secundários, tais como tubulações e equipamentos, são vitais para o funcionamento de instalações industriais sensíveis como as usinas term nucleares e, se um sinistro ocorrer, precisam operar de forma a garantir a segurança das pessoas envolvidas e das comunidades vizinhas possibilitando o desligamento seguro da usina.

Os sistemas secundários apresentam, normalmente, numerosos graus de liberdade e natureza e geometria variadas. A numerosidade, a complexidade e o grau de importância de tais sistemas determinam a utilização seletiva de diversos métodos de análise, entre eles alguns simplificados, sendo estes os que cobrem o maior número de análises. Tais simplificações produzem conservadorismos que oneram o custo da obra e elevam o número de suportes, congestionando o sistema e dificultando a execução, inspeção e manutenção destes. O projeto de sistemas secundários representa uma elevada parcela do já alto orçamento do projeto de usinas term nucleares.

2.2.

Métodos de análise

De maneira geral, no processo de definição do projeto sísmico para sistemas de estruturas de usinas term nucleares, podem-se ressaltar os dois pontos seguintes como seletivos do método de análise apropriado ao problema:

- Definição da excitação (sismo);
- Seleção do domínio e do método de análise.

2.2.1.

Definição da excitação sísmica

Um sismo é constituído por um conjunto de ondas de tensão que se originam em um ponto de liberação de energia ao longo da linha de encontro de placas tectônicas e ficam sujeitas, na sua trajetória, através das diferentes e complexas estratificações do solo, a inúmeras refrações e reflexões de caráter muito diverso. Esta variedade, aliada à escassez de registros, dificulta a determinação da excitação nos projetos sísmicos de estruturas civis. O carregamento sísmico pode ser determinado a partir de registros de terremotos ocorridos, ou de um tratamento estatístico destes, ou ainda gerado artificialmente por um processo estocástico compatibilizado com características de sismos reais.

Para efeito de projeto pode-se definir o sismo como um registro temporal da aceleração do terreno, da resposta potencial máxima de sistemas de um grau de liberdade ou do conteúdo da sua potência na frequência, isto é, um acelerograma, um espectro de resposta ou uma densidade espectral de potência.

A escolha da forma de definição do sismo está relacionada com o domínio, do tempo ou da frequência, onde se irá trabalhar e, também, com o método utilizado para análise. As análises, no tempo, por integração direta ou análise modal, são feitas tendo como entrada um ou mais acelerogramas; já as análises modais espectrais utilizam um espectro de resposta de projeto. As análises no domínio da frequência partem de uma transformada de Fourier do acelerograma para depois retornarem a resposta para o domínio do tempo; no caso de análise não determinística é usada, normalmente, uma densidade espectral de potência do sismo.

A seguir, os conceitos de espectros de resposta e de densidade espectral são apresentados de forma resumida e, para um maior aprofundamento recomenda-se

reportar a Clough (1993), Veletsos et al (1965), Newland (1978), Standard Review Plan (1989).

2.2.1.1. Espectros de Resposta

Descrevem a resposta máxima de um oscilador simples (S1GL), submetido a um sismo, como uma função da frequência natural e do amortecimento do S1GL (Figura 2.1); a resposta pode ser expressa em aceleração, velocidade ou deslocamento. Note-se que o S1GL de frequência natural infinita é rígido e sua aceleração espectral igual à máxima aceleração do solo.

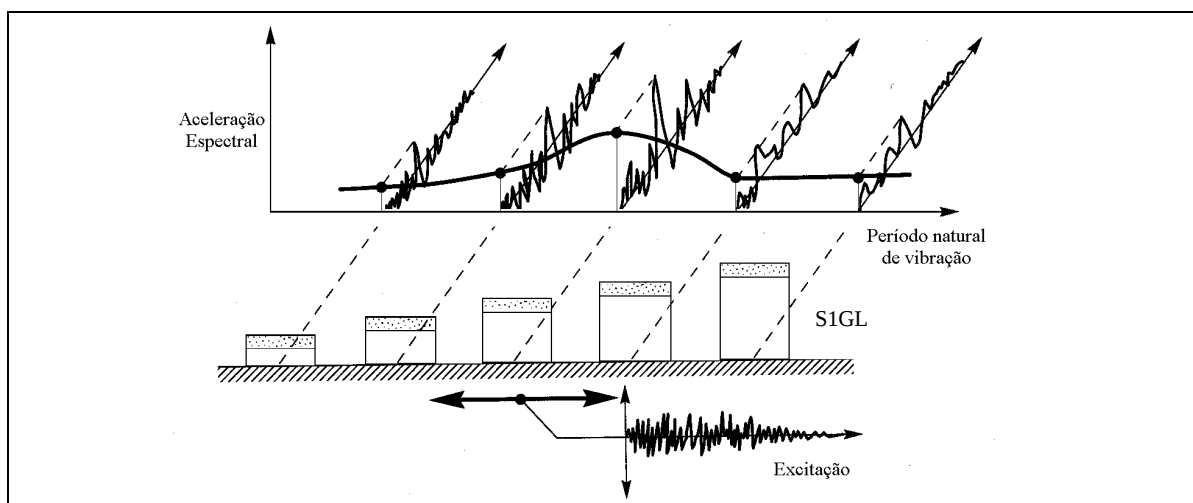


Figura 2.1 – Espectro de resposta. Acelerações espectrais são as amplitudes de aceleração máxima do S1GL em resposta à mesma excitação. (Kramer, 1996)

Uma forma conveniente de representar o espectro de resposta é através do chamado espectro de quatro escalas logarítmicas.

O deslocamento máximo do S1GL relativo à sua base é designado por U . O produto de U pela frequência circular natural é a chamada pseudo velocidade (V) do sistema. De maneira análoga, o produto $\omega \cdot V$ refere-se à pseudo aceleração (A), assim:

$$V = \omega \cdot U \quad (2.1)$$

$$A = \omega \cdot V = \omega^2 \cdot U \quad (2.2)$$

Em alguns casos, o deslocamento máximo pode ser mais convenientemente expresso indiretamente em termos de V ou A , do que diretamente, em termos de U . Ainda, as características do espectro de resposta podem ser mais bem aproximadas com o auxílio das três quantidades do que em termos de apenas uma delas (Veletsos, Newmark e Chelapati, 1965).

Aplicando-se o logaritmo nos dois lados da equação (2.1) tem-se: $\log(V) = \log(\omega) + \log(U)$, se U é constante e $\omega = 2\pi f$ então: $\log(V) = a + \log(f)$, onde a é uma constante, representa uma linha reta com inclinação de 45° . De maneira análoga trabalhando-se com a equação (2.2) chega-se a $\log(V) = a - \log(f)$ que representa uma reta com inclinação de -45°

Assim, no gráfico em escala logarítmica onde a ordenada representa a pseudovelocidade e a abscissa a frequência natural do sistema, as diagonais inclinadas a $+45$ graus representam valores constantes de U e as diagonais inclinadas a -45° , valores constantes de A , conforme esquematicamente representado na Figura 2.2.

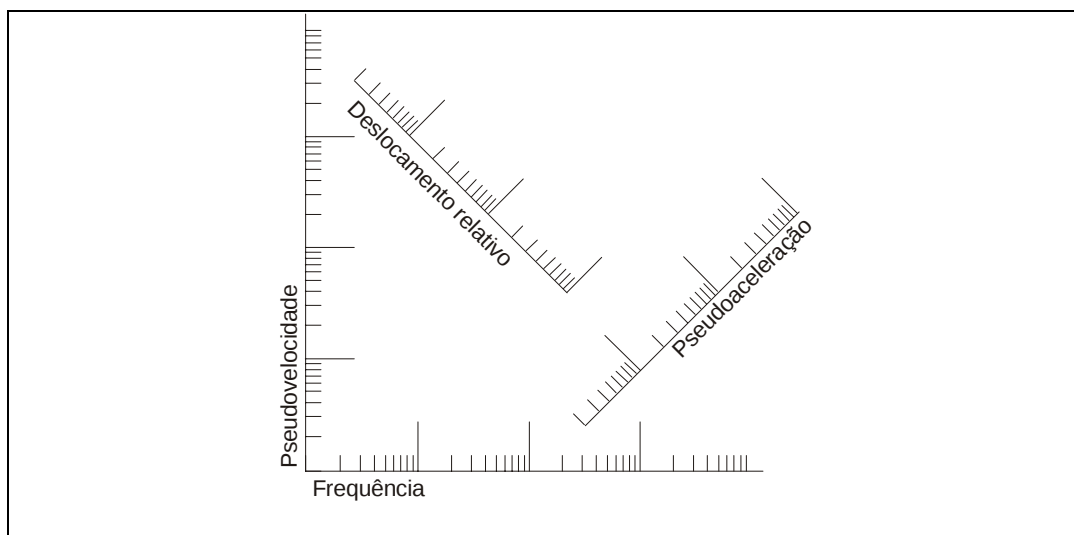


Figura 2.2 - – Representação de um Espectro de quatro escalas logarítmicas.

2.2.1.2.**Densidade Espectral de Potência**

Qualquer função amostra $x_r(t)$ tomada de um processo randômico estacionário tendo média zero, pode ser separada nas suas componentes de frequência usando a análise de Fourier. Se esta função é representada apenas sobre um intervalo finito de tempo, mas suficientemente longo, $-T/2 < t < +T/2$, a representação em séries de Fourier pode ser usada (Clough, 1993), assim:

$$x_r(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} X_{nr} \exp(i\omega_n t) \quad (2.3)$$

onde:

$$X_{nr} = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x_r(t) \exp(-i\omega_n t) dt \quad (2.4)$$

e onde $\omega_n = 2n\pi/T$. Se $x_r(t)$ é periódica, as Equações (2.3) e (2.4) são a exata representação da função total desde que o intervalo de integração T seja tomado como um período completo. Toda função periódica consiste de harmônicos discretos tendo frequência circulares $\omega, 2\omega, 3\omega, \dots$, e correspondentes amplitudes finitas $A_{1r} = 2|X_{1r}|$, $A_{2r} = 2|X_{2r}|$, $A_{3r} = 2|X_{3r}|$, ..., desde que, é claro, as componentes de frequência positiva e negativa sejam combinadas.

Usualmente, a quantidade de maior interesse, quando um processo randômico estacionário é analisado, é o valor da média dos quadrados de $x_r(t)$ sobre o intervalo $-T/2 < t < +T/2$, que é obtido substituindo-se a Equação (2.3) na relação:

$$[x_r^2(t)] = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x_r^2(t) dt \quad (2.5)$$

assim:

$$[x_r^2(t)] = \sum_{n=-\infty}^{\infty} |X_{nr}|^2 \quad (2.6)$$

Substituindo a Equação (2.4) em (2.6), tem-se:

$$[x_r^2(t)] = \sum_{n \rightarrow -\infty}^{\infty} \frac{\left| \int_{-T/2}^{T/2} x_r(t) \exp(-i\omega_n t) dt \right|^2}{2\pi T} \Delta\omega \quad (2.7)$$

onde, $\Delta\omega = 2\pi/T$ é o intervalo de frequências dos harmônicos discretos. Se, $T \rightarrow \infty$, $\Delta\omega \rightarrow d\omega$ e $\omega_n \rightarrow \omega$, a equação é convertida na forma:

$$[x_r^2(t)] = \int_{-\infty}^{\infty} \Phi_{x_r}(\omega) d\omega \quad (2.8)$$

onde a raiz quadrada desta expressão é o desvio padrão do processo aleatório e a função $\Phi_{x_r}(\omega)$,

$$\Phi_{x_r}(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\left| \int_{-T/2}^{T/2} x_r(t) \exp(-i\omega t) dt \right|^2}{2\pi T} \quad (2.9)$$

é definida como **Função Densidade Espectral de Potência** para a função $x_r(t)$ desde que o limite realmente exista. De acordo com a definição, a função densidade espectral de potência é uma função par quando $x_r(t)$ é uma função real, positiva e finita sobre a faixa de frequência $-\infty < \omega < \infty$

A densidade espectral do processo aleatório estacionário é obtida pela média simples da função densidade espectral das funções amostras pertencentes ao processo, como segue:

$$\Phi_x(\omega) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{r=1}^N \Phi_{x_r}(\omega) \quad (2.10)$$

2.2.1.3. Sismos artificiais

A escassez de registros de terremotos disponíveis, aliada ao caráter incerto que é intrínseco a um fenômeno natural, conduz a uma idealização dos sismos como amostras de processos estocásticos. Sendo assim, admite-se, em geral, que os acelerogramas são amostras integrantes de processos fracamente estacionários, ergódicos e de comportamento semelhante aos sismos reais.

Tanto a densidade espectral quanto o espectro de resposta de projeto são recursos que podem representar a sismicidade de uma região em termos de sua potencialidade de produzir efeitos mecânicos sensíveis nos sistemas estruturais, ou seja, estas representam um comportamento possível para um conjunto de sismos. Em vista disto, a geração de sismos artificiais é condicionada ao atendimento de um espectro de resposta de projeto e a uma densidade espectral mínima, recomendada para assegurar à excitação sísmica uma representativa dimensão da sua potência e de uma adequada distribuição ao longo da faixa de frequência de interesse do espectro de resposta de projeto (USNRC, 1989). Esta densidade espectral é chamada de Função Densidade Espectral de Potência Objetivo, $\Phi_{\ddot{v}_b \ddot{v}_b}^o$.

Todavia, tendo em vista a característica da densidade espectral de representar um espaço amostral composto por um número infinito de funções temporais (sismos), a ela pode ser atribuída a responsabilidade da representação da própria sismicidade da região à qual ela é vinculada.

2.2.2. Domínios e métodos de análise

2.2.2.1. Domínio do tempo X domínio da frequência

O comportamento do solo dependente da frequência e a conveniência com que devem ser expressos o amortecimento, a rigidez e a condição de contorno de radiação em termos de funções dependentes da frequência fazem da análise no domínio da frequência uma escolha natural para o estudo de problemas que envolvem propagação de ondas no solo. Sua maior restrição fica por conta da consideração das não linearidades. No entanto, a necessidade de inclusão do comportamento não linear e inelástico do solo já deixou de ser questionada pelos pesquisadores e passou a ser uma exigência básica dos modelos de interação solo-estrutura em vigor. Há também consenso em torno da conveniência de representar-se a não linearidade do solo através de curvas do módulo de

deformação e coeficiente de amortecimento dependentes do nível de deformação. Tal procedimento, conhecido como linearidade equivalente tem como principal vantagem sua simplicidade de utilização associada a bons resultados. O programa desenvolvido por Lysmer et al (1999), SASSI 2000, utiliza este procedimento. No entanto, permanece a questão do desempenho inelástico.

Além disso, a análise no domínio do tempo apresenta-se muito atraente por sua simplicidade, clareza dos aspectos físicos envolvidos e capacidade de trabalhar com não linearidades, embora haja dificuldades com relação aos possíveis erros numéricos provenientes da integração direta sobre um “registro de tempo” de um terremoto.

A necessidade de consideração de não linearidades na estrutura ou no solo tem um peso decisivo na escolha do domínio a ser utilizado na análise como mostrado na Tabela 1.1, principalmente se for considerada a relação de interação dinâmica entre cada um dos sistemas componentes (solo, sistema principal e sistema secundário) do conjunto de estruturas de uma instalação industrial, seja ela uma usina termonuclear ou não, sujeita a um carregamento sísmico.

Tabela 1.1 – Relação entre domínio de análise e regime do modelo (Wolf, 1993).

Estrutura	Solo	Domínio de análise
Linear	Linear	Frequência ou tempo
Linear	Não-linear Linear-equivalente	Tempo Frequência
Não-linear	Linear	Tempo
Não-linear	Não-linear	Tempo

2.2.2.2. Análise modal espectral

A definição da excitação segundo um espectro de resposta de projeto é uma forma sintética de representação que acenou, desde os primeiros tempos, para uma

análise envolvendo a discriminação modo a modo, para sistemas com muitos graus de liberdade, dos valores extremos das grandezas cinemáticas e dos esforços e tensões nos elementos.

A estrutura é decomposta em vários sistemas com um grau de liberdade (modos de vibração), e a cada um deles é atribuída a amplificação máxima prescrita no espectro de resposta (de projeto) para o oscilador simples com a frequência e o amortecimento correspondentes ao modo em consideração:

$$v_i = c_i \phi_i |FAI_i|_{\max} \quad (2.11)$$

v_i - contribuição máxima do modo i no deslocamento total, $v|_{\max}$

c_i - fator de participação do modo i

ϕ_i - modo de vibração com frequência ω_{0i}

$|FAI_i|_{\max}$ - fator de amplificação instantâneo i , máximo; ordenada do espectro de resposta (de projeto) para o oscilador simples, com frequência ω_{0i} e fator de amortecimento, ξ_i .

Em resumo, trata-se de uma análise modal na qual empregam-se $|FAI_i|_{\max}$ ao invés dos fatores de amplificação instantâneos.

Por isso, tal procedimento é designado por “Análise modal espectral” ou simplesmente “Análise espectral”. Os fatores de amplificação máximos concentram modo a modo, todo o efeito dinâmico do sismo sobre a estrutura, e podem ser obtidos quer no domínio do tempo ou da frequência.

Naturalmente, ao fazer-se a sobreposição das componentes modais, v_i , é perdido o faseamento real entre elas, podendo surgir efeitos de majoração ou redução da resposta máxima, em níveis indesejáveis.

O número destas componentes modais a serem incluídas e a maneira de combiná-las, incluindo as chamadas componentes de modos rígidos, têm sido

objeto de diversos estudos e conseqüentes atitudes de trabalho, reunidos em várias publicações (Gupta, AK, 1986; Joshi e Gupta, ID, 1998), mas não se incluem na tônica desta tese.

Um desenvolvimento, iniciado na década de 1960-69 (Veletsos et al, 1965), foi a introdução no $|FAI_i|_{\max}$ de efeitos decorrentes de aspectos não lineares e inelásticos da estrutura utilizando-se para tal um fator de redução de resistência do sistema, C , e um índice de ductilidade do sistema, μ .

$$v_y = C \cdot v_e|_{\max} \quad (2.12)$$

onde: v_y é o deslocamento no escoamento

$v_e|_{\max}$ é o deslocamento elástico máximo do sistema

C é um fator de redução aplicado sobre o deslocamento máximo

O índice de ductilidade do sistema é dado por:

$$\mu = \frac{v_m}{v_y} \quad \text{ou} \quad \mu' = \frac{v_m - v_y}{v_y} = \mu - 1 \quad (2.13)$$

onde: μ e μ' são medidas de ductilidade do sistema

v_m é o deslocamento total do sistema

2.3.

Análise modal espectral de sistemas secundários, suas razões e conseqüências.

A multiplicidade e a variabilidade dos sistemas secundários, comentadas em 2.1, sugerem uma abordagem seletiva destes sistemas agrupando-os em três conjuntos:

- um grupo de sistemas de extrema sensibilidade que requerem um tratamento dinâmico individualizado e com toda a sofisticação disponível;

- um outro conjunto de sistemas relativamente simples cujo projeto dinâmico pode ser baseado em procedimentos pseudo-estáticos.
- um terceiro grupo de sistemas, nem tão sensíveis nem tão simples, mas numeroso e, em consequência, oneroso, que recomenda recursos de análise apropriada, isto é, que propiciem um projeto compatível em termos de segurança e de custo.

Uma análise modal e espectral, por suas características de simplicidade e generalidade, atende aos reclamos deste terceiro grupo sobre o qual focaliza-se a atenção do presente desenvolvimento, no que se segue.

Assim, a análise espectral encontra, neste novo contexto, outras circunstâncias além das identificadas anteriormente:

- trata-se de um sistema secundário, SS, acoplado a outra estrutura, o sistema principal, SP, com o qual mantém uma reduzida relação de massa, normalmente não superior a 0,02; em consequência, a interação entre as propriedades dinâmicas é limitada, mas, por outro lado, o SP funciona como um filtro para a excitação, valorizando e projetando sobre o SS as componentes da excitação de frequências próximas às do SP;
- a interação entre os dois sistemas, presidida pela relação entre a frequência do sistema secundário, ω_{ss} , e a frequência, ω_{sp} , do SP, pode provocar sensíveis variações entre os espectros de resposta do sistema secundário, calculados de forma acoplada ou não ao SP (Asfura e Der Kiureghian, 1986 ; Gupta, A e Gupta, AK, 1995).
- os sistemas secundários apóiam-se, via de regra, em vários pontos (nós) do SP havendo, durante o movimento, deslocamentos relativos entre os pontos de apoio cuja influência deve ser considerada na produção do espectro [Gupta, AK, 1986; Gupta, A e Gupta, AK, 1995];

- os sistemas secundários são estruturas relativamente flexíveis e formadas por elementos de material dútil habilitando-os à dissipação de energia ao longo de fases não lineares e inelásticas do seu desempenho; tal verifica-se quer ao longo dos tubos, quer nas conexões e quer ainda nos pontos de apoio no SP, os chamados suportes (Slagis,1995; Endo e Murota, 1995).

2.3.1.

Movimento relativo dos suportes

O espectro de projeto é um só e é obtido da envoltória dos espectros para cada apoio do SS. É evidente que este procedimento deixa de lado qualquer consideração de deslocamento relativo entre suportes, pois cada espectro é gerado simplesmente a partir do movimento registrado no ponto de apoio do SS, e qualquer espectro produto deles tem as mesmas características. As regras de aproximação utilizadas para combinar os modos não são capazes de considerar as correlações cruzadas entre as várias excitações dos pontos de apoio.

Gupta, AK (1986), baseado em estudos anteriores, apresenta um método para avaliar a resposta de sistemas secundários levando em consideração os efeitos de interação e a correlação entre as respostas dos vários movimentos dos suportes. No entanto, na prática, uma fonte de dificuldade está no fato de que o modelo estrutural não é suficientemente detalhado para levar em consideração apropriadamente os movimentos dos suportes.

2.3.2.

Acoplamento dos sistemas

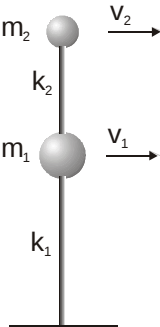
Um dos pontos que tem sido discutido e recebido contribuições a respeito das consequências do acoplamento dos sistemas que compõem a estrutura é a interação das propriedades dinâmicas dos sistemas principal (SP) e secundário (SS). Tal atitude, chamada de análise acoplada, se feita diretamente, apresenta dois inconvenientes: o aumento substancial do número de graus de liberdade – muitas vezes, o sistema secundário tem um número expressivamente maior de graus de liberdade que o principal – e o acoplamento de dois sistemas com

propriedades bem diferentes. Buscam-se, então, procedimentos que levem em conta os efeitos sem realizar um acoplamento formal.

Imagine-se que se está produzindo um espectro de resposta acoplada para um sistema secundário e se recorde que o sistema principal pode ser admitido constituído por uma série de sistemas com um grau de liberdade (configurações), cada um com frequência natural circular, $\omega_{sp} = \omega_{oi}$; assim sendo, para valores das frequências do sistema secundário, ω_{ss} , próximos das frequências naturais do sistema principal, o conjunto SP-SS funciona como um sistema com dois graus de liberdade, uma vez que a sua resposta é dominada pela parcela ressonante proveniente da interação entre as duas frequências próximas; lembre-se, complementarmente, que predominam na cinemática dos nós de apoio do SS no SP os harmônicos do sismo abrangidos pelo canhão¹ da função de transferência da excitação sísmica desde o seu ponto de controle, para os nós em foco.

Eis porque, a seguir, é feita uma avaliação da influência dos parâmetros individuais de rigidez e massa de dois sistemas de um grau de liberdade não amortecidos e acoplados. Esta avaliação é proposta por proporcionar a entrada na natureza do problema em questão.

Considerando a equação de equilíbrio para vibração livre do sistema com dois graus de liberdade não amortecido (Figura 2.3), tem-se:



$$[M]\ddot{v} + [K]v = 0 \quad (2.14)$$

onde: $[M] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix}$, $[K] = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix}$ e $\{v\} = \begin{Bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{Bmatrix}$

Figura 2.3– Sistema com dois graus de liberdade (S2GL)

¹ Região da função de transferência de intensa amplificação.

A solução harmônica da equação de movimento pode ser escrita como:

$$v_1 = V_1 \cos(\omega_0 t - \alpha) \quad (2.15)$$

$$v_2 = V_2 \cos(\omega_0 t - \alpha) \quad (2.16)$$

onde: V_1 e V_2 são amplitudes de deslocamento e ω_0 é a frequência circular do S2GL. Substituindo-se as expressões de v_1 e v_2 na equação de movimento, e sabendo-se que, para o sistema ter solução, o determinante da matriz dos coeficientes deve ser igual a zero, tem-se:

$$\omega_0^4 - \omega_0^2 \frac{k_2}{m_2} - \omega_0^2 \frac{k_1}{m_1} + \frac{k_1}{m_1} \frac{k_2}{m_2} - \omega_0^2 \frac{k_2}{m_2} \frac{m_2}{m_1} = 0 \quad (2.17)$$

Sendo ω_{sp} a frequência circular do sistema chamado principal (m_1, k_1), ω_{ss} a frequência circular do sistema chamado secundário (m_2, k_2), γ a relação entre as massas m_2 e m_1 e fazendo, ainda, $\eta = \frac{\omega_0}{\omega_{sp}}$ e $\beta = \frac{\omega_{ss}}{\omega_{sp}}$, então:

$$\omega_{sp}^2 = \frac{k_1}{m_1} \quad \omega_{ss}^2 = \frac{k_2}{m_2} \quad (2.18)$$

$$\eta^4 - (1 + (1 + \gamma)\beta^2)\eta^2 + \beta^2 = 0 \quad (2.19)$$

As duas raízes positivas desta equação estão graficamente representadas na Figura 2.4. Para valores de γ próximos de zero têm-se duas raízes positivas: $\eta = 1$ e $\eta = \beta$, ou seja, as duas frequências do S2GL assumem valores iguais à frequência do SP ou à do SS, sendo a frequência fundamental aquela que for menor.

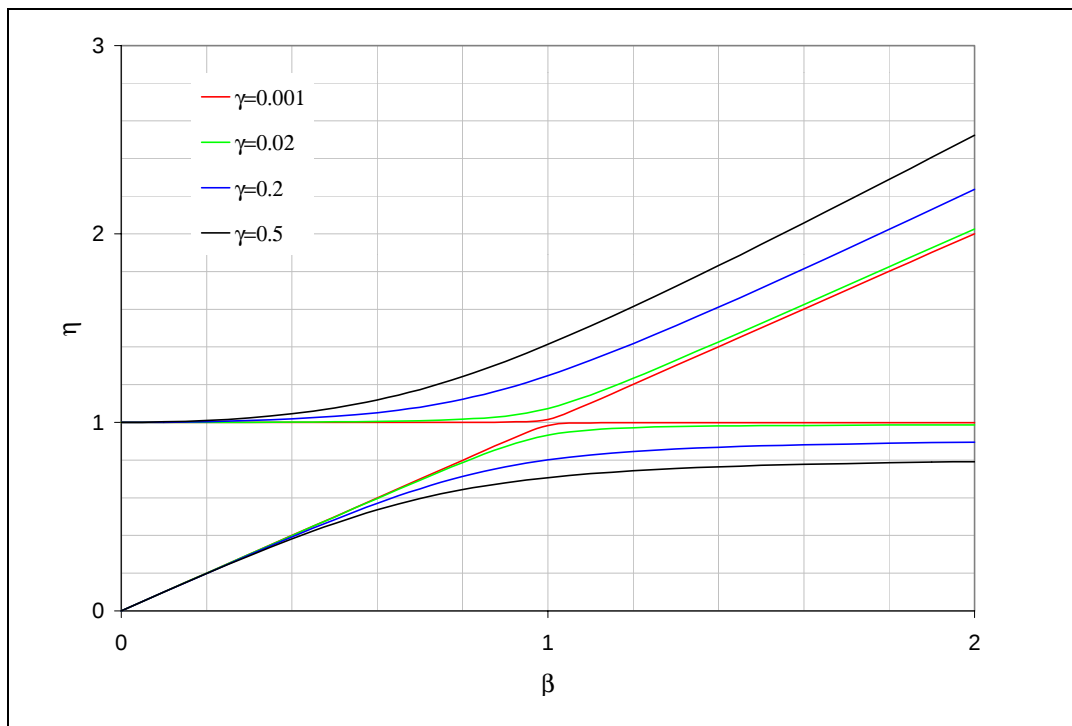


Figura 2.4– Primeiro e segundo modo do S2GL em função da frequência do sistema secundário, normalizado pela frequência do sistema principal.

Sendo $\gamma \neq 0$ identificam-se três regiões:

1ª região ($\beta \leq 0,2$) – neste caso, as massas m_1 e m_2 vibram como se fossem independentes, sendo as frequências do S2GL iguais ao caso de valores de γ próximos de zero.

2ª região ($0,2 < \beta \leq 1,2$) – interação de rigidezes e massas.

3ª região ($\beta > 1,2$) – preponderância da interação entre as massas m_1 e m_2 .

Desta maneira, a influência da interação entre as frequências do sistema principal com as do sistema secundário pode ser analisada por sucessivas aplicações dos gráficos da Figura 2.4 ao longo da faixa de interesse do sismo (0,2 Hz – 20 Hz).

Tal estudo pode concluir por diferenças sensíveis entre os espectros acoplados e desacoplados, como já mostrado, quer a favor da segurança quer no sentido inverso (Gupta, AK; 1986). O ponto não é o de se encontrar um recurso para

reduzir a demanda do sismo sobre a estrutura. O que se deve ter em mente é que um espectro de resposta acoplada é mais consistente com a análise em curso, seja no tempo ou na frequência, e como a sua implementação é relativamente simples, ainda que trabalhosa, o seu emprego deve ser recomendado.

O acoplamento entre os sistemas principal e secundário tem sido objeto de estudo de diversos trabalhos como o de Valverde (1998), Gastanaga (1998) e Sampaio (1999) realizados dentro de uma parceria entre a PUC-Rio e a ELETRONUCLEAR, que tem como objetivo a atualização do conhecimento da análise de estruturas de usinas nucleares brasileiras.

Valverde (1998) propõe espectros de resposta acoplados para o cálculo de SS onde um S1GL é acoplado ao sistema principal em vários pontos de apoio de forma a considerar o deslocamento relativo dos suportes e o acoplamento dos dois sistemas. A Figura 2.5 mostra esquematicamente este procedimento. Aplicando tal metodologia em um modelo de prédio de reator com o auxílio do programa Ansys e no domínio do tempo, ele verifica uma acentuada modificação nos picos de resposta em relação à análise desacoplada corrente. Segundo Valverde a metodologia é trabalhosa e exige esforço computacional extra para modelagem e análise, mas é uma rotina adequada para a extração de espectros de resposta para sistemas com comportamento não linear dos suportes cujos movimentos entre os mesmos estão fortemente correlacionados.

Sampaio (1999) aplica esta metodologia com o auxílio do programa SASSI, no domínio da frequência, aferindo os resultados obtidos no domínio do tempo, mas com esforço computacional reduzido à metade.

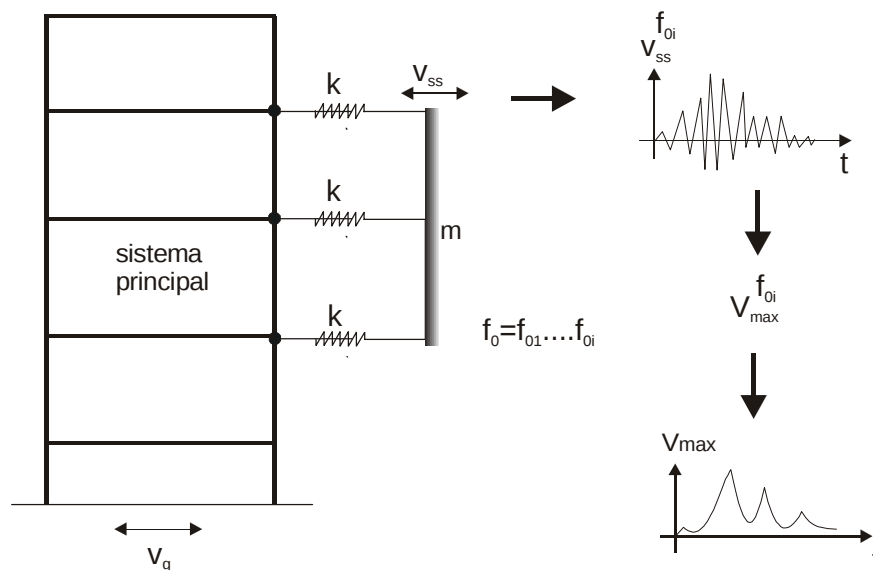


Figura 2.5—Procedimento esquemático para obtenção de espectros de resposta acoplada em vários pontos (Valverde, 1998).

2.3.3.

Espectros de resposta acoplada uniformemente provável

Em recente desenvolvimento na PUC-Rio, Diniz de Almeida (2002) propõe a adoção de espectros de resposta de projeto uniformemente prováveis. Tais espectros têm suas ordenadas representando uma barreira com igual probabilidade de não serem excedidas pela resposta de um S1GL excitado, em sua base, por um movimento do solo pertencente a um processo randômico estacionário representado por uma função densidade de espectro de potência.

Na metodologia utilizada, a formulação do problema de primeira ultrapassagem, proposto inicialmente por Vanmarcke (1975), é aplicada para calcular a função de probabilidade da resposta de um S1GL não exceder, por exemplo, um nível de espectro de resposta de projeto especificado. Esta formulação é baseada inteiramente nos momentos da função densidade de espectro de potência.

Estes mesmos procedimentos são aplicados na determinação de espectros de resposta uniformemente prováveis em sistemas principal e secundário acoplados. Isto é feito, aplicando o método de obtenção de espectros acoplados sugerido no

trabalho de Valverde (1998) modificado de tal forma a considerar o espectro uniformemente provável.

2.3.4. Consideração das não linearidades

Segundo Roesset (1998), em oposição aos edifícios regulares que são projetados com a suposição de que irão experimentar grandes deformações inelásticas sob terremotos severos, as estruturas de usinas nucleares são projetadas para permanecerem linearmente elásticas mesmo sob um terremoto SSE². Uma quantidade de comportamento inelástico é implicitamente admitida com a permissão de considerar valores de amortecimento maiores para o SSE do que para o DBE³, mas se supõe ser muito pequena. Ainda segundo Roesset, a avaliação dos efeitos das não linearidades é a área na qual menor progresso tem sido feito e na qual é necessária uma considerável quantidade de pesquisa.

As não linearidades podem ser geométricas ou físicas e têm origem diversa. Detendo-se no caso das tubulações, identificam-se comportamentos não lineares tanto nos apoios quanto ao longo dos elementos, especialmente nos trechos curvos por serem mais flexíveis que os trechos retos, e nas conexões.

As não linearidades físicas compreendem efeitos de duas naturezas, o escoamento, com a redução de rigidez resultante, implica em queda na frequência do sistema e a resposta resultante segue, naturalmente, o padrão de uma estrutura mais flexível. Dependendo da composição de frequências da excitação, ou do espectro de resposta, este deslocamento da frequência da estrutura pode representar uma redução ou uma amplificação da resposta máxima. A inelasticidade que se segue ao escoamento na fase de descarregamento e em sucessivos ciclos de histerese, produz dissipação de energia que se acumula, para o mesmo valor da resposta máxima. Se a estrutura possui ductilidade suficiente

² Sismo de desligamento seguro para o qual a usina é projetada de forma que, ocorrendo um terremoto a usina possa ser desligada com segurança.

³ Sismo de projeto que serve de base para o dimensionamento dos edifícios “Classe I” das usinas nucleares.

para tal comportamento, o resultado é uma redução no custo da estrutura mais flexível, isto é, mais leve. Daí o interesse em metodizar-se a consideração da ductilidade na metodologia de análise dos sistemas secundários.

Verifica-se que há um conjunto relativamente numeroso de sistemas secundários cuja análise mais conveniente é a modal espectral. Isto leva a uma expectativa de um espectro de resposta acoplada dútil de projeto para sismos.

Grande parte dos trabalhos publicados até hoje, a respeito da consideração de inelasticidade na análise de SS, segue duas tendências principais. Os que buscam a determinação de um fator redutor da resistência baseado na ductilidade do sistema e os que buscam avaliar diretamente os espectros de resposta inelásticos. A última opção é a que produz resultados mais exatos, no entanto, a aproximação que tem atraído maior atenção é a primeira.

Na primeira linha estão, por exemplo, os trabalhos de Vidic et al (1994), Fajfar e Novak (1995), Okeil et al (1995) e Okeil e Tung (1996).

Okeil e Tung (1996), utilizando o programa ANSYS, fazem um estudo paramétrico sobre um sistema idealizado com quatro trechos retos de tubulação de igual comprimento apoiados em molas de igual rigidez. Eles examinam parâmetros como a frequência natural do sistema, o nível da excitação e o nível de escoamento dos suportes. Além deste, um trecho de tubulação real é avaliado. Nos dois casos, os suportes são idealizados como elastoplásticos. Os autores concluem que se é permitido um certo nível de ductilidade no sistema, especialmente nos suportes, estes podem ser projetados para cargas muito menores se o sistema é flexível e propõem um fator redutor da carga do suporte que depende da frequência natural do sistema e da ductilidade.

Vidic et al (1994) e Fajfar e Vidic (1994), em dois artigos conjuntos, trabalham na determinação de espectros de resposta inelástica consistente. Entende-se por consistentes, espectros que estejam correlacionados e baseados nas mesmas hipóteses. São considerados apenas sistemas de um grau de liberdade e são variados: o movimento da base, a frequência natural, a ductilidade, o

comportamento histerético e o amortecimento dos sistemas. Ao final, os autores propõem uma expressão bilinear para um fator de redução da resistência, R , tal que:

$$F_y = \frac{mA_e}{R} \quad (2.22)$$

onde A_e é o valor nos espectros de pseudo aceleração elástica.

Este fator depende do nível de ductilidade, do comportamento histerético e do amortecimento. Tal expressão é uma aproximação feita com procedimentos de tentativa e erro e baseada nos resultados do estudo paramétrico. Fajfar e Novak (1995) estendem este estudo para sistemas desacoplados principal e secundário, de um grau de liberdade, considerando apenas o sistema principal inelástico.

Seguindo a proposta de determinação direta da resposta inelástica do SS, Aoki e Watanabe (2000) trabalham com uma barra de um vão engastado e livre com comportamento histerético bilinear do apoio sujeito a uma excitação harmônica; uma solução aproximada da resposta da viga é obtida. Singh et al (1996) estudam a amplificação do espectro de resposta de projeto devido ao escoamento do sistema principal. Lin e Mahin (1995) estudam o efeito do escoamento do sistema principal na cinemática da base do sistema secundário.

Adam e Fotiu (2000) aplicam uma técnica para avaliar o comportamento de um oscilador simples acoplado a um pórtico de quatro andares. Ambos com comportamento elastoplástico. Nesta técnica é considerado o acoplamento modal apenas nas frequências de sintonia, ou seja, quando o pórtico e o oscilador têm frequências naturais próximas.

Em geral, os trabalhos apontam para uma redução nos picos de resposta, no caso de sistemas sintonizados, devido à absorção da energia de vibração pelo comportamento inelástico. E, em alguns casos de SVGL, o pico de aceleração na região de baixos períodos é amplificado, ao invés de ser reduzido, devido aos efeitos dos modos altos. Além de modificar a amplitude da resposta, o escoamento

da estrutura também provoca alterações nas configurações modais e nas frequências naturais do sistema.

Considerando as não linearidades físicas, uma singular característica, observada no comportamento de trechos de tubulação quando submetidos a ensaios dinâmicos, é o acúmulo progressivo de deformação, ciclo a ciclo, induzido pela sobreposição de um carregamento primário, considerado constante, e um carregamento secundário cíclico. Este fenômeno conhecido como “ratchetting”, passa a ser designado de catraqueamento, termo usado em manobras mecânicas com catracas.

O catraqueamento pode ser classificado como mecânico, no caso de carregamento cíclico mecânico, ou térmico, quando o carregamento cíclico é devido a uma distribuição de temperatura. Causa deformação cíclica do material que pode resultar em “crescimento incremental cíclico da estrutura” (Burgreen, 1975), ou seja, a deformação se acumula na direção da tensão média com o acréscimo de números de ciclos.

De forma a ilustrar melhor o fenômeno, Chaboche e Nouailhas (1989) consideram um caso de teste uniaxial de tensão, tração e compressão. Para cada ciclo pode-se definir a deformação plástica à tração (ε^{pt}), a deformação plástica à compressão (ε^{pc}), a faixa de deformação plástica ($\Delta\varepsilon^p$) e a deformação plástica progressiva ($\delta\varepsilon^p$) como na Figura 2.6 , assim:

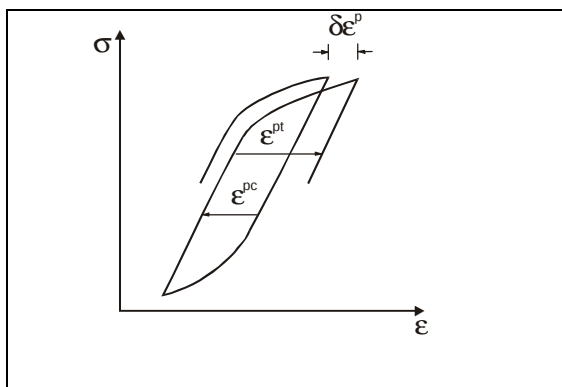


Figura 2.6 – Definição da faixa de deformação inelástica e da deformação por catraqueamento.

$$\Delta\varepsilon^p = \frac{1}{2}(\varepsilon^{pt} + \varepsilon^{pc}) \quad (2.22)$$

$$\delta\varepsilon^p = \varepsilon^{pt} - \varepsilon^{pc} \quad (2.23)$$

Sob condições uniaxiais, pode-se considerar a tensão média como o carregamento primário e tensão cíclica como secundário. Quando a tensão média tem um valor pequeno em relação ao nível de trabalho das tensões (Figura 2.7a), ou seja, baixo carregamento primário e alto secundário, a deformação plástica à tração e à compressão são da mesma ordem de grandeza e a deformação por catraqueamento é muito pequena ($\delta\epsilon^p \ll \Delta\epsilon^p$). Se, ao contrário, a tensão média é alta em relação ao nível de tensões e é positiva, então $\epsilon^{pt} \gg \epsilon^{pc}$ e, então, $\delta\epsilon^p > \Delta\epsilon^p$. No caso limite, (Figura 2.7b), quando a deformação plástica a compressão é nula, o catraqueamento é puramente um fluxo inelástico monotônico.

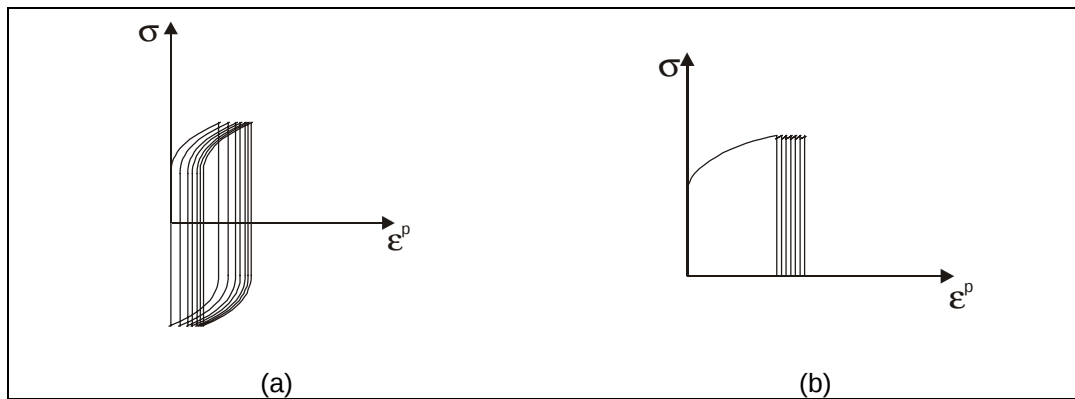


Figura 2.7 – a) Diagrama tensão deformação – baixa tensão média. b) Diagrama tensão deformação – caso limite ($\epsilon^{pc} = 0$).

É ainda chamada atenção para a necessidade de se distinguir, no catraqueamento, um período transiente e um assintótico. Na Figura 2.8 observa-se a evolução da deformação plástica com o número de ciclos de carregamento. Em uma fase inicial, há acréscimo de deformação plástica com o número de ciclos, período transiente, que pode se estabilizar resultando em um “shakedown” ou evoluir de forma assintótica. Este último é o que caracteriza o fenômeno de catraqueamento.

Assim sendo, o catraqueamento depende da relação entre a carga axial permanente considerada e o carregamento cíclico. Burgreen (1975), analisa um elemento de placa submetida à carga permanente de tração distribuída por unidade

de comprimento, P , e flexão cíclica com controle de deformao que produz tensões normais σ_b e determina, para este caso, os limites da relao entre as tensões relativas σ_p/σ_y e σ_b/σ_y , para os quais se verifica a ocorrência de catraqueamento, ou seja, determina estas relaes a partir da hipótese de que o acréscimo da deformao plástica após um ciclo completo de carregamento seja maior que zero. Com base em gráfico apresentado no mesmo trabalho,  proposto o diagrama da Figura 2.9 para entendimento geral dos limites de ocorrência do catraqueamento. Gráficos como este prestam-se a organizar planilhas de projeto com delimitao parametrizada de regiões a serem observadas para controle do catraqueamento.

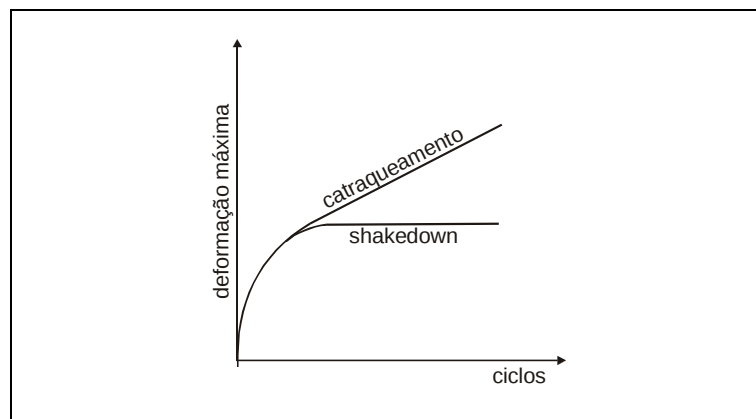


Figura 2.8 – Catraqueamento transiente e assintótico- esquema

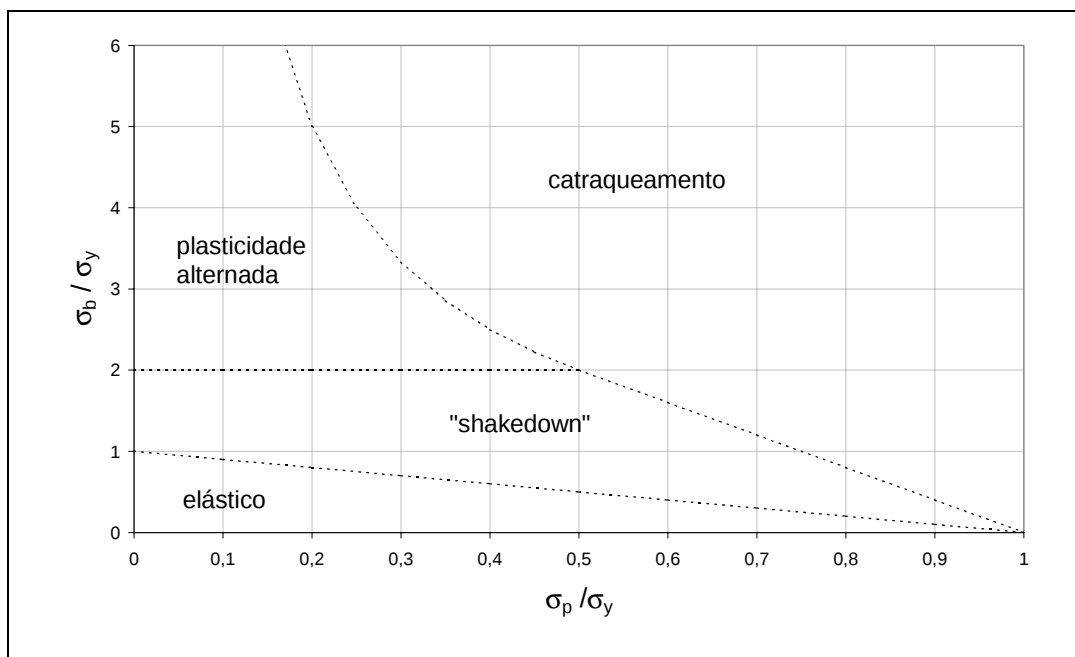


Figura 2.9 – Limites de comportamento do material para o caso de placa de comprimento unitário submetida a carga permanente de traço e carga cíclica de flexão.

O catraqueamento pode resultar em colapso por ruptura direta ou por fadiga de componentes. No entanto, não se sabe ainda o quanto o catraqueamento afeta a vida à fadiga do material. Há dificuldades em sua simulação de forma a concordar com os registros de experimentos em tubulações. Isto se deve, principalmente, à falta de um modelo constitutivo adequado. Diversos trabalhos apontam nesse sentido (Hassan e Matzen, 1998; Ohno, 1997 e 1998; Jiang e Sehitoglu, 1996).

Diante desta breve apresentação a respeito da consideração de não linearidades no sistema secundário cabe repetir o questionamento. Como é possível considerar a inelasticidade do SS, levando em conta a análise espectral, o acoplamento dos sistemas principal e secundário, o movimento relativo dos suportes e ainda, o compromisso probabilístico entre as ordenadas do espectro?

Ou de uma outra forma: Como é possível conjugar as potencialidades dos itens 1.2.1 a 1.2.4 em um espectro de resposta não-linear acoplada uniformemente provável?