



7º SIMPÓSIO BRASILEIRO
SOBRE TUBULAÇÕES E VASOS DE PRESSÃO

7TH BRAZILIAN SYMPOSIUM ON PIPING AND PRESSURE VESSELS

FLORIANÓPOLIS, 07 - 09 DE OUTUBRO DE 1992

TRABALHO Nº



PP. 419-428

**ANÁLISE DINÂMICA DOS INTERNOS DE UM REATOR NUCLEAR PWR
UTILIZANDO SUPERELEMENTOS EM UM MODELO 3-D INTEGRADO-
PARTE 2: TESTES DINÂMICOS E ANÁLISE SÍSMICA**

Carlos Alexandre de Jesus Miranda

COPESP/CNEN-IPEN/SP

SUMÁRIO

Inicialmente são apresentados os resultados das análises de testes (cálculo de frequências próprias) dos superelementos isolados e do modelo completo. Uma vez certificada a adequacidade do modelo 3-D desenvolvido para análises dinâmicas foi realizada uma análise sísmica espectral das estruturas de suportação do núcleo de um reator PWR de pesquisas. Estes últimos resultados mostram que as estruturas podem ser consideradas rígidas a sismo, mesmo quando em conjunto e que não haverá impactos entre as mesmas durante o sismo OBE.

SUMMARY

Initially the results of the test analyses (frequencies) for the isolated superelements and for the developed 3-D model of the internals core support structures of a PWR research reactor are presented. Once certified of the model goodness for this type of analysis the seismic spectral analysis was performed. From the results can be seen that the structures are rigid for this load, isolated or together with the other in the 3-D model, and there are no impacts among them during the earthquake (OBE).

1. Introdução

Na parte 1 deste trabalho [1] foi apresentada a descrição do modelo integrado 3-D, desenvolvido para as análises dinâmicas das estruturas internas de suportaçõ do núcleo de um reator PWR de pesquisa, com os superelementos, principais hipóteses para sua geração e condições de contorno. Também foram apresentados os testes de validação do mesmo para análises estáticas. No conjunto modelado existem folgas onde podem ocorrer impactos entre as estruturas dependendo do nível de excitação e do grau de amplificação dos esforços devido as relações entre as frequências das estruturas e da excitação. No caso de ocorrerem tais impactos o nível de amplificação será significativamente maior e a análise será não-linear.

No presente trabalho são apresentados, inicialmente, os resultados obtidos com as rodadas de testes dinâmicos do modelo 3-D desenvolvido (e a metodologia adotada para a realização das mesmas) e, em seguida, os resultados da análise sísmica das referidas estruturas modeladas, a partir dos espectros de resposta em termos de aceleração associados com o sismo OBE.

Com o modelo desenvolvido, adotando-se um cuidadoso procedimento para a inclusão de cada superelemento (e dos elementos 'simples') no modelo 3-D completo, a fim de minimizar o seu wavefront, a análise espectral consumiu cerca de 6:00h de CPU, usando-se um computador DEC VAX compatível modelo 785.

Neste trabalho se usa indistintamente as expressões "modo", "modo da estrutura" e "modo de vibrar da estrutura" como sinônimos. Idem quanto a "folga" e "gap" ou "elemento de gap". Dependendo da frase se fará referência a folga existente entre partes estruturais ou gap ou, então, se fará referência aos elementos de GAP utilizados para representar as folgas ou os contatos (folgas inicialmente nulas). Idem quanto a "espectro de resposta" e simplesmente "espectro".

2. Descrição Geral

A modelagem dos Internos foi desenvolvida com o intuito de evitar simplificações as quais necessitariam de um programa experimental longo e custoso para validar as hipóteses feitas. Além da sua complexidade e tamanho o modelo desenvolvido tem, em evidência, o uso extensivo de superelementos (STIF50, do programa ANSYS [2], discretizados principalmente com elementos de casca fina e elementos de viga 3-D) e elementos de Gap 3-D (STIF52, no caso de serem necessárias análises não-lineares). Na figura 1 apresenta-se o conjunto (esquema) das estruturas modeladas, e os

seus principais vínculos e posições relativas. Maiores detalhes do modelo são apresentados em [1].

O Vaso de Pressão do Reator (VPR) será considerado rígido para efeito destas análises.

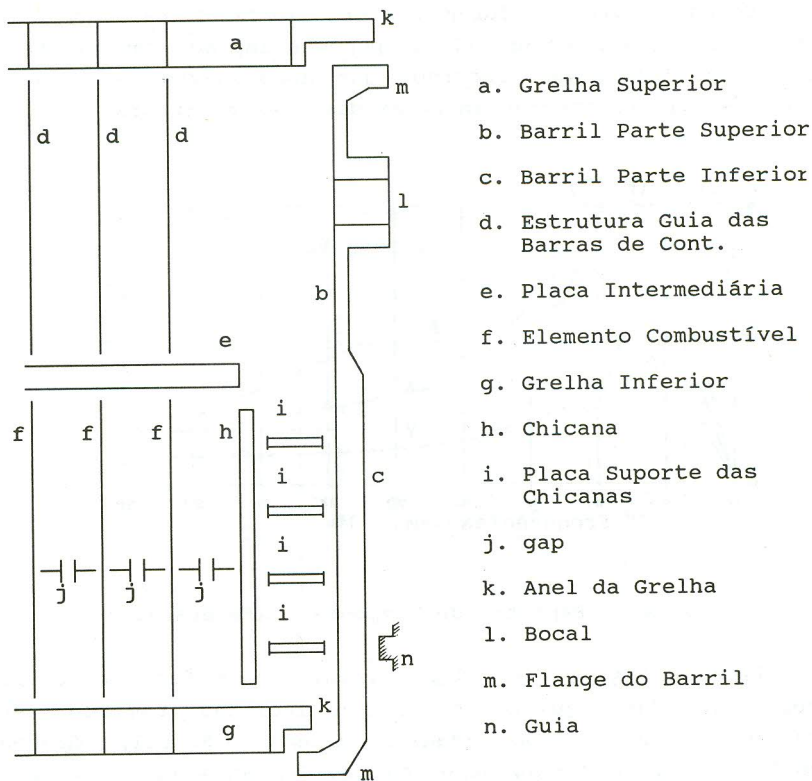


Figura 1: Posições Relativas dos Internos

3. Carregamentos

O carregamento sísmico a ser aplicado ao modelo consiste nos espectros de resposta, em termos de aceleração, nas direções X, Y e Z, apresentados na figura 2, definidos em 3 load-steps (um para cada direção). Os resultados associados aos modos de vibrar significativos de cada load-step, e dos load-steps entre si, foram combinados com o método SRSS (Raiz Quadrada da Soma dos Quadrados). As condições de contorno estão definidas em [1].

4. Análise de Testes (Frequências)

Os testes dinâmicos consistiram no cálculo das frequências próprias de superelementos isolados e do modelo 3-D completo com graus de liberdade (GdL) masters definidos apenas na direção vertical ou apenas em uma direção transversal (X) da estrutura/modelo. Estes resultados foram posteriormente comparados com os resultados das análises de cada componente isolado com hipóteses, quanto às condições de contorno, que aproximavam as condições reais de vínculo existentes entre as diversas estruturas.

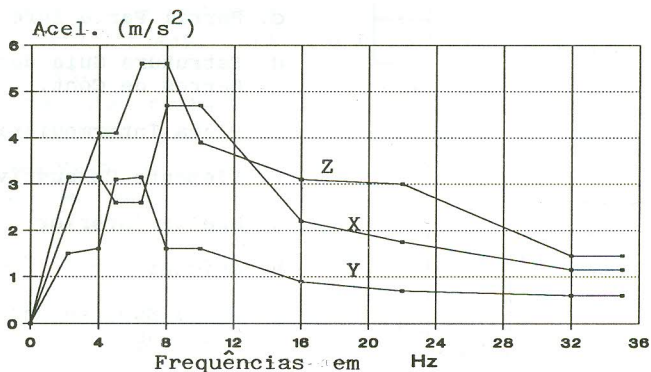


Figura 2: Espectro de Resposta - Aceleração

Análises Dinâmicas Isoladas - Inicialmente foram calculadas as frequências das seguintes estruturas isoladas, sem considerar a influência do fluido ("added mass"): Barril, Elemento Combustível (E.C.), Chapas Suportes das Chicanas (CSC), Chicanas tipos 1 and 2 e Estruturas-Guia das Barras de Controle. AS outras estruturas foram consideradas muito mais rígidas que estas.

As condições de contorno aplicadas simulam as conexões existentes, incluindo a contribuição de massa das estruturas que são suportadas por outras. Na análise do Barril considerou-se apenas seu suporte superior e 2 modelos axisimétricos harmônicos: (1) com elementos de casca de 2 nós considerando "added mass" e (2) com elementos sólidos de 4 nós modelando, também, o fluido. Estas análises estão apresentadas em [4]. Para as Estruturas-Guia foram consideradas 2 hipóteses para a sua extremidade inferior: a) só deslocamento vertical livre and b) deslocamentos livres e rotações impedidas. Os resultados são apresentados na tabela 1.

Conclusão Parcial. A primeira frequência das C.S.C. Tipo 2 é

um modo transversal inferior a 33 Hz mas próximo deste valor limite (para sismo). Portanto pode ser considerada rígida a esta excitação porque o modelo adotado no cálculo é mais flexível que a estrutura real (o mesmo se aplica as C.S.C. Tipo 1). Para o E.C. a frequência de 5.84 Hz é associada com as molas no seu topo [1]. Uma vez que a sua primeira frequência real (27.2 Hz - flexão) está abaixo de 33 Hz, será feita uma análise sísmica simplificada (considerando-o isolado). As demais estruturas isoladamente são rígidas ao sismo (primeiras frequências superiores a 33. Hz).

Tabela 1: Primeiras Frequências das Estrut. Internas Isoladas (Testes) - em Hz

| Super-Elemento | modo / frequências (Hz) | | | | | OBS. |
|----------------|-------------------------|------|------|------|------|----------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| BARRIL | 35.1 | 55.6 | 100. | 124. | 139. | modelo 1 |
| | 32.7 | 69.9 | 126. | 154. | 180. | modelo 2 |
| Est.-Guia | 75.2 | 75.2 | --- | --- | --- | cond. a |
| | 186. | 186. | --- | --- | --- | cond. b |
| CHICANAS | 210. | 230. | 312. | 331. | 399. | Tipo 1 |
| | 209. | 229. | 402. | 546. | --- | Tipo 2 |
| C.S.C. | 81.0 | 298. | 329. | 503. | 586. | Tipo 1 |
| | 29.8 | 490. | 826. | 836. | 1321 | Tipo 2 |
| E.C. | 5.84 | 27.2 | 27.2 | 50.2 | 50.2 | --- |

Análise Espectral do Elemento Combustível Isolado - Como o E.C. apresentou frequências transversais abaixo de 33. Hz utilizou-se o mesmo modelo isolado para uma análise sísmica simplificada utilizando-se os espectros da figura 2 para as direções X (horizontal) e Z (vertical).

.Excitação em X: Os primeiros 2 modos transversais tem associado, respectivamente, 36% e 43% da massa total do E.C.. Considerando a excitação aplicada os deslocamentos modais máximos são 0.0236mm and 0.0280mm respectivamente. Estes são os modos mais significativos. A tabela 2 apresenta os resultados da combinação SRSS para os 5 primeiros modos significativos.

.Excitação em Z: Como esperado neste caso o primeiro modo (5.84 Hz) 'captura' toda a massa do E.C. O deslocamento máximo Z é 4.14mm. Isto porque, na direção Z, nesta análise, o E.C. está

conectado somente na parte superior pela sua mola. A máxima força de reação é 1240 N. A aceleração espectral associada é 5.5 m/s^2 .

Tabela 2: Resultados da Análise do E.C. (espectro X de acelerações)

| modo | f (Hz) | acel | $R_{x,i}$ | $R^2_{x,i}$ | $R_{y,i}$ | $R^2_{y,i}$ |
|----------------------|--------|------|-----------|-------------|-----------|-------------|
| 2 | 27.2 | 1.21 | 90.8 | 8253 | -99.1 | 9823 |
| 3 | 27.2 | 1.21 | 108.1 | 11694 | 99.1 | 9823 |
| 7 | 82.5 | 1.17 | -17.8 | 318 | 2.8 | 8 |
| 11 | 122.9 | 1.17 | -8.3 | 70 | -0.2 | 0 |
| 13 | 186.8 | 1.17 | 23.3 | 544 | 0.3 | 0.1 |
| SQRT(soma de R^2) | | | | 144.5 N | | 140.2 N |

A hipótese de se considerar os E.C. conectados verticalmente a grelha inferior os tornará mais rígidos axialmente sem alterar o seu comportamento transversal. A influência sobre a Grelha Inf. se dará por meio de: 1) redução da sua primeira frequência, porém sempre maior do que 33 Hz, e 2) na avaliação dos esforços verticais sobre a mesma se deverá levar em conta a massa dos E.Cs.

Análises Dinâmicas com Modelo 3-D Completo. As frequências foram calculadas, para o modelo 3-D completo, em 2 análises de testes definindo-se, em cada uma, 120 graus de liberdade (GdL) "masters" (em 120 nós) apenas na direção Z e depois apenas na direção X. Não foram definidos GdL "masters" na Pl. Intermediária, nas Chicanas e nas C.S.C. Utilizou-se o método de Householder para extrair os modos associados com os 120 GdL "masters" (definidos sempre nos mesmos nós). Alguns dos resultados (frequências) são apresentados na tabela 3.

Conclusão Parcial. Os resultados mostraram ótima concordância com o que era esperado. Algumas frequências estão próximas ou repetem os valores da tabela 1. Alguns modos apresentam multiplicidade 21, como: (a) o modo associado com a mola do E.C. (5.84 Hz); (b) os 2 primeiros modos do E.C. (21 modos entre 26. Hz e 33. Hz e outros 21 modos em torno de 74Hz, respectivamente o 1º e o 2º modo de flexão de um E.C. isolado; (c) os modos do E.C. na direção Z (846. Hz) e (d) o 1º modo de flexão da Estrutura-Guia das Barras de Controle (21 modos entre 200. Hz e 330. Hz).

Tabela 3: Análises de testes do modelo 3-D. Frequências (Hz)
 Obs.: a simbologia A:B indica faixa de valores

| modo | freq. | Observ. | modo | freq. | Observ. |
|-------------------------|----------|------------|-------------------------|-------|---------|
| 1 : 21 | 5.84 | Molas E.C. | 1 | 26 | E.C. |
| 25: 26 | 104: 123 | GR. SUP. | 2 : 21 | 32.6 | E.C. |
| 27 | 132. | GR. INF. | 22 | 40.6 | E.C. |
| 28: 30 | 211: 275 | GR. SUP. | 24 : 44 | 74. | E.C. |
| 31: 33 | 288: 319 | GR. SUP. | 46 | 151. | BARRIL |
| 35 | 332. | GR. SUP. | 47 : 48 | 202. | E. GUIA |
| 37: 38 | 361: 381 | GR. SUP. | 50 : 52 | 256. | E. GUIA |
| 61: 81 | 846. | E.C. | 53 : | 300. | E. GUIA |
| | | | 55 : 60 | 300. | E. GUIA |
| GdL Masters apenas em Z | | | GdL Masters apenas em X | | |

Portanto, excluindo os Elem. Combustíveis e sem considerar o efeito do fluido ("added mass") os internos podem ser considerados rígidos a excitação sísmica. Entretanto a análise dinâmica sísmica (espectral) foi realizada para se determinar o comportamento desta estruturas, quando em conjunto, e sob excitação múltipla, verificando se as mesmas permanecem lineares (sem impactos) sob este carregamento sísmico.

5. Análise Sísmica Espectral com o Modelo 3-D Completo

Uma vez certificado o bom comportamento geral do modelo desenvolvido os espectros de resposta, em termos de acelerações, fig. 2, foi aplicado, em 3 load-steps (sem gaps). O programa utiliza interpolação logarítmica entre valores de frequência fornecidos (e os correspondentes valores de acelerações, no caso de espectro de acelerações, como usado nesta análise). Para valores de frequência acima dos valores fornecidos o programa trabalha com valor constante igual ao último valor de aceleração fornecido.

Foram definidos 360 GdL nos mesmos 120 nós já utilizados durante os testes mas, agora, com os deslocamentos X, Y e Z como GdL "masters". O método de iterações por Subspaços foi utilizado para extrair os 120 primeiros modos. Os GdL "masters" definidos 'capturam' cerca de 90% da massa total do modelo.

Os resultados modais, em cada load-step, e entre load-steps, foram combinados com o método SRSS ("Square Root of the Sum of

the Squares"). Este procedimento foi adotado, antes da fase de expansão dos resultados para cada superelemento, a fim de se verificar se os deslocamentos máximos X e Y, nas posições dos gaps, são maiores ou menores do que as folgas existentes.

Algumas das frequências são apresentadas na tabela 4. Os modos mais significativos são apresentados na tabela 5, com a respectiva fração de massa associada. Os deslocamentos máximos em X, Y e Z são apresentados na tabela 6.

Tabela 4: Frequências do Modelo 3-D (Hz)

| | | | | | | |
|-------|---------|-------|----------|-------|-----------|------|
| modos | 1 to 21 | 22:23 | 24 to 63 | 64:65 | 66 to 105 | 110 |
| freq. | 5.82 | 26.1 | 32.6 | 40.8 | 74.0 | 104. |

Tabela 5: Modos significativos em cada direção com a respectiva fração de massa.

| modo | fração de massa | modo | fração de massa | modo | fração de massa |
|-------------|-----------------|-------------|-----------------|-------------|-----------------|
| 22 | 59.2% | 23 | 57.2% | 1 | 28.7% |
| 65 | 25.9% | 66 | 24.5% | 110 | 32.9% |
| 106 | 3.5% | 107 | 3.5% | 112 | 38.3% |
| excitação X | | excitação Y | | excitação Z | |

Tabela 6: Deslocamentos Sísmicos Máximos (mm) em cada direção para cada load-step(*) - El. Comb.

| excitação/dir | X | Y | Z |
|---------------|--------|--------|-------|
| Espectro X | 0.084* | 0.002 | 0.010 |
| " Y | 0.001 | 0.045* | 0.004 |
| " Z | 0.005 | 0.005 | 4.36* |
| Comb. SRSS | 0.084* | 0.045* | 4.36* |

6. Conclusões

Os resultados obtidos com os testes dinâmicos, mostram que o modelo global (sem Gaps) apresenta um comportamento compatível com o esperado para as cargas aplicadas. As frequências calculadas ou reproduzem os valores esperados ou são muito

próximas dos mesmos. Alguns modos de vibrar do modelo apresentaram multiplicidade 21 como era esperado e os principais modos das estruturas isoladas são reproduzidos no modelo integrado ou são muito próximos daqueles. No caso de modos transversais os mesmos praticamente se repetem em X e Y conforme o esperado, uma vez que a estrutura, e de consequência o modelo, é praticamente simétrica em relação a dois planos verticais ortogonais contendo o eixo do VPR. Como conclusão tais testes mostraram que o modelo é confiável para a realização das análises dinâmicas propostas.

Da análise sísmica os deslocamentos encontrados mostram que não ocorrerão impactos entre Elem. Combust. e nem entre os Elem. Combust. e as Chicanas durante o sismo OBE (i.e.: os gaps permanecerão abertos já que os deslocamentos máximos são inferiores a metade das folgas existentes). Assim as estruturas modeladas, no seu conjunto, podem ser consideradas rígidas a sismo e a máxima aceleração estática equivalente a ser adotada para o seu dimensionamento (a sismo) pode ser o valor da aceleração ZPA (Zero Period Acceleration) dos espectros ou, conservativamente, o valor máximo da aceleração espectral (cerca de 0.5g, onde g é a aceleração da gravidade) para cada direção X, Y e Z.

A frequência abaixo de 33. Hz, associada com as molas no topo do Elem. Combust. é devida ao particular acoplamento adotado para o mesmo (com deslocamento vertical UZ livre na sua parte inferior, i. e.: desacoplado da grelha inferior, em lugar de gap nulo entre o mesmo e a grelha inferior). Mas pode ser mostrado, dos resultados, que o sismo é insuficiente para separá-lo da grelha inferior uma vez que a máxima força nas suas molas (1240. N) é inferior a força de pré-compressão das mesmas (3000. N).

Considerando o efeito do fluido como "added mass", utilizando resultados de bibliografia [5] com hipóteses aproximativas, as frequências das estruturas analisadas isoladamente se reduzem de modo significativo em alguns casos (Chapas Suportes, redução a 1/3, chicanas, redução a metade). Esta redução das frequências dos modos transversais não influencia os resultados e as conclusões a que se chegou após a análise sísmica. Porém pode levar a necessidade de análises localizadas nestas chapas suportes. Mas quanto as estas últimas (Ch. Suportes e Chicanas), considerando a contribuição de rigidez e de massa das chicanas, em um modelo conjunto, e o efeito de "added mass" devido ao fluido, as suas primeiras frequências se tornam maiores que 33. Hz.

Para análises com carregamentos mais severos que o sismo aqui considerado o modelo deverá ser completado com elementos de gap [1] que simulem as folgas existentes pois se prevê que ocorrerão impactos entre as estruturas modeladas tornando, assim, a análise dinâmica não-linear. Nesta hipótese deverá ser definido um segundo nível de superelementos (onde os 'elementos' serão os superelementos atualmente existentes) a fim de reduzir ulteriormente o tamanho do modelo.

REFERÊNCIAS

- [1] Carlos A. de J. Miranda - "Análise Dinâmica dos Internos de um Reator Nuclear PWR Utilizando Superelementos em um Modelo 3-D Integrado - Parte 1: Descrição e Testes Estáticos do Modelo". 7º SIBRAT - Simpósio Brasileiro Sobre Tubulações e Vasos de Pressão. OUT/92, Florianópolis, S^{ta} Catarina, Brasil
- [2] ANSYS - User's Manual, Rev. 4.4A, 1989. Swanson Analysis Systems, Inc. - Houston (PA) USA
- [4] Carlos A. de J. Miranda - "Cálculo das Frequências Próprias do Barril Considerando o Efeito do Fluido". IPEN/SP-Relatório Interno. Set/88.
- [5] Blevins, Robert D. - "Formulas for Natural Frequency and Mode Shape", 1979. Van Nostrand Reinhold Co.