



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. 409-418

**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**

Carlos Alexandre de Jesus Miranda

COPESP/IPEN-CNEN/SP

Travessa R, 400 - CEP 05508

Cid. Universitária, S. Paulo, SP

SUMÁRIO

Descreve-se o modelo integrado 3-D desenvolvido para as análises dinâmicas das estruturas internas de suportaçao do núcleo de um reator PWR de pesquisa e são apresentados os testes estáticos de validação do mesmo. Existem aproximadamente: 90 super elementos, 85000 graus de liberdade (GdL), sendo 8200 GdL masters e 12000 elementos dos quais 8400 elementos de casca fina. Utilizou-se um computador DEC VAX modelo 11/785 e o programa ANSYS. Inicialmente será feita uma análise sísmica espectral. Se se verificar a ocorrência de impactos se fará análise não-linear com integração direta do pulso de deslocamentos obtido a partir do acelerograma sísmico.

SUMMARY

An integrated 3-D model of a research PWR reactor core support internals structures was developed for its dynamic analyses. The static tests for the validation of the model are presented. There are about 90 super elements with, approximately, 85000 degrees of freedom (DoF), 8200 masters DoF, 12000 elements with about 8400 thin shell elements. A DEC VAX computer 11/785 model and the ANSYS program were used. If impacts occurs the spectral seismic analysis will be changed to a non-linear one with direct integration of the displacement pulse derived from the seismic accelerogram. This last will be obtained from the seismic acceleration response spectra.

1. Introdução

Neste trabalho descreve-se o modelo integrado 3-D desenvolvido para as análises dinâmicas das estruturas internas de suportaçào do núcleo de um reator PWR de pesquisa. São apresentados, também, os testes estáticos de validação do mesmo.

As estruturas que foram discretizadas como super elementos, são as seguintes: Barril, Grelha Superior, Estruturas-Guias das Barras de Controle (E.G.) - cada uma formada por algumas guias-simples e guias-duplas, Placa Intermediária, Elementos Combustíveis (E.C.), Grelha Inferior, Chicanas e Placas Suportes das Chicanas.

Existem cerca de 90 super elementos no modelo, com cerca de 85000 GdL sendo 8200 GdL masters para um total de cerca de 12000 elementos dos quais 8400 elementos de casca. Utilizou-se um computador DEC VAX compatível, modelo 11/785. A geração de alguns super elementos consumiu cerca de 2 h de CPU.

Para cada super elemento são salvas 2 matrizes: de massa e de rigidez. Quanto a matriz de massa utilizou-se o conceito de "matriz de massa consistente" para o elemento STIF63 (elemento quadrilátero de casca plana do ANSYS [1]) que consiste em obter a matriz de massa utilizando-se as mesmas funções de interpolação utilizadas na geração da matriz de rigidez além da utilização de elementos de massa concentrada STIF21. Os graus de liberdade "masters" definidos são aqueles necessários para: (a) a conexão dos super elementos na fase seguinte a sua geração, (b) definição de elementos de gaps e outros elementos "simples", (c) uma boa distribuição de massa nos super elementos e no modelo completo e (d) a aplicação das condições de contorno. O conjunto das estruturas que formam os Internos, está esquematicamente representado na fig. 1, onde podem ser vistas suas posições relativas no interior do Vaso (que circunda o Barril) e como se conectam entre si.

2. Descrição dos Super elementos

A seguir se fará a descrição sucinta de alguns dos super elementos ou grupos estruturais em que os internos foram divididos indicando-se, também, as principais hipóteses feitas para a sua definição: a) BARRIL - ao qual se conectam todos os demais super elementos (além de se conectarem entre si). Foi dividido em duas grandes partes: Parte Superior (representando as partes do Barril acima da primeira chapa suporte, aquela mais superior) e a Parte Inferior (representando todas as partes abaixo da primeira chapa suporte). A parte superior, por sua vez, foi dividida em

duas partes idênticas: entre 0° e 180° e entre 180° e 360°. b) GRELHA SUPERIOR - formado pelo anel superior, grelha superior e suas placas furadas. c) ESTRUTURA-GUIA - Representa uma estrutura-guia, a partir da modelagem das guias simples e das guias-duplas que a compõe. d) PLACA INTERMEDIÁRIA - à esta placa se conectam as estruturas-guia e os elementos combustíveis. São previstos 4 pinos que, fixos no Barril, penetram com folga nula, em 4 respectivas "perfurações" existentes na placa. Foi prevista a possibilidade de colocação de 4 "encostos" entre placa e Barril entre cada 2 pinos. A Placa Intermed. foi discretizada em 2 superelementos, representando, cada um, uma metade da Placa. e) CHAPAS SUPORTES DAS CHICANAS - são posicionadas em 4 níveis, com 8 placas por nível, e existem 2 tipos básicos associados as correspondentes chicanas. f) CHICANAS - existem 8 chicanas divididas em 2 tipos básicos, localizadas em torno do núcleo servindo como uma guia para o fluxo de água. g) GRELHA INFERIOR - suporta o conjunto dos Elementos Combustíveis e é formado pelo anel, grelha inferior, saia de uniformização de fluxo (considerada como massa concentrada) e as chapas octogonais (representadas como vigas) onde são fixados os pinos dos elementos combustíveis. h) ELEMENTO COMBUSTÍVEL (E.C.) - o comportamento não-linear de um elemento combustível foi avaliado separadamente por outro grupo de análise e uma matriz de rigidez "média" linear foi obtida para representá-lo [2]. Os principais superelementos são apresentados nas figuras 2a a 2e.

3. Geração dos Superelementos

O superelemento tem associada uma matriz de rigidez e uma matriz de massa. Depois de formado não existe geometria associada ao mesmo, o qual pode se conectar a outros superelementos e/ou elementos "comuns" através dos seus GdL masters e uma vez criado a sua matriz de rigidez permanece constante (o mesmo é linear). Quaisquer elementos não-lineares utilizados na sua criação permanecem com os "STATUS" definidos na fase de geração. No presente modelo os superelementos foram definidos apenas com elementos lineares. Na fase de geração dos superelementos podem ser aplicados quaisquer carregamentos. Na fase de utilização destes superelementos só podem ser aplicadas forças concentradas ou deslocamentos prescritos nos seus nós masters (além de acelerações). Para o modelo 3-D ora apresentado não foram definidos carregamentos nos superelementos a nível de geração dos mesmos.

Na fase de geração dos superelementos, exceto para as E.G. e

para os E.C., os mesmos são definidos, basicamente, com elementos de casca fina com 4 nós e 6 graus de liberdade (GdL) por nó. Cada E.G. é definida com elementos de viga 3-D com 2 nós e 6 GdL/nó e cada E.C. tem sua matriz de rigidez explicitamente definida (STIF27 - Este elemento foi utilizado para introduzir no modelo a matriz de rigidez do Elemento Combustível, obtida pelo programa ELCOM [2]. O elemento não tem geometria e é definido por 2 nós e tem 6 GdL por nó. É fornecida a metade superior de sua matriz de rigidez). Os anéis externos das grelhas superior e inferior foram definidos com elementos sólidos 3-D com 3 GdL/nó (STIF45).

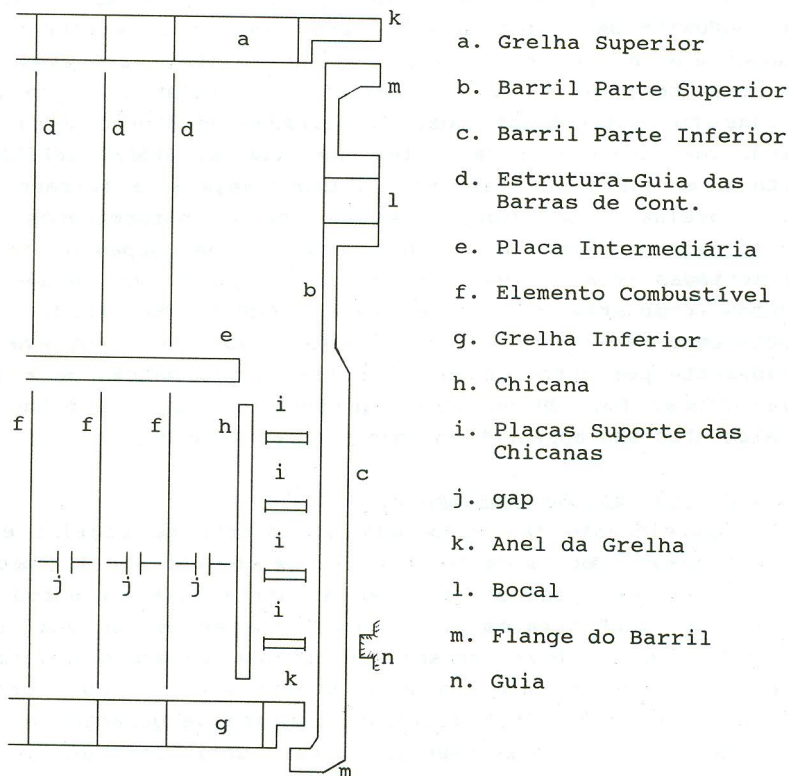
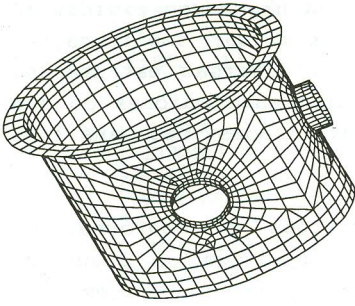
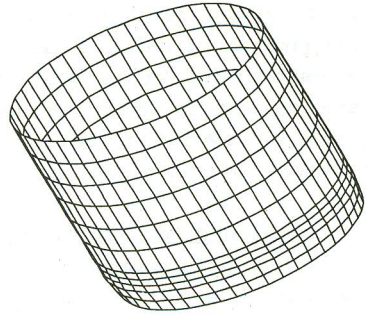


Figura 1: Posições Relativas dos Internos

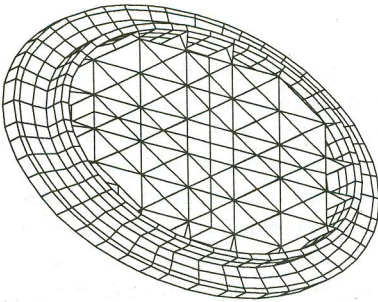
Cada parte estrutural modelada como superelemento foi, antes, analisada separadamente do conjunto dos INTERNOS, com carregamento estático equivalente. Nos INTERNOS existem muitas folgas, principalmente intra Elementos Combustíveis e entre E.C.s



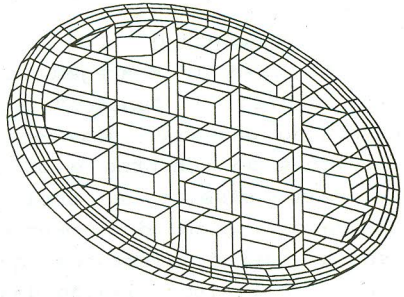
(a) Barril Superior (2 partes)



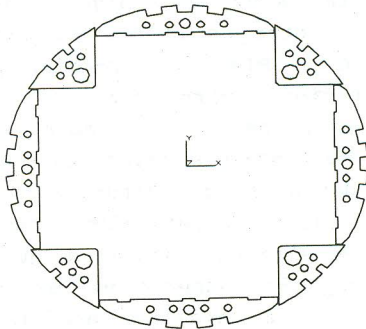
(b) Barril Inferior



(c) Grelha Superior



(d) Grelha Inferior



(e) Chapas Sup. das Chicanas

Figura 2: Alguns dos Super elementos Gerados

e chicanas. Devido a estas folgas, portanto, além das ampliações devidas ao fato das estruturas não serem rígidas ao carregamento dinâmico, ainda poderão se verificar ampliações dos esforços devidas aos impactos entre as diversas estruturas. Neste caso tais esforços serão significativamente maiores do que aqueles provocados pelas acelerações utilizadas nas análises estáticas equivalentes.

Condições de Contorno - Como condições de contorno, em termos de deslocamentos prescritos, são impedidos os graus de liberdade que definem as "IN-PLANE ROTATIONS" nos superelementos planos (Placa Intermediária, nas Chapas Suportes das Chicanas e nas Chicanas). Nos Elem. Combust. são impedidas as rotações ROTZ (em torno do seu eixo vertical).

4. Modelo 3-D

Na fase de montagem do modelo 3-D os superelementos acima são reunidos e "unidos" através de convenientes "off-set" na numeração dos seus nós com GdL "masters" e/ou acoplamentos, as condições de contorno e os carregamentos (espectros de resposta no caso sísmico e acelerações estáticas nos testes) são aplicados. Além dos mencionados superelementos também serão usados outros elementos que venham a ser necessários para completar a discretização dos Internos, entre os quais: elementos de viga para discretizar os pinos-guia entre o Barril e a Placa Intermediária, elementos de gap para simular as folgas existentes na estrutura real (notadamente as folgas entre a Placa Intermediária e o Barril, entre as chapas suportes das chicanas, entre Elem. Combust. e a Placa Intermediária e entre Elem. Combust. e a Grade Inferior, entre Elementos Combustíveis e as Chicanas e entre os próprios Elem. Combust.). Estes últimos elementos de gap serão responsáveis pelas fortes não-linearidades das análises dinâmicas devido ao sua natureza não-linear e grande quantidade. E serão definidos/ativados se os resultados preliminares da análise sísmica mostrarem que os respectivos deslocamentos relativos são superiores as folgas teóricas existentes. Neste caso uma análise não-linear será feita aplicando-se como carregamento o pulso de deslocamentos obtido por dupla integração do acelerograma, que por sua vez será obtido a partir do espectro de resposta.

Condições de Contorno e Principais Vínculos - Todos os nós representativos de partes do VPR foram engastados uma vez que o

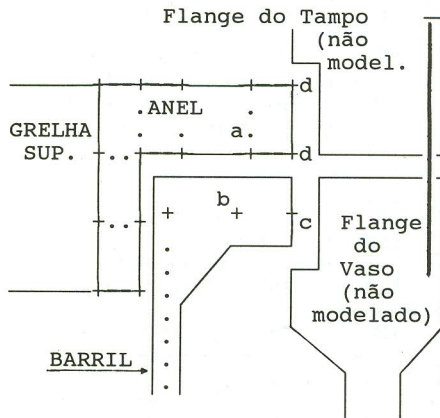
mesmo é considerado rígido para efeito das análises previstas (sismo) com o modelo ora desenvolvido.

TABELA 1: Principais Parâmetros de cada Superelemento

SUPER-ELEMENTO	Número de		Max. W.Front	GdL ativos	Tempo CPU (s)
	Nós	Elem.			
BARILSUPO	1207	580	534	436	2800
BARILSUP1	1207	580	462	436	2400
BARRILINF	672	624	980	840	6400
GRELHASUP	860	652	522	348	1800
GRELHAINF	839	570	312	141	780
ESTRGUIA	150	132	168	18	270
PLACAORI	1451	662	320	257	2100
PLACAREF	1451	662	320	257	1160
ELEMCOMB	10	29	38	28	17.4
CHSUPTP1	168	130	102	81	59.0
CHSUPTP2	108	74	137	83	41.0
CHICANA1	121	100	234	199	194
CHICANA2	110	80	311	280	213

Os principais vínculos podem ser vistos nas Fig. 1 e 3. O Barril se vincula ao Vaso do Reator pelo seu flange superior e pelas guias do Barril (que impedem deslocamentos transversais ao eixo do Barril e deixam os deslocamentos verticais livres). A grade superior se apoia no flange sup. do Barril. Entre o anel da grade superior e o Vaso existem 4 travas (também comuns ao Barril) que impedem os deslocamentos tangenciais, i.é: na direção circunferencial, e deixam livres os deslocamentos radiais. Para simular as travas foram utilizados elementos de treliça espacial fictícios de rigidez elevada, conectados e tangentes ao flange do barril e ao anel da grelha superior em uma extremidade e engastados na outra extremidade. São definidos 4 destes elementos conectados ao flange do Barril e 2*4 elementos conectados ao anel de grelha Superior. As posições destes elementos são apresentadas na figura 3 onde também são indicadas as respectivas posições dos

nós masters do flange superior do barril e do anel da grelha superior. A conexão entre o Barril e a Placa Intern. se faz por meio de 4 pinos a 90° um do outro com ajuste deslizante entre pino e placa intermediária, simulados com elementos de viga 3-D e acoplamentos convenientes.



nós tipo d : travas
 " " c : 1)travas;2) UZ=0
 " " a/b: Vínculo vertical
 entre flange sup. Barril
 e o Anel da Gr. Superior

Figura 3: Vínculos entre Flange Sup. do Barril, Anel da Grelha Sup. e Fl. do VPR. (esquemático)

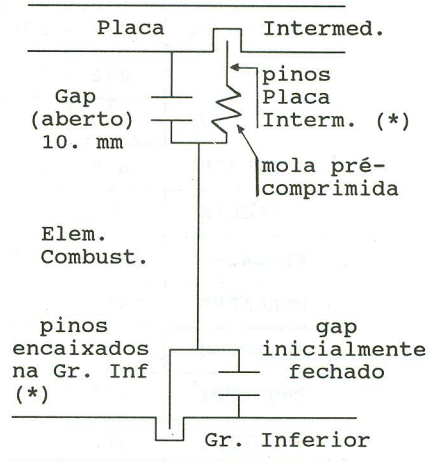


Figura 4: Conexões das Extremidades do Elem. Combustível (esquemático)
 (*)acoplam. dir. transv.

Os vínculos nas extremidades dos Elem. Combust. representados na figura 4, são realizados por meio de molas, pinos e gaps. Após a montagem existirá uma folga nominal de 10. mm entre o Elem. Combust. e a Placa Intermediária e as molas (simuladas com elementos de treliça) estarão com uma pré-deformação equivalente a uma força de 3000 N. Na figura 5 apresenta-se, esquematicamente, o conjunto inferior das estruturas modeladas com os 6 níveis de gaps entre Elem. Combust. e entre Elem. Combust. e Chicanas.

5. Testes Estáticos do Modelo

Devido ao seu tamanho e complexidade foram programados diversos testes estáticos e dinâmicos com o modelo 3-D desenvolvido. Tais testes estáticos foram realizados basicamente aumentando-se a quantidade de superelementos incorporados ao modelo, aplicando-se aceleração estática como carregamento e monitorando-se diversas grandezas e resultados.

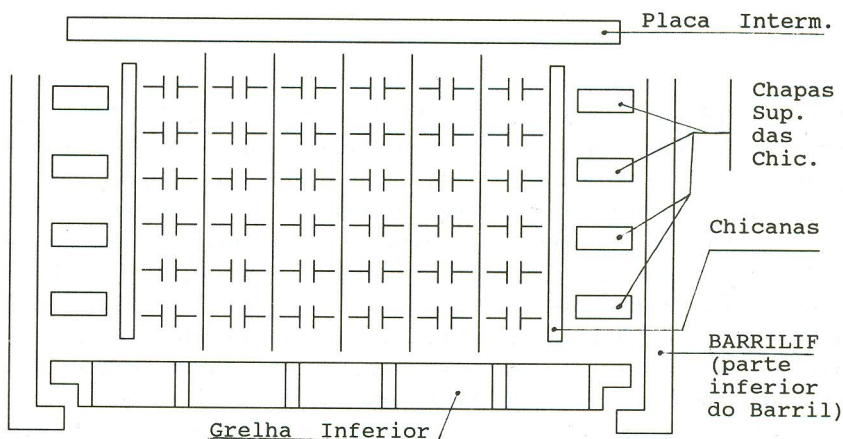


Figura 5: (Esquemático) Conjunto Inferior dos Internos

Quando completo o modelo 3-D consumiu cerca de 2:30 h de CPU em análise estática com 3 load-steps. Para efeito destas análises os elementos de GAP foram definidos com folga inicial bastantes superiores aos valores reais para não ocorrerem não-linearidades. O carregamento padrão foi, sempre, formado por 3 load-steps com aceleração de $10. \text{ m/s}^2$ respectivamente em X, Y e Z.

Em cada análise se controlou ou verificou, entre outros: a) Wave-front máximo e RMS Wave-front; b) Tempos de CPU em diversas etapas do processamento; c) Deslocamentos máximos; d) Nós onde ocorrem os deslocam. máximos; e) Reações de apoio em cada nó com restrição; f) Somatório das reações de apoio; g) Somatório das forças nodais equivalentes de cada superelemento; h) Massa agregada ao modelo em cada análise; i) Evolução dos resultados de uma análise para outra, etc.

Durante os testes percebeu-se que os resultados poderiam vir a ser afetados por erros de truncamento numérico devido aos valores extremamente pequenos de rigidez associados as "In-Plane Rotations" (inicialmente não restringidas) dos superelementos planos. A solução foi restringir tais rotações a nível de geração

dos mesmos. Outro problema identificado nesta fase foi o desequilíbrio da matriz de rigidez do E.C. que foi resolvido aumentando-se a definição dos seus elementos de 4 para 6 algarismos significativos. Uma vez resolvidos estes macro problemas os resultados passaram a ser aqueles esperados. Os diversos testes mostraram o bom desempenho do modelo desenvolvido e que o mesmo é confiável para a realização de análises estáticas.

6. Conclusões

Os testes estáticos realizados mostram que o modelo ora apresentado esta apto para a realização de análises estáticas apresentando resultados coerentes com o esperado e as verificações feitas mostram que os mesmos são corretos.

Em trabalho sequencial a este [3] são apresentados os testes dinâmicos e os respectivos resultados mostrando que o modelo desenvolvido também é confiável para a realização de análises dinâmicas (em particular aplicando-se espectros de resposta). Também são apresentados os resultados da análise sísmica efetuada, um dos objetivos do desenvolvimento deste modelo.

Para análises com carregamentos mais severos que o sismo o modelo deverá ter ativados os elementos de gap que simulam as folgas existentes pois se prevê que ocorrerão impactos entre as estruturas modeladas tornando, assim, a análise dinâmica não-linear.

REFERÊNCIAS

- [1] ANSYS - "USER's MANUAL". Rev. 4.4A, 1989. Swanson Analysis Systems, Inc. Houston (PA) USA
- [2] Leandro V. da S. Macedo - "Análise dos Acidentes: Modelo Dinâmico e Axial - Análises". IPEN-CNEN/SP - Relatório Interno, Dez/91, S. Paulo, Brasil.
- [3] Carlos A. de J. Miranda - "Análise Dinâmica dos Internos de um Reator Nuclear PWR Utilizando Super elementos em um Modelo 3-D Integrado - Parte 2: Testes Dinâmicos e Análise Sísmica", 7^o SIBRAT - Simpósio Brasileiro Sobre Tubulações e Vasos de Pressão - Out/92. Florianópolis. Santa Catarina, Brasil.