

ANÁLISE MATRICIAL DE ESTRUTURAS COMPOSTAS
DE TUBOS INTERLIGADOS POR ESPAÇADORES

P.M.PIMENTA

Doktor-Ingenieur, Universität Stuttgart
Prof.Dr., Escola Politécnica da USP
Engenheiro, IPEN/CNEN-SP

J.A.PERROTTA

Mestre em Engenharia Nuclear, IME
Engenheiro, IPEN/CNEN-SP

S U M Á R I O

É apresentada uma solução matricial para análise estática de estruturas formadas por conjuntos de tubos acoplados por espaçadores rígidos, típicas de elementos combustíveis de reatores nucleares.

O método assume que os espaçadores possuem movimento de corpo rígido, podendo ser de rigidez variável o acoplamento entre cada tubo e os espaçadores.

A estrutura é analisada obtendo-se os deslocamentos e rotações nodais do tubo, na posição dos espaçadores, em função dos deslocamentos e rotações do centro de gravidade dos espaçadores, sendo estes as incógnitas do sistema global da estrutura.

A solução do problema é obtida incrementalmente de forma a considerar a mudança de rigidez nos vínculos entre tubos e espaçadores.

Com este método é possível calcular a rigidez da estrutura em qualquer direção e calcular os esforços e deformações nos tubos para qualquer tipo de carregamento atuante tal como: cargas distribuídas nos tubos, cargas concentradas nos espaçadores, expansões térmicas diferenciais e expansões diferenciais provocadas pela irradiação entre tubos.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR/SP - IPEN



1. INTRODUÇÃO

Uma estrutura composta por tubos e espaçadores é típica de elementos combustíveis de reatores nucleares. Os elementos combustíveis típicos de reatores de potência PWR (tipo Angra I, Angra II), são constituídos de um conjunto de varetas combustíveis, contendo pastilhas cerâmicas de Urânio enriquecido, dispostas de forma reticular. Esta forma reticular é mantida por uma estrutura composta de tubos guias de barra de controle, grades espaçadoras e bocais de extremidade. Os tubos guias de barra de controle possibilitam a inserção das varetas de controle (absorvedores de neutrons que controlam a reatividade do núcleo no reator) dentro do elemento combustível e servem também de ligação entre as grades espaçadoras e bocais. Estes tubos guias são soldados ou fixados de forma rígida às grades espaçadoras e aos bocais de extremidade, formando este conjunto o que é denominado esqueleto do elemento combustível. As varetas de combustível são fixadas somente às grades espaçadoras por um dispositivo mola-batente existente nas grades. Esta forma de fixação permite haver deslizamento da vareta combustível em relação à grade espaçadora, possibilitando desta forma acomodar expansões diferenciais, tanto térmicas quanto induzidas pela irradiação prolongada no reator (crescimento axial dos tubos de zircaloy com a irradiação), entre as varetas combustíveis e o esqueleto do elemento combustível. A figura 1 mostra um elemento combustível típico de PWR.

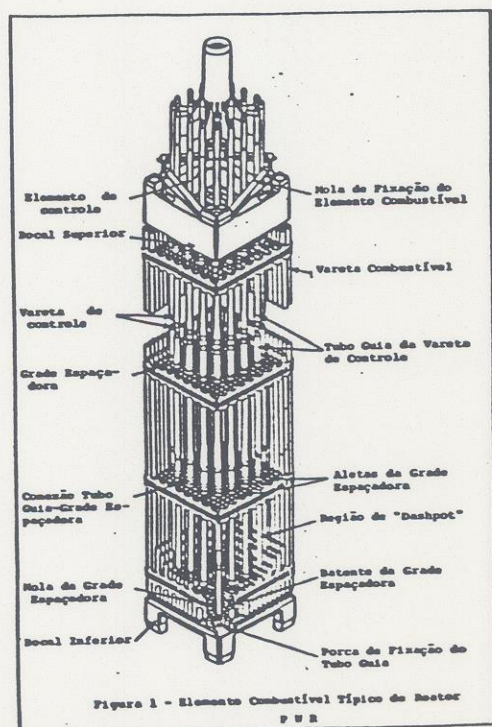
Sobre os elementos combustíveis irão atuar diversos tipos de carregamento tanto em situações de montagem do reator, como em operação normal e condições de acidente. Entre estes carregamentos pode-se citar as forças hidráulicas do fluido refrigerante, expansões térmicas ou provocadas pela irradiação, vibrações e outros carregamentos mecânicos externos.

Para se entender melhor o desempenho do elemento dentro do reator é preciso conhecer sua atuação estrutural. Uma análise matricial do problema torna-se complexa devido à generalidade de carregamentos que podem atuar sobre este elemento, a forma não linear de acoplamento das varetas combustíveis às grades espaçadoras e o grande número de nós a serem analisados (Angra I, por exemplo, 235 varetas combustíveis, 21 tubos guias, 8 grades, 2 bocais, 2090 nós, 12540 deslocamentos).

Neste estudo é apresentado um método de solução matricial para análise estática desta estrutura, tendo como ponto principal a consideração que as grades espaçadoras são bastante rígidas comparadas a rigidez do feixe de varetas combustíveis e tubos guias. Esta consideração faz com que se possa assumir movimento de corpo rígido das grades espaçadoras. Cada nó da estrutura (acoplamento vareta-grade espaçadora, tubo guia-grade espaçadora, tubo guia-bocal de extremidade) tem seus deslocamentos e rotações relacionados ao movimento do centro de gravidade da grade espaçadora ou bocal. A matriz de rigidez global do sistema é obtida através do somatório das transformações de rigidez de cada sistema vareta-vínculo-grade espaçadora, para o centro da gravidade das grades espaçadoras, reduzindo bastante o seu tamanho (no caso de Angra-I, por exemplo, tem-se 8 grades e 2 bocais, e portanto 10 nós e 60 deslocamentos).

A solução do problema é então obtida por métodos clássicos de análise não linear de estruturas, podendo-se desta forma considerar a variação de rigidez nos vínculos entre varetas combustíveis e grades espaçadoras.

O método apresentado neste trabalho é simples do ponto de vista de cálculo e programação e sintetiza de forma genérica e compacta outros tipos de solução do problema encontrados em bibliografia [1,2,3].



2. DESENVOLVIMENTO E DESCRIÇÃO DO MÉTODO

A estrutura é suposta ser composta de $(K-2)$ grades espaçadas e 2 bocais de extremidade, os quais são admitidos como indeformáveis, J tubos guias de varetas de controle solidários às grades e aos bocais e I varetas combustíveis ligadas por molas às grades e aos bocais. São identificadas as grandezas relativas às grades e aos bocais pela letra maiúscula G , as relativas aos tubos guias por T , as relativas às varetas combustíveis por V e as relativas às molas por M .

O equilíbrio de uma vareta combustível i ($i=1, \dots, I$) é dado de forma matricial por:

$$\underline{R}_{Vi} + \underline{R}_{Mi} = \underline{K}_{Vi} \underline{r}_{Vi} \quad (1)$$

onde o sinal \sim indica que a grandeza é um vetor ou matriz coluna e o sinal $-$ que a grandeza é uma matriz. Na expressão acima \underline{R}_{Vi} é o vetor dos carregamentos nodais equivalentes devidos às forças externas e aos efeitos térmicos da vareta i . A dimensão de \underline{R}_{Vi} é $6K$, uma vez que cada nó da vareta corresponde a uma grade ou bocal. \underline{R}_{Mi} é o vetor das reações que no caso são fornecidas pelas molas de ligação às grades e aos bocais. \underline{r}_{Vi} é o vetor dos deslocamentos nodais e \underline{K}_{Vi} é a matriz de rigidez da vareta i , que é suposta conhecida.

O equilíbrio de um tubo guia j ($j=1, \dots, J$) é formado de maneira semelhante por:

$$\underline{R}_{Tj} + \underline{R}_{Sj} = \underline{K}_{Tj} \underline{r}_{Tj} \quad (2)$$

onde \underline{R}_{Tj} é o vetor dos carregamentos nodais equivalentes devidos às forças externas e aos efeitos térmicos. \underline{R}_{Sj} é o vetor das reações nodais, \underline{r}_{Tj} o vetor dos deslocamentos nodais e \underline{K}_{Tj} a matriz de rigidez também suposta conhecida.

O equilíbrio de todas as varetas combustíveis da estrutura pode ser formulado de forma global por

$$\underline{R}_V + \underline{R}_M = \underline{K}_V \underline{r}_V \quad (3)$$

cujos vetores e matrizes são definidos a seguir

$$\underline{R}_V = \{ \underline{R}_{V1} \quad \dots \quad \underline{R}_{Vi} \quad \dots \quad \underline{R}_{VI} \} \quad (3a)$$

$$\underline{R}_M = \{ \underline{R}_{M1} \quad \dots \quad \underline{R}_{Mi} \quad \dots \quad \underline{R}_{MI} \} \quad (3b)$$

$$\underline{r}_V = \{ \underline{r}_{V1} \quad \dots \quad \underline{r}_{Vi} \quad \dots \quad \underline{r}_{VI} \} \quad (3c)$$

$$\underline{K}_V = \left[\underline{K}_{V1} \quad \dots \quad \underline{K}_{Vi} \quad \dots \quad \underline{K}_{VI} \right] \quad (3d)$$

Nas expressões acima como no restante do trabalho as grandezas entre chaves são dispostas em um vetor e as grandezas entre semicolchetes formam uma matriz diagonal de blocos.

Analogamente formula-se o equilíbrio de todos os tubos guias por

$$\underline{R}_T + \underline{R}_S = \underline{K}_T \underline{r}_T \quad (4)$$

com as seguintes definições

$$\underline{R}_T = \{ \underline{R}_{T1} \quad \dots \quad \underline{R}_{Tj} \quad \dots \quad \underline{R}_{TJ} \} \quad (4a)$$

$$\underline{R}_S = \{ \underline{R}_{S1} \quad \dots \quad \underline{R}_{Sj} \quad \dots \quad \underline{R}_{SJ} \} \quad (4b)$$

$$\underline{r}_S = \{ \underline{r}_{S1} \quad \dots \quad \underline{r}_{Sj} \quad \dots \quad \underline{r}_{SJ} \} \quad (4c)$$

$$\underline{K}_T = \left[\underline{K}_{T1} \quad \dots \quad \underline{K}_{Tj} \quad \dots \quad \underline{K}_{TJ} \right] \quad (4d)$$

As molas que ligam os nós das varetas às grades e bocais apresentam comportamento elástico não linear e permitem o escorregamento das varetas quando as forças na mola ultrapassam determinado valor. Este comportamento é semelhante ao apresentado por materiais elasto-plásticos. É claro que o comportamento das molas terá que ser testado experimentalmente. Chamando de \underline{r}_{Ri} o vetor dos deslocamentos dos pontos de ligação das molas da vareta i com as grades e bocais e definindo o vetor

$$\underline{r}_R = \{ \underline{r}_{R1} \quad \dots \quad \underline{r}_{Ri} \quad \dots \quad \underline{r}_{RI} \} \quad (5)$$

pode-se dizer que o vetor das forças nas molas \underline{R}_M é uma função não linear do vetor dos deslocamentos relativos das extremidades das molas \underline{r}_M dado por:

$$\underline{r}_M = \underline{r}_R - \underline{r}_V \quad (6)$$

Esta relação não linear será aqui descrita pela seguinte expressão

$$\underline{R}_M = \underline{R}_M(\underline{r}_M) \quad (7)$$

Os deslocamentos dos pontos de ligação das molas com as grades e bocais podem ser expressos em função dos deslocamentos do centro de gravidade das grades e dos bocais. Seja \underline{r}_{Ri}^k o vetor dos deslocamentos do ponto de ligação das molas da vareta i com a grade ou bocal k . Seja \underline{r}_G^k o vetor dos deslocamentos do centro de gravidade da grade ou bocal k . Estes vetores são relacionados cinematicamente por

$$\underline{r}_{Ri}^k = \underline{A}_i^k \underline{r}_G^k \quad (8)$$

onde \underline{A}_i^k é a matriz cinemática que contém basicamente como elementos a unidade na diagonal e diferenças de coordenadas em outras posições. Analogamente a (8) tem-se para os tubos guias a seguinte expressão:

$$\underline{r}_{Sj}^k = \underline{A}_j^k \underline{r}_G^k \quad (9)$$

Definindo-se agora as seguintes matrizes globais cinemáticas

$$\underline{A}_M = \left\{ \underline{A}_1^1 \dots \underline{A}_1^k \dots \underline{A}_2^1 \dots \underline{A}_2^K \dots \underline{A}_i^1 \dots \underline{A}_i^K \dots \underline{A}_I^1 \dots \underline{A}_I^K \right\} \quad (10a)$$

$$\underline{A}_S = \left\{ \underline{A}_1^1 \dots \underline{A}_1^K \dots \underline{A}_2^1 \dots \underline{A}_2^K \dots \underline{A}_j^1 \dots \underline{A}_j^K \dots \underline{A}_I^1 \dots \underline{A}_I^K \right\} \quad (10b)$$

tem-se que

$$\underline{r}_R = \underline{A}_M \underline{r}_G \quad (11a)$$

$$\underline{r}_S = \underline{A}_S \underline{r}_G \quad (11b)$$

O equilíbrio das grades e bocais pode ser então formulado do seguinte modo

$$\underline{R}_G = \underline{A}_M^* \underline{R}_M + \underline{A}_S^* \underline{R}_S \quad (12)$$

onde o asterisco significa a operação de transposição e \underline{R}_G é o vetor dos carregamentos externos nas grades e bocais.

Com a ajuda de (4) e (11b) pode-se eliminar em (12) o vetor \underline{R}_S e reescrever (12) na seguinte forma

$$\underline{R}_G = \underline{A}_M^* \underline{R}_M - \underline{A}_S^* \underline{R}_T + \underline{A}_S^* \underline{K}_T \underline{A}_S \underline{r}_G \quad (13)$$

(12) e (13) formam um sistema de equações não lineares que pode ser reproduzido conforme a equação (14) abaixo

$$\begin{cases} \underline{F}_V = \underline{R}_V + \underline{R}_M - \underline{K}_V \underline{r}_V = \underline{0} \\ \underline{F}_G = \underline{R}_G + \underline{A}_S^* \underline{R}_T - \underline{A}_M^* \underline{R}_M - \underline{A}_S^* \underline{K}_T \underline{A}_S \underline{r}_G = \underline{0} \end{cases} \quad (14)$$

O sistema (14) pode ser escrito na forma

$$\underline{F}(\underline{r}) = \underline{0} \quad (15)$$

se forem introduzidas as seguintes definições

$$\underline{F} = \left\{ \underline{F}_V \quad \underline{F}_G \right\} \quad (15a)$$

$$\underline{r} = \left\{ \underline{r}_V \quad \underline{r}_G \right\} \quad (15b)$$

A aplicação do método de Newton-Raphson ao sistema (15) leva ao seguinte esquema iterativo

$$\underline{F}(\underline{r}_m) + \underline{G}_m (\underline{r}_{m+1} - \underline{r}_m) = \underline{0} \quad (16)$$

onde a matriz do gradiente de \underline{F} é dada por:

$$\bar{F} (\underline{r}_{Gm}) + \bar{G}_m (\underline{r}_{G_{m+1}} - \underline{r}_{Gm}) = \underline{0} \quad (21)$$

onde \bar{F} é definido por

$$\bar{F} = \underline{F}_G + \underline{A}_M^* \underline{K}_M (\underline{K}_M + \underline{K}_V)^{-1} \underline{F}_V \quad (21a)$$

e \bar{G} por

$$\bar{G} = \underline{A}_M^* \left[\underline{K}_M (\underline{K}_M + \underline{K}_V)^{-1} \underline{K}_M - \underline{K}_M \right] \underline{A}_M - \underline{A}_S^* \underline{K}_T \underline{A}_S \quad (21b)$$

O esquema (21) apresenta as seguintes vantagens:

- i) o sistema (21) é substancialmente menor que (16), podendo ser inclusive resolvido em computadores de pequeno porte.
- ii) a matriz invertida em (21a) e (21b) é obtida facilmente pois é diagonal de blocos. A inversão pode proceder igualmente em blocos.
- iii) como as grades e bocais são geometricamente iguais as matrizes \underline{A}_i^k e \underline{A}_j^k são constantes.
- iv) como as varetas e os tubos guias são iguais entre si a obtenção de \underline{K}_V e \underline{K}_T é bastante simples.
- v) se o espaçamento entre as grades forem iguais o problema se simplifica mais ainda.
- vi) o esquema (21) pode ser aplicado a incrementos de carga se houver dificuldades de convergência.
- vii) a inversão de \underline{G} em cada iteração pode ser evitada se \underline{G} for mantida constante num incremento ou mesmo em vários. É claro que esta economia se faz as custas da velocidade de convergência.
- viii) devido a semelhança com um problema elasto-plástico, pode-se afirmar que o colapso da estrutura ocorrerá quando \underline{G} se tornar singular. Além disso deve-se adotar o ramo menos rígido da curva das forças das molas por ocasião da montagem de \underline{K}_M como foi demonstrado em [4].

3. CONCLUSÕES

Embora os elementos combustíveis de reatores nucleares PWR se constituam numa estrutura complexa, o método matricial apresentado neste trabalho resume o problema numa forma simples, genérica e compacta que pode ser facilmente programável não dependendo de computadores de grande porte.

Este método fornece uma excelente ferramenta para a análise do comportamento estrutural de elementos combustíveis, podendo-se através dele analisar qualquer tipo de carregamento estático e conhecer a rigidez do elemento em todas as direções.

BIBLIOGRAFIA

- [1] L.L. Barinka, "Nonlinear Deflection Analysis for Coupled Tubular Structures", Journal of Eng. for Industry, NOV 1971.
- [2] L.L. Barinka, "On the Lateral Deformation of Coupled Tubular Structures", 3rd International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, London, Sept. 1975.
- [3] H.D. Fisher, "Nonlinear Load Deflections Characteristics of a Reactor Fuel Bundle", 4th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, San Francisco, Aug 1977.
- [4] P.M. Pimenta, "Zur Eindeutigkeit der Bewegung nichtviskoser Kontinua und deren Berechnung nach der Methode der finiten Elemente", Dissertation, Universität Stuttgart, 1982.