



# ANÁLISE DE FLANGES DE VASOS DE PRESSÃO NUCLEARES



CARLOS ALBERTO DE OLIVEIRA  
OSCAR BRITO AUGUSTO  
DIRETORIA DE PESQUISA DE REATORES, CNEN, SP

## SUMÁRIO

*Neste trabalho é proposta uma metodologia para a análise estrutural de flanges de grande diâmetro utilizados em vasos de pressão de reatores nucleares. Nesta análise o vaso é dividido em elementos de casca de revolução, os flanges são representados por anéis rígidos e os parafusos são tratados como vigas. Utiliza-se o método dos esforços para a solução do problema, sendo que os resultados calculados são comparados com resultados obtidos pelo método dos elementos finitos.*

## INTRODUÇÃO

Na análise de vasos de pressão, os flanges distinguem-se não somente por serem membros estruturais e, portanto, estarem sujeitos aos requisitos de integridade estrutural, mas também por comporem, juntamente com os parafusos e a gaxeta, um conjunto suscetível a falhas por vazamento. Este é o caso do vaso de pressão de um reator nuclear, em que o tampo do vaso deve ser removível a fim de que se possa ter acesso à sua parte interna.

Por serem não convencionais (diâmetro externo da ordem de 4m e pressão de operação em torno de 17 MPa), os flanges de reatores nucleares não são normatizados, o que dificulta a avaliação de suas dimensões em fase de projeto e concepção. O que se faz é adotar uma geometria inicial e efetuar a análise com uma modelagem específica. Na maioria das vezes é utilizado um código de elementos finitos. Se o flange não é adequado, redefine-se sua geometria e repete-se a etapa anterior. Note que o processo de elaboração e redefinição da malha de elementos finitos exige um certo dispêndio de tempo nem sempre desprezível.

Para facilitar este processo desenvolveu-se um programa computacional para a análise estrutural de uniões flangeadas de vasos nucleares, baseado no método dos esforços, cuja entrada de dados é simples e fácil de ser alterada. A título de exemplo, aplica-se o programa à análise do vaso do reator da usina nuclear de ANGRA I (1). Os resultados obtidos para um carregamento de pressão interna e pré-tensão dos parafusos do flange são comparados com resultados obtidos pelo método dos elementos finitos, com boa

vidido em elementos de casca de revolução, os anéis dos flanges são representados por anéis rígidos, e os parafusos são tratados como vigas (ver figura 1).

No caso do flange de um vaso nuclear, a razão espessura/largura para seu anel é da ordem da unidade ou maior, ao contrário do que ocorre com flanges comuns que trabalham a baixas pressões, para os quais esta razão situa-se em torno de 1/3; isto desaconselha a modelagem deste elemento pela teoria de placas, como ocorre no caso geral. O que se faz é utilizar a teoria de anéis rígidos (2), a qual representa bem o comportamento do elemento, exceto por uma pequena região nas vizinhanças do contato entre as faces, na qual ocorre deformação plástica (3).

Os parafusos de fixação da união flangeada são tratados pela teoria de vigas, e são supostos engastados no anel do flange inferior. O elemento assim constituído é suposto axissimétrico, bem como os esforços de pré-tensão dos parafusos.

## A REGIÃO DE CONTATO ENTRE OS FLANGES

Um aspecto particular de um flange nuclear é sua região de contato (figura 2). A guarnição empregada é do tipo anel de vedação "O-ring", geralmente do modelo auto energizável (4); são empregados dois "O-rings", formando-se um sistema redundante de proteção. Note-se entretanto que o contato efetivo é aquele que ocorre entre as superfícies metálicas, sendo este o ponto em que atuam os esforços de contato. O programa elaborado inclui um processo iterativo para se determinar o ponto real de contato, a partir de rotações pré calculadas.

## MODELO MATEMÁTICO

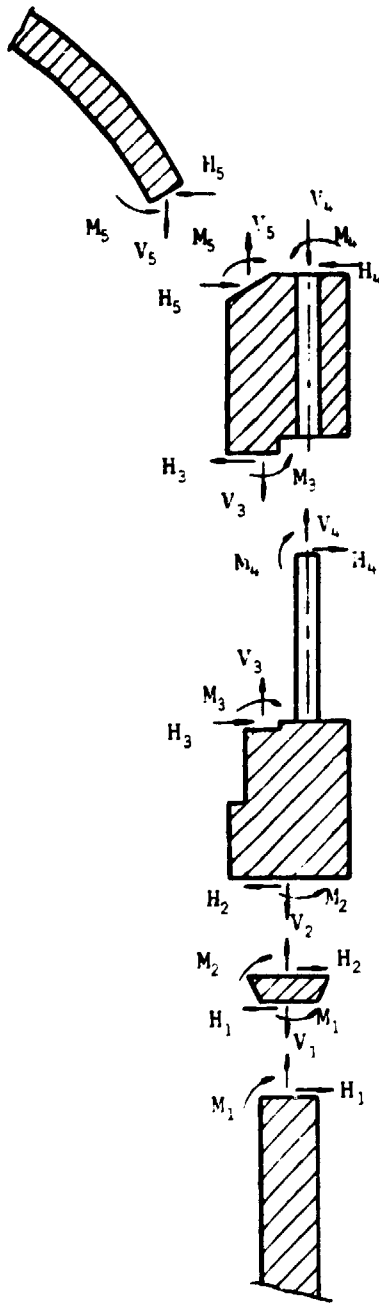


Figura 1 - Discretização do vaso em elementos de casca de revolução, anel rígido e viga, incluindo esforços redundantes que atuam nas junções.

1. O vaso é dividido em elementos básicos, conforme mostra a figura 1.
2. Definem-se os carregamentos externos:
  - i. pressão uniforme
  - ii. força de pré-tensão nos parafusos
3. Para cada elemento monta-se a relação de flexibilidade:

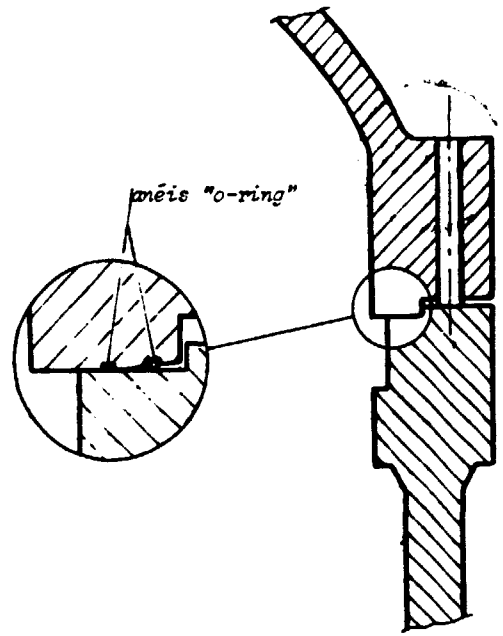


Figura 2 - Região de contato

- ( $\delta$ )<sub>e</sub> é o vetor de deslocamentos do elemento
  - ( $q$ )<sub>e</sub> é o vetor de esforços nas extremidades do elemento (incógnito)
  - ( $\delta$ )<sub>e</sub>' é o vetor de deslocamentos do elemento devido aos carregamentos externos
4. O vetor de esforços (incógnita procurada) é obtido através da solução de um sistema linear de equações, resultante da substituição das relações de flexibilidade de cada elemento isoladamente, nas condições de compatibilidade e equilíbrio das junções.
  5. Com o vetor de esforços obtido na etapa anterior calculam-se os deslocamentos e tensões de cada elemento isoladamente.

#### CONDIÇÕES DE COMPATIBILIDADE E EQUILÍBRIO

Para a maioria das transições entre os elementos as condições de compatibilidade entre deslocamentos radiais e rotações, e equilíbrio de forças e momentos podem ser deduzidas de forma clássica. No entanto alguns tópicos merecem atenção especial:

1. Contato entre os flanges inferior e superior: duas condições podem ocorrer:
  - a. A força de atrito entre as duas faces é suficientemente elevada para evitar desloca-

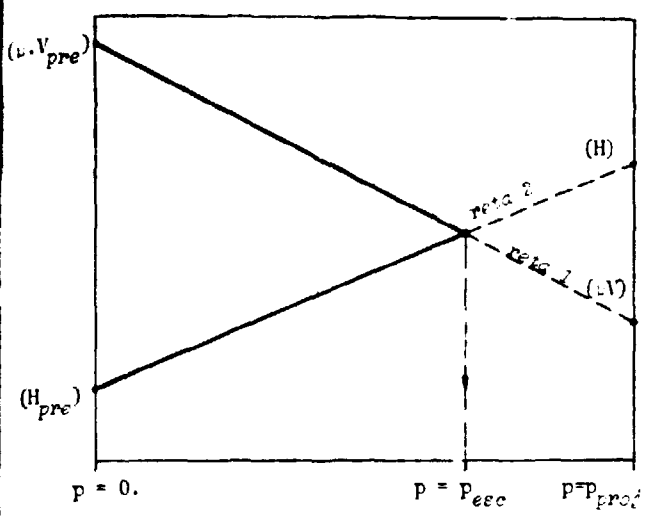


Figura 3 - Variação, com a pressão, do esforço horizontal necessário para que não ocorra escorregamento (reta 2) e da reação horizontal devida ao atrito (reta 1) - válido somente até a pressão P<sub>esc</sub>, onde se inicia o escorregamento.

ais.

- b. A força de atrito entre as faces é insuficiente para evitar deslocamentos radiais relativos, o que resulta na seguinte relação entre a força vertical (V) e a força horizontal (H) no ponto de contato:

$$H = \mu \cdot V \quad (2)$$

onde,  $\mu$  é o coeficiente de atrito entre as faces.

Sendo o esforço horizontal (H) diferente para cada situação acima, ele não pode ser incluído em uma única condição de compatibilidade. Utiliza-se o seguinte procedimento:

- i. Adota-se a condição (a) e efetua-se a análise. Com esforços (V) e (H) resultantes na interface dos flanges, verifica-se se a seguinte relação é obedecida:

$$|H| < \mu \cdot |V| \quad (3)$$

- ii. Em caso negativo a análise é repetida para a condição (b), veja figura 3.

- 2. Acoplamento entre parafusos e anel do flange superior: neste caso a condição de compatibilidade é de igualdade de deslocamentos horizontais e rotações. Entretanto, devido à existência de um esforço de pré-tensão nos parafusos, a

- a. Inicialmente libera-se a junção parafuso-anel superior e, aplicando esforços verticais equivalentes ao esforço de pré-tensão, obtém-se a diferença de deslocamentos verticais ( $\Delta w$ ), no ponto considerado.
- b. Subsequentemente os esforços aplicados aos parafusos e ao anel superior são retirados, passando-se a impor à junção considerada uma diferença de deslocamentos verticais igual a ( $\Delta w$ ).

RESULTADOS E CONCLUSÕES

Na figura 4 mostra-se a análise da união flangeada do vaso de ANGRA 1. Supõe-se que o coeficiente de atrito entre as faces dos flanges é 0,55.

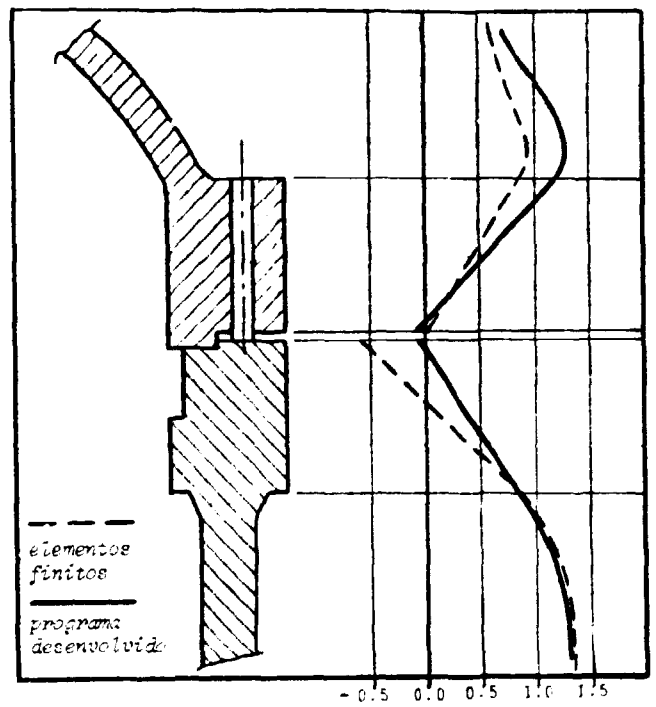


Figura 4 - Deslocamentos radiais do vaso do reator de ANGRA 1 (mm).

A análise efetuada mostra que houve um escorregamento entre as faces dos flanges (deslocamentos horizontais relativos : 0,19 mm calculado pelo programa desenvolvido e 0,68 mm calculado pelo programa ANS'S (7) baseado no método dos elementos finitos). A discrepância de resultados ocorre porque o método desenvolvido baseia-se na hipótese de indeformabilidade da seção transversal dos flanges. Em análise detalhada pelo método dos elementos finitos nota-se que ocorrem deformações acentuadas na região de contato entre os dois flanges, gerando os resultados mostrados na figura 4. Porém julgamos que o programa atingiu seu ob-

uniões flangeadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Final Safety Analysis Report (FSAR) of Angra I.
- (2) Z. Zudans, T.C. Yen, W.H. Steigelmann "Thermal Stress Techniques in the Nuclear Industry", American Elsevier Publishing Co., N.Y., 1965.
- (3) D.H. Van Campen, "Computational Methods for Predicting Tapered Hub Behavior in Large-Diameter, High Pressure Vessel Flanges", Proc. 1<sup>th</sup>. International Conf. on Structural Mechanics in Reactor Tech. Berlin, Set. 1971.
- (4) G. Boardman, M. Adams, "Static Seals and Their Application in Water-Cooled Nuclear Reactor Systems", ORNL-TM-3308, 1971.
- (5) A. Bakker, H.A.C.M. Spaas "A computational Procedure for Stress and Deformation Analysis of High-Pressure Vessel Flanges", International J. of P. Vessel and Piping, may, 1977.
- (6) H.A.C.M. Spaas "Deformation Behavior of Large High-Pressure Vessel Flanges", in Developments in Stress Analysis for Pressurised Components, ED. R.W. Nichols (Applied Science Publishers Ltd. 1977).
- (7) G.J. De Salvo, J.A. Swanson "ANSYS Engineering Analysis System User Manual - REV 3", 1979.
- (8) C.A. de Oliveira "Um Modelo Para a Análise Estrutural de Flanges de Vasos de Pressão Nucleares". IPEN-CNEN/SP, 1985 (Dissertação de Mestrado).

SUMMARY

This work proposes a methodology for the structural analysis of high diameter nuclear reactor pressure vessel flanges. In the analysis the vessel is divided into shell-of-revolution elements, the flanges are represented by rigid rings, and the bolts are treated as beams. The flexibility method is used for solving the problem, and the results are compared with results obtained by the finite element method.