

Projeto por Análise de Vasos de Pressão: Exemplos de Utilização do ANSYS

Miguel Mattar Neto

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN-CNEN/SP)
Travessa R, 4000 Cidade Universitária
05508-900 São Paulo, SP
mmattar@net.ipen.br

**PRODUÇÃO TÉCNICO CIENTÍFICA
DO IPEN
DEVOLVER NO BALCÃO DE
EMPRÉSTIMO**

RESUMO

O projeto por análise ou projeto racional prescreve a utilização de análises estruturais e verificações de acordo com o modo de falha que se pretende evitar. Em vasos de pressão os modos de falha geralmente considerados em projeto são o colapso plástico, o acúmulo de deformação plástica sob carregamentos cíclicos, a fadiga e a instabilidade, quando ocorrem tensões de compressão. O código de projeto por análise empregado (código ASME, Boiler and Pressure Vessel Code, Section III and Section VIII, Division 2) impõe metodologias de análise elástica e linear com limites de tensões e de fatores de utilização adequados a cada modo de falha que se quer evitar, metodologias de análise elasto-plástica com abordagens definidas para avaliação de cargas e combinações admissíveis, e metodologias de verificação de instabilidade estrutural.

Nesse trabalho serão apresentados dois exemplos de avaliação:

i. Análises elasto-plásticas e categorização de tensões em análises elásticas em modelos com elementos sólidos tridimensionais de uma conexão de bocal radial cilíndrico com costado cilíndrico sob carregamentos de pressão interna e esforços concentrados no bocal;

ii. Avaliação da instabilidade estrutural em um modelo de elementos de casca tridimensional de um vaso metálico de contenção nuclear esférico sob carregamentos sísmicos, de pressão externa e de peso próprio.

INTRODUÇÃO

O projeto por análise ou projeto racional prescreve a utilização de análise estruturais e verificações de acordo com o modo de falha que se pretende evitar. Para vasos de pressão, há no código ASME Seção III [1] e Seção VIII, Divisão 2 [2] verificações e limites indicados para

diferentes modos de falha que devem ser evitados, isto é, verificações e limites com margens de segurança adequados a cada situação.

Em geral, os modos de falha em vasos de pressão considerados são: i. Deformação elástica excessiva; ii. Deformação plástica excessiva; iii. Fratura frágil; iv. Deformação e falha por fluência; v. Acúmulo de deformações plásticas sob carregamentos cíclicos; vi. Fadiga de baixo ciclo; vii. Corrosão sob tensão; viii. Instabilidade.

Modos de falha como a deformação plástica excessiva e o acúmulo de deformações plásticas sob carregamento cíclico são evitados impondo margens de segurança e limites nas chamadas tensões primárias e secundárias. Numa definição bastante sucinta as tensões primárias são aquelas que equilibram os esforços externos e as tensões secundárias são as que ocorrem devido aos requisitos de compatibilidade das deformações.

No código ASME, os limites para o projeto de vasos de pressão para as tensões primárias e secundárias foram definidos com base na avaliação de cascas axissimétricas e seus comportamentos de membrana e flexão. Assim, nas análises elásticas e em modelos de elementos finitos, especialmente os com elementos sólidos tridimensionais, é necessário fazer a categorização das tensões calculadas que é uma separação em parcelas de membrana e de flexão e uma classificação em tensões primárias e secundárias. É importante notar que pode-se fazer, também, análise elasto-plásticas para obter carregamentos admissíveis que são os limites de comparação para as cargas atuantes.

No caso do modo de falha por instabilidade, há no código ASME a abordagem indicada no Code Case N-284-1 [1]. Nas regiões comprimidas são calculadas as tensões de instabilidade elástica ou elasto-plástica e impostos fatores de abatimento das mesmas definidos com base na

geometria do vaso e nas chamadas imperfeições. São definidos limites admissíveis para essas tensões calculadas.

Nesse trabalho serão apresentados dois exemplos: i. Análises elasto-plásticas e categorização de tensões em análises elásticas em modelos com elementos sólidos tridimensionais de uma conexão de bocal radial cilíndrico com costado cilíndrico sob carregamentos de pressão interna e esforços concentrados no bocal; ii. Avaliação da instabilidade estrutural em um modelo de elementos de casca tridimensional de um vaso metálico de contenção nuclear esférico sob carregamentos sísmicos, de pressão externa e de peso próprio.

CONEXÃO BOCAL – VASO DE PRESSÃO

A conexão de bocal radial cilíndrico com costado cilíndrico avaliada é mostrada na Figura 1 com as dimensões indicadas na Tabela 1.

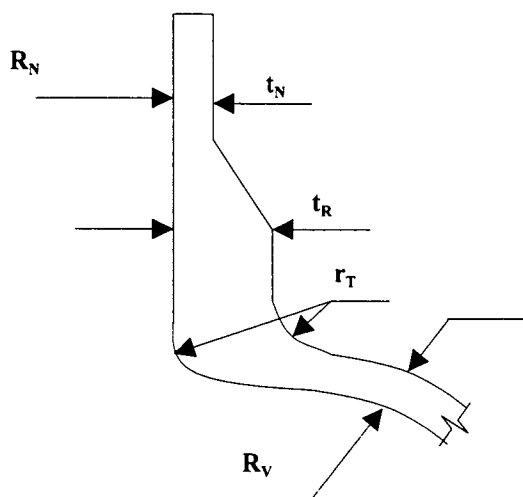


Figura 1: A conexão bocal – vaso de pressão

Tabela 1: Dimensões (em mm) da conexão bocal – vaso de pressão

Raio do vaso, R_V	1016
Espessura do vaso, t_V	98
Raio do bocal, R_N	130
Espessura do bocal, t_N	16
Espessura do reforço, t_R	55
Raios de transição, r_T	50

O material é um aço ferrítico de uso em vasos de pressão cujas propriedades mecânicas são:

Módulo de elasticidade: $E = 2 \text{ E5 MPa}$
 Coeficiente de Poisson: $\nu = 0,3$

Limite de escoamento: $\sigma_y = 262 \text{ MPa}$

Os modelos de elementos finitos foram construídos com elementos sólidos de 20 nós e 3 graus de liberdade por nó da biblioteca de elementos do ANSYS. O modelo 3D básico é $\frac{1}{4}$ da geometria 3D completa. Condições de contorno simétricas e anti-simétricas foram impostas de acordo com os casos de carregamento. Alguns detalhes dos modelos podem ser vistos na Figura 2.

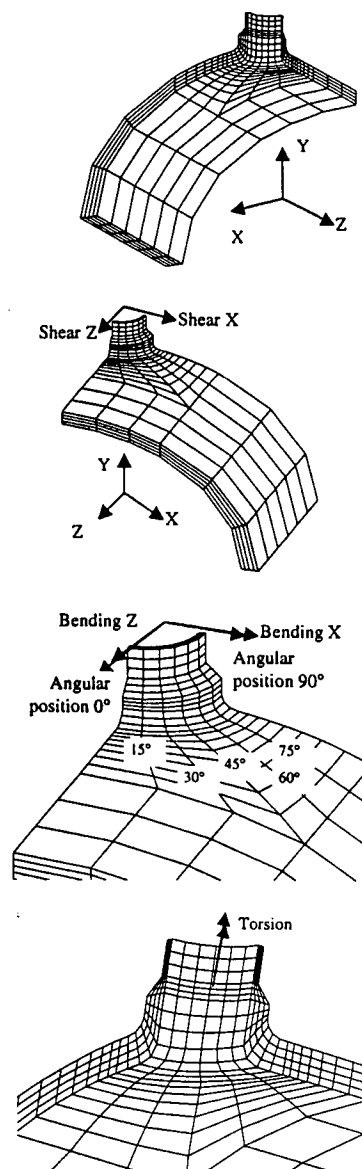


Figura 2: Detalhes do modelo de elementos finitos 3D básico

Para algumas combinações foi necessário duplicar o modelo 3D básico e isso pode ser visto na Figura 3.

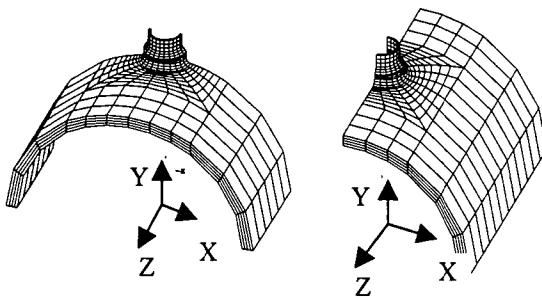


Figura 3: Modelos de elementos finitos 3D para combinações de carregamentos com simetria nos planos XY e ZY

O comprimento do bocal nos modelos foi estabelecido com base na distância $3 \sqrt{R_N t_N} = 137$ mm. A distância da extremidade do bocal ao costado é da ordem de 200 mm (maior que 137 mm). Os carregamentos nos bocais foram adequadamente impostos como carregamentos distribuídos ao longo da circunferência, equivalentes aos esforços concentrados. É importante mencionar que no caso dos esforços cortantes nos bocais foram impostos momentos fictícios visando eliminar os efeitos espúrios nas análises decorrentes dos momentos aparecem no modelos por causa desses esforços cortantes.

Várias análises foram feitas para os casos de carregamento indicados na Tabela 2.

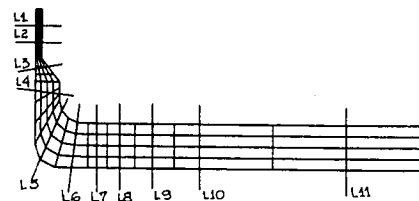
Tabela 2: Combinações de carregamentos

<i>Pressão interna</i>
<i>Esforço concentrado no bocal – Cortante X</i>
<i>Esforço concentrado no bocal – Cortante Z</i>
<i>Esforço concentrado no bocal – Fletor X</i>
<i>Esforço concentrado no bocal – Fletor Z</i>
<i>Esforço concentrado no bocal – Torção</i>
<i>Pressão interna + Esforço concentrado no bocal – Cortante X</i>
<i>Pressão interna + Esforço concentrado no bocal – Cortante Z</i>
<i>Pressão interna + Esforço concentrado no bocal – Fletor X</i>
<i>Pressão interna + Esforço concentrado no bocal – Fletor Z</i>
<i>Pressão interna + Esforço concentrado no bocal – Torção</i>

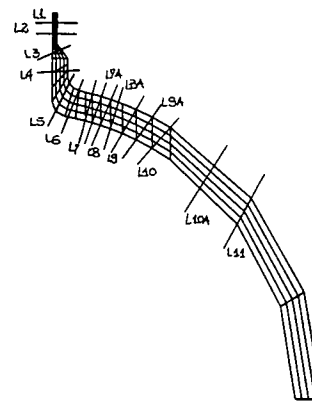
X e Z são direções indicadas nas Figuras 2 e 3

As análises elásticas foram feitas utilizando carregamentos unitários. Os resultados foram pós-processados utilizando os recursos do ANSYS para categorizar as tensões. Primeiramente foi feita a separação das tensões em parcelas de membrana e flexão utilizando os procedimentos de linearização de tensões por uma linha disponíveis no ANSYS. Esses procedimentos estão baseados nas referências [3]-[9].

Na Figura 4 estão mostradas as linhas escolhidas.



(a) Posição angular 0°



(b) Posição angular 90°

Figura 4: Linhas escolhidas para a linearização das tensões

Para as combinações de pressão interna e esforços concentrados a pressão foi fixada no valor da pressão de projeto de 12,3 MPa.

As análise elasto-plásticas foram feitas usando o material elástico perfeitamente plástico. O carregamento foi aplicado crescendo monotonicamente até que a não-convergência na solução ocorresse. A qualidade da resposta e da discretização da carga foi verificada pelo comportamento assintótico nas curvas força versus deslocamento. Assim, foram definidos os carregamentos de colapso e os respectivos modos de falha e as suas localizações. Utilizando as recomendações do código ASME os carregamentos admissíveis foram determinados por meio do fator 2/3.

Os resultados obtidos podem ser vistos nas Tabelas 3, 4 e 5.

Tabela 3: Pressões admissíveis

Análise	Pressão admissível (MPa)
Elasto-plástica	15.83
Elástica	15.53

Modo de falha: colapso plástico no costado

Tabela 4: Esforços concentrados no bocais admissíveis

Análise	Cortante X (N)	Cortante Z (N)	Fletor X (N mm)	Fletor Z (N mm)	Torção (N mm)
Elasto-plástica	6.09 E5	6.22 E5	1.64 E8	1.64 E8	1.90 E8
Elástica	5.39 E5	5.39 E5	1.43 E8	1.43 E8	1.64 E8

X e Z são direções indicadas nas Figuras 2 e 3
 Modo de falha: colapso plástico no bocal

Tabela 5: Esforços concentrados no bocais admissíveis com uma pressão interna de 12,3 MPA

Análise	Cortante X (N)	Cortante Z (N)	Fletor X (N mm)	Fletor Z (N mm)	Torção (N mm)
Elasto-plástica	4.83 E5	4.83 E5	1.52 E8	1.52 E8	(*)
Elástica	4.79 E5	4.66 E5	1.27 E8	1.23 E8	1.42 E8

(*) Não foi processado devido a limitações computacionais
 X e Z são direções indicadas nas Figuras 2 e 3
 Modo de falha: colapso plástico no bocal

VASO METÁLICO DE CONTENÇÃO NUCLEAR ESFÉRICO

A estrutura foi modelada como pode ser visto na Figura 5.

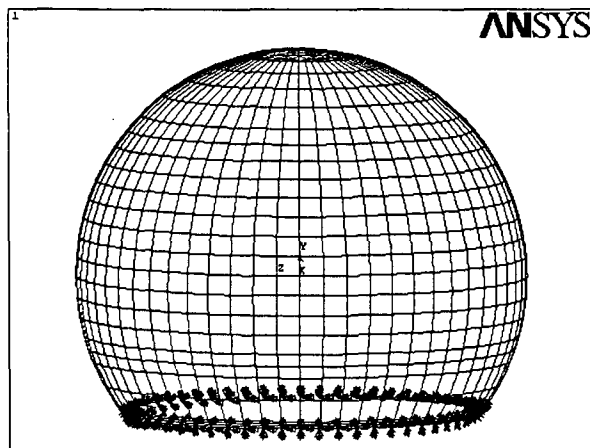


Figura 5: Modelo em elementos finitos do vaso metálico de contenção nuclear esférico

As características do material são:

Módulo de elasticidade	$E = 1,95E5 \text{ MPa}$
Coefficiente de Poisson	$\nu = 0,3$
Massa específica	$\gamma = 7850 \text{ kg/m}^3$

As principais dimensões do vaso metálico são:

raio R	28 m
espessura t	30 cm
distância do engastamento d (a partir do centro da esfera)	17 m

O modelo foi discretizado com elementos de casca facetados, com 3 ou 4 nós e 6 graus de liberdade por nó.

O peso próprio da casca esférica foi simulado através da aplicação da aceleração de 1 g ($9,8 \text{ m/s}^2$), atuando verticalmente para baixo em todos os elementos do modelo.

A subpressão de 30 mbar ($0,003 \text{ N/mm}^2$), cujo aparecimento está previsto após o acidente de perda de refrigerante chamado LOCA (*Loss of Coolant Accident*), foi simulada através da aplicação de pressão atuando de fora para dentro da casca esférica, em todos os elementos do modelo, como se fosse pressão externa.

O sismo foi simulado através de um carregamento estático equivalente, com a aplicação de aceleração em todos os elementos do modelo, como descrito a seguir. De acordo com o *Regulatory Guide 1.60* [10], para simular o carregamento sísmico com aceleração de período nulo do espectro de resposta de 1 g (aceleração da gravidade) deve-se aplicar 1 g nas duas direções horizontais (X e Z no modelo) e 2/3 de 1 g na direção vertical (Y no modelo). As direções X, Y e Z estão indicadas na Figura 5. Na direção Y, portanto, foi aplicada em todos os elementos do modelo a aceleração de $6,53 \text{ N/mm}^2$ (igual a 2/3 de $9,8 \text{ m/s}^2$), verticalmente para baixo, por ser esse o sentido que acarreta a pior situação para o caso estudado, que é o aparecimento de tensões de compressão. Para simular as acelerações horizontais ortogonais foi aplicada na direção X, em todos os elementos do modelo a aceleração de $13,86 \text{ N/mm}^2$ ($9,8\sqrt{2} \text{ N/mm}^2$).

Para fazer a avaliação de instabilidade foram utilizados os procedimentos do Code Case N-284-1 [xxx]. Os carregamentos descritos acima foram combinados em dois casos de carregamento CC1 e CC2. O CC1 é composto de peso próprio + sismo SBO, que é o Sismo Básico de Operação. O SBO é previsto para ser suportado pela estrutura até 10 vezes e por isso faz parte da condição de projeto da instalação. O CC2 é composto de peso próprio + subpressão + sismo SDS, que é o Sismo de Desligamento Seguro. O SDS tem que ser suportado pela estrutura uma única vez e por isso faz parte da condição de acidente da instalação, assim como a subpressão.

A notação utilizada é a mesma do Code Case N-284-1 e não será descrita novamente, aqui. Os passos seguidos foram:

(Passo 1) Determinação das Componentes de Tensão

As componentes de tensão utilizadas na aplicação do Code Case N-284-1 a cascas esféricas são as tensões principais σ_1 e σ_2 , sendo σ_1 a mais negativa delas. Serão retiradas do modelo de elementos finitos descrito anteriormente. Tem que ser feita uma investigação quando

Tabela 6: Valores Admissíveis para o Carregamento Sísmico em termos de Aceleração de Período Nulo do Espectro de Resposta

Posição	SBO	SDS
engastamento	0,51 g	0,82 g
raio máximo	2,87 g	3,80 g
entre raio máximo e topo	2,35 g	3,12 g
topo	2,57 g	3,50 g

g – aceleração da gravidade (9,8 m/s²)

CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS

Para o caso das análises elasto-plásticas e categorização de tensões em análises elásticas em modelos com elementos sólidos tridimensionais de uma conexão de bocal radial cilíndrico com costado cilíndrico sob carregamentos de pressão interna e esforços concentrados no bocal, a geometria estudada, modelada com elementos finitos sólidos 3D, é de grande interesse devido a dificuldade de aplicar de modo direto os procedimentos de categorização de tensões do Código ASME. A questão a ser respondida é *como usar critérios baseados em tensões generalizadas em cascas para verificar partes de um vaso de pressão que não tem geometria de casca, nas análises elásticas?* A utilização de análises elásticas com os procedimentos e recomendações indicados são aceitáveis pois os resultados mostram uma boa aderência com os obtidos nas análises elasto-plásticas.

Para o caso da avaliação da instabilidade estrutural em um modelo de elementos de casca tridimensional de um vaso metálico de contenção nuclear esférico sob carregamentos sísmicos, de pressão externa e de peso próprio, pode-se estimar que os níveis de aceleração sísmicas atuantes em termos de aceleração de período nulo do espectro de resposta sejam, para o SOB, da ordem de até 0,15 g, para a cota do engaste do vaso metálico no concreto, e amplificados para até 0,60 g, no topo. No caso do SDS, os valores estimados são da ordem de até 0,25 g e 1,0 g, respectivamente. Pode-se notar, portanto, que os valores admissíveis dados são maiores que os atuantes, indicando que o vaso metálico de contenção nuclear está adequadamente dimensionado quanto à flambagem, para as combinações de carregamento consideradas.

Nos dois casos há uma simplicidade aparente de procedimentos de avaliação. Pode-se afirmar que isso decorre em grande parte pelas facilidades disponíveis no ANSYS tais como as opções da biblioteca de elementos; os recursos de pré-processamento para a construção de modelos 3D, sólidos e de cascas; os recursos para a solução de problemas lineares e não-lineares (no caso, análises elasto-plásticas); e os recursos de pós-processamento para combinação de resultados de diversas combinações de

carregamentos, para seleção de resultados de interesse, para a linearização de tensões em modelos de elementos sólidos e para o tratamento de resultados de acordo com as verificações a serem feitas. Assim, foi possível a elaboração de roteiros de análise e a sua automatização necessários para as verificações feitas.

REFERÊNCIAS

- [1] ASME, 1999, ASME BPV Code, Section III, ASME, New York, NY.
- [2] ASME, 1999, ASME BPV Code Section VIII, Division 2, ASME, New York, NY.
- [3] Kroenke, W. C., 1974, "Classification of Finite Element Stresses According to ASME Section III Stress Categories", Proc. of the 94th ASME Winter Annual Meeting, ASME, New York, NY, pp. 107-140.
- [4] Kroenke, W.C., Addicott, G. W., Hinton, B. M., 1975, "Interpretation of Finite Element Stresses According to ASME Section III", ASME Tech. Paper 75-PVP-63, ASME, New York, NY.
- [5] Hechmer, J. L. & Hollinger, G. L., 1991, "The ASME Code and 3D Stress Evaluation", Journal of Pressure Vessel Technology, 113, pp.481-487.
- [6] Hechmer, J. L. & Hollinger, G. L., 1994, "Three Dimensional Stress Evaluation Guidelines Progress Report", Recertification and Stress Classification Issues, PVP-Vol. 277, ASME, New York, NY, pp. 95-102.
- [7] Hechmer, J. L. & Hollinger, G. L., 1997, "3D Stress Criteria (Phase 2): Guidelines for Application", PVRC Grant 91-14, Final Report (Rev. 2a).
- [8] Hechmer, J. L. & Hollinger, G. L., 1989, "Code Evaluation of 3D Stress on a Plane", Codes and Standards and Applications for Design and Analysis of Pressure Vessels and Piping, PVP-Vol. 161, ASME, New York, NY, pp. 33-46.
- [9] Pastor, T. M. & Hechmer, J. L., 1994, "ASME Task Group Report on Primary Stress", Recertification and Stress Classification Issues, PVP-Vol. 277, ASME, New York, NY, pp. 67-78
- [10] USNRC (United States Nuclear Regulatory Commission), 1973, Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants. Regulatory Guide 1.60. USNRC, Washington, DC, EUA.



CENTRO DE ENGENHARIA NUCLEAR

Mecânica Estrutural

Projeto por Análise de Vasos de Pressão: Exemplos de Utilização do ANSYS

Artigo Científico
P&D.CENM.CENM.010.00
ARTC.001.00

AUTOR	Rubrica	Data	VERIFICADOR	Rubrica	Data
Miguel Mattar Neto	<i>mw</i>	13/11/00	Carlos Alexandre de Jesus Miranda	<i>cajm</i>	13/11/00

APROVAÇÕES			Rubrica	Data
Chefe de Área	Miguel Mattar Neto		<i>mw</i>	13.11.00
Lider de Projeto	Miguel Mattar Neto		<i>mw</i>	13.11.00
Gerente do Centro	José Augusto Perrotta		<i>jp</i>	14/11/00

ARQUIVO			

Título	Projeto por Análise de Vasos de Pressão: Exemplos de Utilização do ANSYS
Tipo	Artigo em conferência
Autor(es) e Afiliação	Miguel Mattar Neto - IPEN-CNEN/SP
Número de páginas	06
Publicado em	CD com trabalhos do X Seminário de Elementos Finitos & Encontro de Usuários do Programa ANSYS, sem numeração de páginas
ISBN	Não tem

IPEN/CNEN-SP
BIBLIOTECA
"TEREZINE ARANTES FERRAZ"

Poste 5
TC
C
nyerete
OK

Formulário de envio de trabalhos produzidos pelos pesquisadores do IPEN para inclusão na
Produção Técnico Científica

AUTOR(ES) DO TRABALHO:

Miguel Mattar Neto

LOTAÇÃO: CENM

RAMAL: 9437

TIPO DE REGISTRO:

art. / períod.:
cap. de livro

Publ. IPEN
Art. conf

resumo
outros
(folheto, relatório, etc...)

TITULO DO TRABALHO:

Projeto por análise de vasos de Pressão:
Exemplos de utilização do ANSYS

APRESENTADO EM: (informar os dados completos - no caso de artigos de conf., informar o título
da conferência, local, data, organizador, etc..)

Seminários de Elementos Finitos & Encontro
de Usuários do Programa ANSYS 07-08 novembro, 2000.

PALAVRAS CHAVES PARA IDENTIFICAR O TRABALHO:

(preparar na INTERNET)

ASSINATURA:

Jander A. Aste

DATA:

17, 11, 00

7122