

DETERMINAÇÃO DE TENSÕES EM CONEXÕES BOCAL-VASO UTILIZANDO MODELOS EM ELEMENTOS FINITOS

Miguel Mattar Neto

IPEN-CNEN/SP - Divisão de Equipamentos e Estruturas
Travessa R, 400
05598-900 - São Paulo, SP, Brasil
e-mail: mmattar@net.ipen.br

Levi Barcelos de Albuquerque

CTMSP - Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo - Divisão de Estruturas
Av. Prof Lineu Prestes, 2242
05598-900- São Paulo, SP, Brasil
e-mail: lbalbuqu@net.ipen.br



RESUMO

O "projeto por análise" de vasos de pressão e tubulações na Seção III e Divisão 2 da Seção VIII do Código ASME postula diferentes verificações de tensões associadas aos diferentes modos de falha. Um item importante no projeto de vasos de pressão, de acordo com as mencionadas seções do Código ASME, é a separação e classificação de tensões para fazer as verificações requeridos. Tal categorização de tensões e avaliação dos seus limites tornam-se mais complicados para estruturas com geometrias e condições de carregamentos complexos usando modelagem em elementos finitos sólidos. Saliencia-se que a avaliação das tensões é usualmente baseada em análises elásticas, permitindo alguma plastificação localizada. No entanto, há também opções no Código ASME para usar análise plástica. Assim, neste trabalho mostra-se a avaliação do projeto de bocais cilíndricos em vasos esféricos sob pressão interna comparando os resultados de análises elástica e elasto-plástica em elementos finitos e suas relações com os limites do ASME.

1. INTRODUÇÃO

A análise de vasos de pressão é feita, em grande parte do mundo, com base nos requisitos de projeto do Código ASME (ASME, 1969). Até o início da década de 60, o ASME preconizava o uso de regras de projeto com base na análise de descontinuidades de cascas e vigas. Em tal "projeto por regras", como chamado, estavam embutidos coeficientes de segurança adquiridos com a experiência.

A extensão dos conceitos até então usados aos projetos de vasos de pressão nucleares, que exigem um maior cuidado por causa dos requisitos de segurança e proteção ao ambiente, trouxe à tona as vantagens de uma análise mais detalhada das tensões solicitantes. A partir deste ponto, passou a ser

adotado, na Seção III e Divisão 2 da Seção VIII do Código ASME, um procedimento chamado de 41 projeto por análise", em que as tensões deveriam ser conhecidas pela sua localização, distribuição, origem e tipo, sendo feita uma relação entre elas (tensões) e os modos de falha que deveriam evitar. As categorias de tensões foram dados limites admissíveis, com base no colapso plástico, usando-se as mencionadas análises de descontinuidades de cascas e vigas. Com o Critério de Resistência de Tresca, ou da Máxima Tensão de Cisalhamento, estes limites são dados em função das tensões S1, diferença algébrica entre o maior e menor valor das tensões principais numa seção, S1 e S3, respectivamente. Os critérios e requisitos em que se baseiam os limites admissíveis do Código foram descritos em (ASME, 1969).

Por outro lado, neste mesmo tempo, as tecnologias de análise tiveram um estrondoso avanço devido ao avanço dos programas de computadores e, dentre eles, principalmente àqueles com base no método dos Elementos Finitos (EF), que passaram a ter uso generalizado. Em tal método, os resultados são obtidos em função dos valores de tensões nos nós dos vários elementos utilizados para representar o contínuo em estudo.

Dessa forma, as relações entre estes resultados de EF e os limites de tensões do ASME, baseados nas análises descontínuas, não são evidentes. No caso de modelos axissimétricos, que são muito utilizados nas análises de vasos de pressão, existem no ASME algumas recomendações. Estas recomendações não cobrem todos os casos e, além disso, quando se usam modelos tridimensionais de EF se tornam de menor eficácia.

IPEN-DOC- 3881

Para estudar tais problemas, foram instituídos pelo PVRC (Pressure Vessel Research Council) alguns grupos de pesquisas. As geometrias mais complicadas foram listadas, como estabelecido em Kroenke et al., 1985, e a posteriori, o trabalho foi dividido em 3 fases distintas, em que o grau de dificuldade aumentaria da primeira para a terceira delas Hechmer e Hollinger, 1991. As análises aqui descritas são do mesmo tipo das desenvolvidas na "fase 2" de tal organização. Esta fase inclui a implementação das "considerações de médio prazo", divididas em 4 áreas nas quais é necessário definir diretrizes. O assunto aqui estudado refere-se às duas primeiras áreas, a saber: Área I - Relações entre os mecanismos de falha e as categorias de tensões e, Área II As tensões apropriadas para cada categoria de tensão. Dentro de tal contexto, o objetivo é, então, estabelecer por meio de comparações entre os resultados de análises elásticas e limites de EF algumas relações entre os requisitos do "projeto por análise" e tais resultados e, além disso, comparar diferentes maneiras de obter as categorias de tensões. Para tanto, foi escolhida uma das geometrias de interesse listadas em Hechmer e Hollinger, 1994.

Neste trabalho, é analisada a região de interface de um vaso de pressão esférico com um bocal radial cilíndrico. Foi feito um modelo parametrizado da mencionada região, variando-se as suas dimensões em três grupos distintos. Dessa forma, pesquisa-se, também, as relações com as variações dimensionais do problema. O modelo feito é axissimétrico e foi submetido a carregamento de pressão interna. Os resultados das análises com fórmulas simples de cascas, análises elásticas e limite de EF são confrontados e são discutidas algumas opções quanto à categorização das tensões em linhas, seguindo algumas das recomendações e conclusões citadas pelo Código ASME, 1989 e também pelas referências Hechmer e Hollinger, 1991, Hechmer e Hollinger, 1994, Mattar Neto et al., 1995 e Bezerra et al., 1995.

2. ANÁLISES EFETUADAS

Este trabalho mostra as análises efetuadas numa geometria típica de vasos de pressão, a saber, a região da interface entre um vaso esférico e um bocal radial cilíndrico. Primeiramente, as pressões de colapso são determinadas por meio de fórmulas simples de tensões em cascas, para três dimensões diferentes da mencionada região. Depois, por meio de modelos de EF, são feitas análises limites obtendo-se as cargas de colapso. Finalmente, são feitas as análises elásticas, classificando as tensões obtidas em várias "linhas de tensões" diferentes e com diferentes metodologias, no que se refere à categorização, obtendo-se também uma carga de colapso admissível através dos limites do ASME.

3. MODELOS EM ELEMENTOS FINITOS

Para as análises efetuadas foi escolhida, como já mencionado, a região de interface de um vaso de pressão esférico com seu bocal radial cilíndrico. Objetivando ter idéia de como a geometria possa interferir nos resultados, foram escolhidos três grupos de dimensões diferentes para a região de interesse, mantendo-se para o bocal o mesmo raio e espessura. As interseções esfera-bocal receberão aqui os nomes mnemônicos de R500., R990 e R3000, correspondendo aos vasos cujos raios internos (R) são, respectivamente, 500 mm, 990.25 mm e 3000 mm. Na Tabela 1 estão indicadas as dimensões gerais dos vasos. Notar que na região de interface existe um reforço na casca (vaso), definido conforme ASME, 1989. Na Tabela 1

R é o raio do vaso; t a espessura do vaso, tR a espessura do reforço, Rb o raio do bocal e tb a espessura do bocal

O carregamento solicitante é o de pressão interna. Para proceder às análises elásticas e limites (elasto-plásticas) foi feito um modelo axissimétrico parametrizado (nas dimensões). O vaso foi representado até uma distância no entorno de $3\sqrt{R}$ (R, raio interno e t, espessura do vaso). O modelo foi feito usando-se elemento sólidos axissimétricos, com 4 nós e 2 graus de liberdade por nó (deslocamentos transversais). Na extremidade truncada do vaso foram aplicadas as vinculações adequadas. Como o bocal foi também truncado, aplicaram-se na sua extremidade as forças de fechamento decorrentes da pressão interna.

Tabela 1. Dimensões dos Vasos Analisados (em mm)

VASO	R	t	tR	Rb	tb
R500	500	5	15	48	6
R990	990.25	9.5	19	48	6
R3000	3000	30	45	48	6

As propriedades materiais usadas foram: módulo de Young, $E = 200,91E3$ MPa, coeficiente de Poisson, 0,3; tensão de escoamento, $S_y = 262$ MPa e tensão SI de projeto, $S_m = 160$ MPa. Nas análises elasto-plásticas foi assumida elasticidade perfeita do material, sem encruamento.

Nas análises elásticas foi aplicada a pressão interna de 1,0 MPa com as correspondentes forças de fechamento no bocal., num único caso de carregamento. Para as análises elasto-plásticas, a pressão interna foi incrementada monotonicamente até se atingir o valor de colapso. A pressão de colapso foi caracterizada pela não convergência da solução de EF e pelo comportamento assintótico observado nas curvas deslocamento versus pressão aplicada.

4. RESULTADOS

Usando as fórmulas simples de cálculo de tensões em cascas, admitindo que a máxima tensão ocorrerá na casca, as pressões de colapso (pc) foram obtidas da seguinte forma: $pc = 2tSy/(R + t/2)$; onde R e t são os raios internos e as espessuras dos vasos esféricos. Os valores encontrados são mostrados na Tabela 2. Usando um coeficiente de segurança de 2/3 ASME, 1989 as pressões admissíveis (padm) foram calculadas e também são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Pressão de Colapso (MPa) - Fórm. de Cascas

VASO	pc	padm
R500	5.214	3.476
R990	5.003	3.335
R3000	5.214	3.476

Dos resultados das análises elasto-plásticas as pressões de colapso e as pressões admissíveis, usando o coeficiente de segurança de 2/3 (ASME, 1989), são apresentadas na Tabela 3. Como mencionado, nesta análise a pressão de colapso foi caracterizada pela não convergência da solução de EF e também pelo comportamento assintótico das curvas pressão aplicada versus deslocamentos nodais.

Tabela 3. Análises Elasto-plásticas - Pressões em MPa

VASO	pc	padm
R500	5.205	3.470
R990	4.935	3.290
R3000	5.190	3.460

Nas análises elásticas, foi aplicada uma pressão interna de 1,0 MPa em cada modelo. Nestes casos, as tensões devem ser separadas e classificadas (primárias - de membrana e flexão - e secundárias) para posterior comparação com os limites admissíveis do ASME. Para a obtenção destas categorias de tensões foi seguido o procedimento de separação e linearização de tensões em 7 linhas, baseado nas recomendações encontradas em Hechmer e Hollinger, 1991 para a definição de linhas de classificação de tensões (SCL). Vale lembrar que neste caso, as linhas na verdade correspondem a "planos" de classificação, já que os modelos são axissimétricos. Foi escolhida uma linha no bocal (L1), duas linhas no reforço, inclinadas em relação a este (L2 e L3) e quatro linhas no vaso distando, respectivamente, $0,1 \sqrt{Rt}$, $0,5 \sqrt{Rt}$, $1,0 \sqrt{Rt}$, $2,5 \sqrt{Rt}$ em relação ao bocal (L4, L5, L6 e L7). As tensões SI de membrana (σ_m), de flexão (σ_b) e de membrana + flexão (σ_m+b) encontradas nas sete linhas foram, em cada caso, multiplicadas pela pressão de colapso correspondente (das análises limites, Tabela. 3) e os valores encontrados são mostrados na Tabela 4. Salienta-se que esta tabela apenas apresenta os resultados de tensões obtidos por meio da utilização do procedimento de separação de tensões. Em seguida, foram feitas as classificações de tais tensões de acordo com as categorias do Código ASME.

A categorização destas tensões foi feita com 2 abordagens diferentes para cada uma delas. Para a tensão de membrana, primeiro se considerou, conservadoramente, que todas elas sejam primárias generalizadas, Pm e depois, considerou-se que elas sejam primárias localizadas, Pl. Para as tensões de membrana + flexão, foi primeiro considerado que elas sejam

primárias, PI + Pb, e posteriormente que sejam primárias e secundárias, P + Q. Usando os limites de tensões admissíveis do ASME para cada um destes tipos de tensões, a saber: $P_m \leq S_m = 160 \text{ MPa}$, $PI + Pb \leq 1.5S_m = 240 \text{ MPa}$, $P + Q \leq 3S_m = 480 \text{ MPa}$, as pressões admissíveis correspondentes a cada linha foram proporcionalmente calculadas e os valores encontrados são resumidos nas Tabelas. 5 e 6.

São mostradas na Tabela. 7 as pressões admissíveis em cada linha considerando uma categorização das tensões de acordo com uma abordagem menos conservadora. Nas linhas L1, L6 e L7, as tensões de membrana são consideradas como Pm. Nas linhas L2 a L5, as tensões de membrana são classificadas como PI e as tensões de membrana + flexão são consideradas como PI + Pb ou P + Q. Resumidamente os valores mínimos das cargas de colapso, em cada um dos tipos de análises e abordagens efetuadas, são mostrados na Tabela. 8.

5. CONCLUSÕES

Observa-se na Tabela 8 que as pressões admissíveis calculadas pelas fórmulas simples de cascas e pelas análises elasto-plásticas em EF são bastante próximas. Pode ser afirmado, então, que o colapso que ocorre na casca, é devido a tensão de membrana Pm e poderia, portanto, ser determinado através das fórmulas simples. Nas análises elásticas, se se considerar as tensões na linha L6 como Pm, encontram-se pressões admissíveis entre 77% e 90% dos resultados das análises elasto-plásticas. Considerando as linhas L4, L5 e L6 (ver Tabela 4), que distam $0,1 \sqrt{Rt}$, $0,5 \sqrt{Rt}$ e $1,0 \sqrt{Rt}$ do bocal, observa-se que todas as tensões de membrana estão próximas ao limite recomendado pelo ASME para categorização como

Tabela 4. Tensões SI (MPa) das Análises Elásticas

LINHA	R500, pc = 3.47			R990, pc = 3.29			R3000, pc = 3.46		
	σ_m	σ_b	σ_m+b	σ_m	σ_b	σ_m+b	σ_m	σ_b	σ_m+b
L1	22.57	3.24	24.53	28.39	3.23	31.62	29.51	3.32	32.83
L2	149.45	97.68	246.58	177.56	118.31	295.71	222.62	164.21	381.64
L3	141.37	99.07	240.33	164.96	127.29	290.61	192.51	186.81	372.99
L4	132.55	92.02	223.02	149.04	98.07	246.98	157.91	107.23	265.11
L5	203.48	124.26	273.23	187.27	101.63	246.45	178.54	43.18	199.16
L6	206.78	45.91	218.64	191.91	30.40	197.86	178.43	8.02	179.27
L7	174.61	11.91	186.23	172.76	6.28	179.14	174.04	3.64	177.461

Tabela 5. Pressões Admissíveis (MPa) usando os Limites de Tensões de Membrana

LINHA	R500			R990			R3000		
	tensão	padm		tensão	padm		tensão	padm	
	σ_m	Pm	PI	σ_m	Pm	PI	σ_m	Pm	PI
L1	22.57	24.60	36.90	28.39	18.54	29.03	29.51	18.76	28.14
L2	149.45	3,715	5.572	177.56	2,965	4,481	222.62	2.487	3.730
L3	141.37	3,297	5.891	164.96	3,191	4,787	192.51	2.876	4.314
L4	132.55	4,189	6.283	149.04	3,532	5,298	157.91	3.506	5.259
L5	203.48	2,729	4.093	187.27	2,811	4,217	178.54	3.101	4.651
L6	206.78	2,685	4.028	191.91	2,743	4,115	178.43	3.103	4.654
L7	174.61	3,180	4.770	172.76	3,047	4,571	174.04	3.181	4.771

Tabela 6. Pressões Admissíveis (MPa) usando os Limites de Tensões de Membrana + Flexão

LINHA	R500			R990			R3000		
	tensão	padm		tensão	padm		tensão	padm	
	σ_m+b	PI+Pb	P + Q	σ_m+b	PI+Pb	P + Q	σ_m+b	PI+Pb	P + Q
L1	24.53	33.95	67.90	31.62	24.97	49.94	32.83	25.29	50.59
L2	246.58	3.377	6.755	295.71	2.670	5.340	381.64	2.176	4.352
L3	240.33	3.465	6.931	290.61	2.717	5.434	372.99	2.226	4.453
L4	223.02	3.734	7.468	246.98	3.197	6.394	265.11	3.132	6.265
L5	273.23	3.048	6.096	246.45	3.204	6.408	199.16	4.170	8.339
L6	218.64	3.809	7.618	197.86	3.991	7.981	179.7	4.632	9.264
L7	186.23	4.472	8.944	179.14	4.408	8.816	177.46	4.679	9.359

Pm ou PI (1,1 Sm = 176 MPa) ou em valores superiores a este limite. A categorização destas tensões como PI leva a valores de pressões de colapso admissíveis maiores que o calculado nas análises elasto-plásticas (de 108% a 128%). Quanto às somas de tensões de membrana e flexão, nota-se nas linhas L4 e L5 (Tabela 4), uma tensão de flexão mais acentuada, principalmente nos vasos R500 e R990. A limitação das tensões de membrana + flexão ao limite de tensões primárias desta categoria (PI + Pb) leva a pressões admissíveis entre 88% e 97% dos resultados das análises elasto-plásticas. No entanto, é provável que pelo menos uma parte das tensões de flexão nesta região é devida à descontinuidade estrutural em si, e, portanto, tais parcelas deveriam ser categorizadas como tensões secundárias. Fazendo isto, ou seja, categorizando as tensões de membrana + flexão como P + Q, aumentam-se bastante os valores das pressões admissíveis, como se vê na Tabela 7 (entre 176% e 194%).

Tabela 7. Pressões admissíveis (MPa) e. cada linha considerando limites do ASME

Linha	Categoria	R500	R990	R300
L1	Pm	24.60	15.54	18.76
L2	PI	5,572	4.481	3.730
	PI+Pb	3,377	2.670	2.176
	P+Q	6,755	5.340	4.352
L3	PI	5,891	4.787	4.314
	PI+Pb	3,465	2.717	2.226
	P+Q	6,931	5.434	4.453
L4	PI	6,283	5.298	5.259
	PI+Pb	3,734	3.197	3.132
	P+Q	7,468	6.394	6.265
L5	PI	4,093	4.217	4.651
	PI+Pb	3,048	3.204	4.170
	P+Q	6,096	6.408	8.339
L6	Pm	2,685	2.743	3.103
L7	PM	3,180	3.047	3.181

Tabela 8. Pressões Admissíveis (MPa)

VASO	Form. simples	An. Limite	Análise elástica			
			Pm	PI	PI + Pb	P+Q
R500	3.476	3.470	2.685	4.093	3.048	6.096
			L6	L5	L5	L5
R990	3.335	3.290	2.743	4.217	2.670	5.340
			L6	L5	L2	L2
R3000	3.476	3.460	3.103	3.730	2.176	4.352
			L6	L2	L2	L2

Nas linhas L2 e L3, nota-se que a categorização das tensões de membrana como PI leva a pressões admissíveis entre 107% e 170% dos resultados da análise elasto-plástica. Nestas linhas (Tabela 4) também há tensões de flexão acentuadas. A categorização das tensões de membrana + flexão como PI + Pb, ou P + Q, leva a pressões admissíveis entre 63% e 100% e 126% e 200% dos valores das análises elasto-plásticas. Ressalta-se, no entanto, que tais linhas não são as mais adequadas para se analisar, baseando-se no fato, discutido em Hechmer e Hollinger, 1991, de que provavelmente as distribuições de tensões de cisalhamento nestas linhas devem ser não parabólicas e matematicamente aumentarem os valores das tensões de flexão.

Diante destes fatos, conclui-se que (linhas L4 a L7):

a) A categorização das tensões de membrana como Pm levam a pressões admissíveis razoavelmente conservadoras comparadas com as análises no regime elasto-plástico. Além

disso a confrontação dos resultados das análises elasto-plásticas com os resultados de fórmulas simples confirma que Pm pode ser calculada por tais fórmulas, nos vasos aqui analisados,-

b) A categorização das tensões de membrana como PI levam a projetos não conservadores e portanto é não adequada para os vasos analisados.

c) A categorização das tensões de membrana + flexão como PI+Pb leva a pressões admissíveis também com conservadorismos razoáveis;

d) A categorização das tensões de membrana + flexão, como P + Q, leva a pressões admissíveis maiores que os das análises elasto-plásticas, sendo portanto inadequada,-

e) Para os vasos analisados, mesmo com as dimensões diferentes, não houve alterações significativas dos resultados obtidos e das conclusões de um caso para outro. Esta ocorrência pode ser explicada pelo fato de ter sido utilizada a mesma abordagem para o dimensionamento das espessuras das cascas e dos reforços, dada em ASME, 1989.

6. REFERÊNCIAS

- ASME, "Criteria of the ASME Boiler and Pressure Vessel Code for Design by Analysis in Sections III and VIII, Division 2", The American Society of Mechanical Engineers, New York, NY, 1969.
- ASME, "ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III, Division 1, Subsection NB, Class 1 Components", The American Society of Mechanical Engineers, New York, NY, 1989.
- Bezerra, L. M.; Cruz, J. R. B.; Miranda, C. A. J. and Mattar Neto, M., "Interpreting ASME Limits and Philosophy in FEA of Pressure Vessel Parts", Proceedings of the 13th SMiRT, Vol. 2, pp. 13-18, Porto Alegre, Brazil, 1995.
- Hechmer, J. L. and Hollinger, G. L., "Three Dimensional Stress Criteria", PVP - vol. 210-2, pp. 181-191, The American Society of Mechanical Engineers, New York, NY, 1991.
- Hechmer, J. L. and Hollinger, G. L., "Three Dimensional Stress Evaluation Guidelines Progress Report", PVP - vol. 210-2, pp. 95-102, The American Society of Mechanical Engineers, New York, NY, 1994.
- Kroenke, W. C.; Hechmer, J. L.; Hollinger, G. L. and Pedani, A. J., "Component Evaluation Using Finite Element Method", PVP - A Decade of Progress, pp. 145-160, The American Society of Mechanical Engineers, New York, NY, 1985.
- Mattar Neto, M., Miranda, C. A. J., Cruz, J. R. B. and Bezerra, L. M., "Stress Assessment of a Component Using 3D Finite Element Models", Proceedings of the 13th SMiRT, Vol. 2, pp. 3-12, Porto Alegre, Brazil, 1995.

SUMMARY

The "design by analysis" of pressure vessels and piping in ASME Code Sections III and VIII, Division 2 postulates distinct stress verification associated with distinct failure modes. An important issue in the design of pressure vessels according the above mentioned sections of the ASME Code is the stress separation and classification to perform the required verification. In this paper we show the design evaluation of a radial cylindrical -nozzle in a spherical vessel under internal pressure. The results of elastic and elastic-plastic finite element analyses are presented and discussed considering stress separation and classification and the ASME Code requirements.