

da parte. Os vasos esféricos armazenam líquidos e gases em geral com temperaturas abaixo do ambiente e até -45 °C. O objetivo deste artigo é mostrar de maneira sucinta uma análise de tensões que são submetidos os vasos esféricos comparado a vasos cilindros com as mesmas condições operacionais.

2. DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS

Os vasos de pressão esféricos são utilizados para armazenar e processar líquidos e gases, tais como GLP, Hidrogênio, Butadieno e outros, normalmente abaixo da temperatura ambiente.

A pressão interna de fluido ou gás contido na esfera atua perpendicular a parede do vaso, atuando uniformemente sobre toda sua superfície interna.

As principais tensões que ocorrem em um vaso de pressão esférico são a tensão tangencial $\sigma_t = \sigma_1 = \sigma_2$ e a tensão radial σ_r . (1)

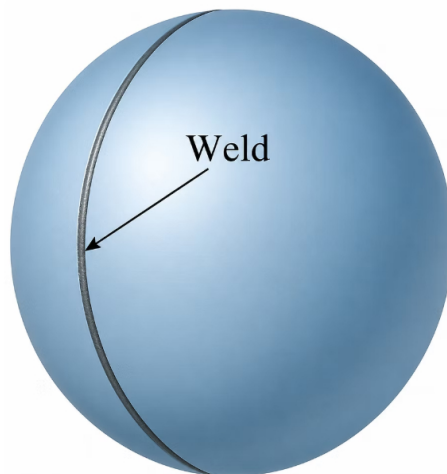
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
Ler mais →

Artigos
Artigos que ampliam o conhecimento
Ler mais →

Novidades Técnicas
Informação atualizada para quem atua, constrói e transforma.
Ler mais →

Notícias
Fique por dentro das novidades do CREA-RS
Ler mais →

Figura 1 – Fonte – (GERE, 2004) Vaso esférico.



Os vasos de pressão devem ter uma placa de identificação fornecida pelo fabricante onde deve constar informações mínimas como, fabricante, número de identificação, ano de fabricação, pressão máxima de trabalho admissível, código de construção e ano de edição. Também o fabricante deve fornecer o prontuário (data-book) com a documentação referente a sua fabricação, como: especificação dos materiais, procedimentos utilizados na fabricação, metodologia para estabelecimento da PMTA (Pressão Máxima de Trabalho Admissível), entre outros. A (BRASIL, 2022) informa os dados exigidos para o fornecimento da placa de identificação e prontuário.

Com os dados da placa e prontuário, são refeitos os cálculos de construção do vaso.

2.1 Materiais, temperatura de projeto, pressão de projeto e tensão admissível

A tensão tangencial gerada pela pressão de projeto deve ficar abaixo da tensão de escoamento do material. Para aço carbono ou aço baixa liga utiliza-se a tabela UCS-23 do Código ASME B31.

Ao escolher aço tabelado, a tabela fornece a tensão admissível do material em relação à temperatura de projeto. Quando há diferentes temperaturas, diferentes pressões e diferentes tensões admissíveis, através de cálculo é escolhida a condição mais severa em relação à tensão admissível, para assim determinar a pressão, a temperatura e a tensão admissível do projeto. Observa-se no cálculo que a norma ASME permite acrescentar de 30 a 50 °C as temperaturas.

Para tensões de projeto assume-se que as falhas em um vaso de pressão sujeitas à pressão interna ocorrem por tensões de tração que acontecem tangencialmente às paredes do vaso.

As tensões de projeto conforme (MOTT; UNTENER, 2018), para pressão constante podem ser baseadas na tensão de escoamento do material, sendo a equação dada por $\sigma_d = S_y/N$ onde σ_d = tensão de projeto; S_y =tensão de escoamento e N = fator de projeto que é frequentemente ditado por normas devido ao perigo oferecido quando o vaso de pressão falha, particularmente para gases e vapor sob pressão. Na ausência de normas específicas é possível usar $N=4$ como valor mínimo e maiores para aplicações onde há incerteza nas condições de operação e propriedades do material. Outra prática sugerida é limitar a pressão interna do vaso em não mais de 1/6 da pressão onde ocorrerá a ruptura, colapso (explosão) do vaso, isso relaciona a tensão de projeto a tensão de tração do material, que é mostrado na equação $\sigma_d = S_u/N$ ou $S_u/6$ onde S_u = tensão de tração. Também, utiliza-se $N=8$ no mínimo para relacionar resistência à fadiga do material.

2.2 Formato de vasos de pressão

Os formatos mais comuns são cilíndricos e esféricos. Este estudo foca na comparação entre ambos, com base nas tensões internas. As equações de cálculo variam conforme o formato e são apresentadas na Tabela 1.

Figura 2 - Fonte autor – foto de Vaso de pressão cilindro semiesférico, cidade de Townsend -MT-USA (2023).



Figura 3 - Vaso esférico-Petrobras



2.3 Equações de análises de tensões para vasos cilíndricos e esféricos

A Tabela 1 apresenta as equações para vasos de parede fina conforme ASME B31 (TELLES, 1999).

Tabela 1 – Equações para vasos esféricos e cilíndricos parede fina

	Esférico	Cilíndrico
σ_1 circunferencial	-	$P \times D_m/2 \times t$
σ_2 longitudinal	-	$P \times D_m/4 \times t$
σ_3 radial	-P	-P
$\sigma_1=\sigma_2$ tangencial	$P \times D_m/4 \times t$	-
PMTA	$P=2 \times Sh \times E \times t/R+0,2 \times t$	$P=Sh \times E \times t/R+0,6 \times t$
Espessura t	$t=(P \times R/2 \times Sh \times$	$t=(P \times D_o) / 2(Sh \times E + PY) + C$ ou $t=$

	$E+P)+C$	$(P \times di) / 2(Sh \times E + P \times Y-P)+C$
PTH	$1,3 \times PMTA$	$1,3 \times PMTA$
PSV	$= ou < PMTA$	$= ou < PMTA$

Onde t=espessura; P=pressão interna de projeto; Sh ou S=tensão admissível na temperatura de projeto; Do= diâmetro externo e di= diâmetro interno, R = raio interno.

No cálculo da espessura considerações como E, coeficiente de solda para tubos com costura que varia de 0,8 a 1,0 e para tubos sem costura E=1,0. (seções radiografadas)

Y= coeficiente de redução de acordo com o material e a temperatura do tubo.

C= soma das margens para corrosão, erosão, e aberturas de rosca e de chanfros.

C=0,05" para aço carbono. (TELLES, 1999).

O "E" não deve ser confundido com o modulo de Young dos materiais.

O módulo de Young quando utilizado nos cálculos será de 207 GPa conforme a AISC *American Institute for Steel Construction*.

2.4 Fabricação do vaso

Um dos métodos de fabricação da esfera é fabricá-la em "gomos", em operação de calandra. De grande importância na fabricação, são as operações de alívio de tensões após a conformação mecânica, pois ocorre encruamento do material e as operações de soldagem para unir as calotas ou hemisférios.

2.5 Espessura do vaso de pressão

O material, a tensão admissível e a espessura são os parâmetros mais importantes para o desenvolvimento dos cálculos ao adequar as normas. A espessura pode ser medida com ultrassom no caso de vasos em operação. Nos vasos em operação podem ocorrer estreitamento do diâmetro interno com a perda de espessura devido a corrosão, o que altera toda a planilha de projeto. A começar pela PMTA a pressão máxima de trabalho admissível e por consequência a regulagem da PSV pressure safety valve e do teste hidrostático.

Com a tensão admissível calcula-se a espessura e com o diâmetro médio verifica-se se o vaso se enquadra em vasos de parede grossa ou parede fina, pois há diferentes equações para os dois casos. Se $Dm/t > =20$ (Dm é diâmetro médio), vaso é de espessura fina, caso não atenda a relação a espessura é grossa.

2.6 PMTA

A tensão circunferencial gerada pela pressão da PMTA deve ficar abaixo da tensão de escoamento do material e igual à tensão admissível.

A PMTA de cada parte de um vaso e a pressão que causa na parte em questão uma tensão máxima igual a tensão admissível do material na temperatura de operação correspondente à parte considerada (TELLES, 1991).

2.7 PSV (Pressure Safety Valve)

A tensão tangencial gerada pela pressão da PSV deve ficar abaixo da tensão de escoamento do material.

A pressão regulada na PSV é igual ou inferior a pressão da PMTA calculada conforme (BRASIL, 2022).

2.8 Teste Hidrostático

A tensão circunferencial gerada pela pressão do teste hidrostático deve ficar abaixo da tensão de escoamento do material e logo acima da tensão admissível.

O teste hidrostático é um ensaio realizado em vasos de pressão para detectar se há vazamentos, rupturas, ou deformações significativas. Estes ensaios são realizados com equipamento fora de operação pressurizados com fluido incompressível, até uma grandeza 1,3 vezes à pressão máxima de trabalho admissível (PMTA), simulando uma situação mais rigorosa que a de operação normal para assim garantir que não haverá colapso do equipamento. Após 30 minutos de pressurização a pressão é reduzida em 1/3 e verifica-se visualmente se houve vazamento ou ruptura. O teste hidrostático é considerado não destrutivo exigido pela ASME e deve ser realizado sempre que um equipamento for fabricado, ou no campo antes do início de operação e observadas as disposições complementares da NR-13. Até o ano de 2004 esse teste usava o valor de 1,5 x PMTA, após a mudança na norma esse valor passou a ser 1,3 x PMTA.

2.9 Metodologia seguida de resultados demonstrativos em estudos de casos.

1 Cálculo de vaso esférico de parede fina (MOTT; UNTENER, 2018)

Cálculo de tensão na parede de um vaso de pressão esférico para armazenagem de nitrogênio. Diâmetro interno 300 mm, espessura de parede 1,5 mm, pressão interna 3,5 MPa. Solução: primeiro determinar se é considerado de parede fina ou parede grossa, através do cálculo do diâmetro médio $D_m = D_i + t$ onde $D_m = 300 + 1,5 = 301,5$ mm logo $D_m/t = 301,5/1,5 = 201$ e bem maior que 20 na relação $D_m/t > 20$ que define ser parede fina, se $D_m/t < 20$ seria parede grossa. A equação para o cálculo de parede fina é $\sigma = P \times D_m / 4 \times t$ $\sigma = 3,5 \times 301,5 / 4 \times 1,5 = 175,8$ MPa, observe-se que esse valor deve ser comparado com a tensão admissível do material, se não satisfizer o cálculo deve ser refeito adequando os parâmetros.

2.10 Cálculo de vaso esférico de parede grossa (MOTT; UNTENER, 2018)

O cálculo de um vaso de pressão esférico para armazenagem de hélio. Diâmetro externo 200 mm e diâmetro interno 160 mm, pressão interna 69 MPa. Cálculo da comprovação de parede fina ou grossa $D_m/t < 20$ $D_m = (D_e + D_i) / 2$ onde $D_m = 200 + 160 / 2 = 180$ e $t = D_m - D_i = 180 - 160 = 20$ logo $180 / 20 = 9$ logo comprovando ser parede grossa. Equação para esfera parede grossa: $\sigma = P (b^3 + 2 a^3) / 2(b^3 - a^3)$ $a = R_i$ raio interno e $b = R_e$ raio externo

$\sigma_1 = \sigma_2 = 69(1003 + 2 \cdot 803) / 2(1003 - 803) = 69(1000000 + 1024000) / 2(1000000 - 512000) = 139656000 / 976000 = 143,0$ MPa, observe-se que esse valor deve ser comparado com a tensão admissível do material, se não satisfizer o cálculo deve ser refeito adequando os parâmetros..

A tensão radial σ_3 e compressiva é igual a pressão interna aplicada. 69 MPa

$\sigma_3 = -69$ MPa. Considerando $N = 4$ pela ASME B31 tem-se: $S_u =$ tensão de tração do material, $S_y = N \times \sigma_1$ onde S_y é a tensão de escoamento do provável material logo $S_y = 4 \times 143 = 572$ MPa, onde de tabela obtém-se SAE 4140 OQT 1300 temperado em óleo e revenido, com tensão de escoamento 696 MPa e tensão de tração 814 MPa como sendo um dos prováveis materiais para fabricação. OQT (*oil quenched and tempered*).

Com a tensão máxima de tração extraído de tabela, calcular a provável pressão de explosão, com esses dados é concluído com a indicação da provável pressão de trabalho no tanque. (ASME, 2010)

Assumindo que o aço é SAE 4140 OQT 1300, com tensão de tração $S_u = 814$ MPa, calcula-se a pressão de explosão P_{ex} , igualando-se à tensão tangencial calculada σ_1 a tensão máxima de tração. Logo P (explosão) = $S_u \times 4 \times t / D_m$ onde $P = 814 \times 4 \times 20 / 180 = 361,7$ MPa.

O fator de projeto ϕ é usualmente aplicado na pressão de explosão afim de se obter a pressão de operação permitida, logo o vaso deverá ser limitado no máximo $361,7 / \phi = 60$ Mpa.

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Um vaso de pressão esférico possui maiores resistências internas à pressão que um vaso cilíndrico quando ambos têm a mesma espessura de parede, material e pressão interna.

Tensão tangencial na esfera: $\sigma_t = P \times D_m / 4 \times t$ tensão circunferencial no cilindro: $P \times D_m / 2 \times t$ (2)

Onde $D_m =$ diâmetro médio e $t =$ espessura do casco. Ou $\sigma = P \times R / t$ para cilindro e $\sigma = P \times R / 2 \times t$ para esfera, onde $R =$ raio interno. (3)

A esfera requer a metade ($1/2$) da parede do cilindro com a mesma resistência e condições.

Comprovação analítica com a comparação das equações.

$t_{\text{esfera}} / t_{\text{cilindro}} = P \times R / 2\sigma ; P \times R / \sigma ; = 1/2$ (4)

Ao comparar-se vaso de pressão esférico e vaso de pressão cilíndrico sob mesmas condições, verifica-se que a maior tensão no vaso esférico e a tensão tangencial está igual à tensão longitudinal no cilindro que é a metade da tensão circunferencial.

3.1 Diferença nas tensões induzidas

A resistência de um vaso de pressão está diretamente relacionada às tensões que ele suporta. Em um vaso de pressão de parede fina, a tensão circunferencial, que em esferas é chamada de tensão tangencial (hoop stress), é um dos principais fatores determinantes de projeto.

3.2 Implicação prática

Com uma tensão menor, praticamente a metade, a esfera pode suportar uma pressão interna maior sem atingir o limite de resistência do material. Significa ainda, que o tanque esférico poderia ser fabricado com chapa de menor espessura para as mesmas condições de trabalho.

3.3 Desvantagem

Ainda comparando os vasos esféricos oferecem maiores dificuldades de fabricação e de transporte do que vasos cilíndricos, por isso, na prática, a maioria dos vasos são construídos na forma cilíndrica.

3.4 Conclusão

Este trabalho, conforme o título, apresenta uma análise comparativa da tensão tangencial em um vaso de pressão esférico e em um vaso cilíndrico, ambos com o mesmo volume, espessura, material e submetidos à mesma pressão interna. Demonstra-se que o vaso esférico possui maior resistência a pressões internas em comparação ao vaso cilíndrico.

Em casos que envolvem análise de falhas de vasos de pressão, são necessárias verificações completas e aprofundadas, incluindo ensaios de dureza (HB, HRB, Vickers), análises metalográficas, radiográficas, difração de raios X e ultrassonografia. Também se faz indispensável uma inspeção minuciosa de todas as juntas e pontos de solda — procedimentos que compõem um roteiro típico de inspeção ou perícia técnica de vasos de pressão.

Atualmente, muitos softwares de engenharia são empregados para essas análises, frequentemente associados a métodos de elementos finitos e validados por ferramentas de Inteligência Artificial (IA). É importante ressaltar, contudo, que mesmo os sistemas de IA — incluindo chats e assistentes técnicos — devem ser considerados apenas ferramentas auxiliares. O Engenheiro especialista continua sendo o responsável por formular as perguntas corretas, interpretar os resultados e tomar as decisões técnicas adequadas.

Em termos de inspeção, o teste hidrostático é um dos ensaios mais rigorosos aplicáveis a vasos de pressão. Após o ensaio, a ausência de vazamentos ou deformações plásticas visíveis constitui um forte indício de integridade estrutural do vaso. Caso ocorra alguma falha, esta geralmente está associada à fadiga ou a falhas localizadas em componentes, sendo que a fadiga tende a manifestar-se em tensões abaixo do limite de escoamento do material.

Palavras-chave: Vasos de pressão cilíndricos. Vasos de Pressão Esféricos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASME - American Society of Mechanical Engineers, Boiler and Pressure Vessel Code, Section II Part D. New York, 2010.

BEER, F.P.; JOHNSTON, E.R., Jr; Resistência dos Materiais, 3 Edição, MAKRON Books, São Paulo, 2008.

GROEHS, Ademar Gilberto. Resistência dos Materiais e Vasos de Pressão. São Leopoldo. 2ª Ed. RS: Editora Unisinos, 2006.

HIBBELER, R. C. Resistência dos Materiais, 7ª ed. São Paulo, Pearson, 2010.

MOTT, Robert L, UNTENER, Joseph Applied Strength of Materials, SI Units Version 6th Edition, Boca Raton: Taylor & Francis, CRC press, 2018.

NR-13 Caldeira, Vasos de Pressão e Tubulação disponível em <http://trabalho.gov.br> acessado em 22.11.2017.

TELLES, Pedro C. da Silva. Vasos de Pressão. 2ª ed. Livros Técnicos e Científicos, 1996.



DOWNLOAD DO ARTIGO

0 comentários



Deixe sua mensagem