IV ENTEQ

IV Encontro Técnico de Tanques de Armazenamento e Esferas

Análise do Conceito de Ligação Frágil do API STD650 para Tanques de Armazenamento de Teto Fixo e Medidas Preventivas para Situações de Emergência

Autor: João Bosco Santini Pereira
AB-RE/ES/TEE

31/Outubro/2013

NP-1

Proteção de tanque de armazenamento atmosférico de teto fixo

A proteção contra sobrepressão ou vácuo de tanque deve atender às condições de operação normal e às situações de emergência.

O API STD650 remete ao API STD2000 as prescrições de proteção e o cálculo das vazões de alívio, para pressão ou vácuo excessivo.

Para tanque atmosférico a vazão de alívio na condição normal de operação deve ser calculada conforme norma API STD2000, de modo a não exceder as condições de projeto da tabela a seguir, que correspondem à pressão interna equivalente ao peso das chapas do teto.

Pressão interna e vácuo admissíveis em tanque atmosférico

Vácuo admissível	1 in H2O	25 mm H2O	0,25 kPa	2,5 mbar	0,04 psi
Pressão interna admissível	1,4 in H2O	37 mm H2O	0,35 kPa	3,5 mbar	0,05 psig

Alívio na condição normal de operação

- **Contração ou condensação de vapores causada por redução da temperatura atmosférica ou por vento ou chuva.**
- **Expansão e vaporização causada pelo aumento da temperatura atmosférica ou mudanças no tempo**

Alívio na condição de emergência

É a proteção para atender às situações de emergências.
Devem ser previsto dispositivos adicionais, para prover a vazão de alívio nas situações de pressão ou vácuo excessivo, isto é, acima das condições de projeto.

Alívio na condição de emergência

Situações de geração de aumento de pressão ou sobrepressão

1- Pressurização devido ao bombeamento excessivo de produto de entrada;

2- Vaporização do líquido por vazamento de vapor ou condensado de sistema de aquecimento interno do líquido;

3- Vaporização do líquido, incluindo o “flashing”, que pode ser significante se a temperatura do líquido estiver próxima do ponto de ebulição (“boiling point”) na pressão no tanque;

4- Mudança na temperatura da corrente de entrada para o tanque, que gera um “heat input”, pode resultar em sobrepressão no tanque.

5- Aumento da temperatura da corrente de vapor de aquecimento;

6- Falha no controle da pressão de fluido de inertização;

7- Falha do sensor da válvula termostática de controle de temperatura de aquecimento do liquido no tanque, resultando em rápida vaporização do líquido e gerando sobrepressão;

8- Falha no sistema de coleta de vapores do tanque, causando o bloqueio da saída dos vapores;

9- Falha de energia elétrica, afetando as válvulas motorizadas e controladores ou suspendendo o fornecimento de ar de instrumentação;

10- Reações químicas exotérmicas, gerando vaporização súbita;

11- Transbordamento do líquido por perda de controle de enchimento;

12- Produto transferido com gás pressurizado;

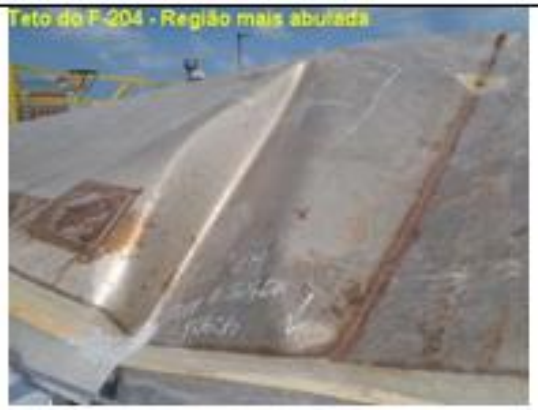
13- Água residual de lastro no fundo do tanque aquecida subitamente com líquido que entra em alta temperatura, acima de 150ºC, no interior do tanque.

14- Entrada de líquido com arraste de água com temperatura acima de 100ºC.

Ilustrações de casos dessas ocorrências

Pressurização por vaporização súbita de água residual o fundo do tanque

LUBNOR Tanque F-204 da LUBNOR
Havia lastro de água proveniente da manutenção do oleoduto de 16" para dentro do tanque, quando foi deslocado o produto à temperatura de 165°C.



Pressurização por bombeamento excessivo de produto de entrada

RLAM Tanque F-17B51C de armazenamento de teto fixo, para petróleo ou gasóleo. Disparo do bombeamento de entrada no tanque, que ultrapassou a vazão de projeto. As válvulas de alívio abriram, mas a vazão de alívio não foi suficiente e o tanque "estufou",

Pressurização por vaporização do líquido devido a vazamento de vapor ou condensado de sistema de aquecimento

REPAR Tanque TQ-63213
Vazamento de vapor de aquecimento do produto armazenado

Situações de geração de vácuo ou subpressão de emergência

a- Vácuo gerado com o bombeamento excessivo de produto de saída;

b- Condensação do vapor após a limpeza com vapor ("steam-out");

c- Condensação do vapor após a teste de estanqueidade com vapor ("leak test");

d- Resfriamento rápido do líquido armazenado com a entrada de produto mais frio, que pode causar condensação e contração que leva à geração de vácuo.

Condensação do vapor d'água após a teste de estanqueidade

Tanque (não identificado) em final de teste de estanqueidade com vapor d'água. Por falha de procedimento ou execução o tanque não foi "ventado", ao se concluir o teste. O vapor condensou, criando vácuo no interior do tanque

Outras situações de emergência

Situações de explosão pela ignição dos vapores internos potencialmente mais perigosas e destruidoras, por envolverem riscos de incêndio

Após sucessivos enchimentos e esvaziamentos do líquido no tanque, a **camada de vapores sobre a superfície em mistura com ar pode ficar entre os limites de inflamabilidade, ignitar e explodir, causando súbita pressurização interna.**

Essa sobrepressão pode ocorrer por explosão interna no tanque, devido à ignição dos vapores inflamáveis, causada por:

- Centelha de eletricidade estática dentro do tanque;
- Serviços de soldagem no ou próxima de tanque;
- Descarga atmosférica sobre o tanque;
- Fogo em um tanque adjacente ou próximo;
- Depósitos de sulfeto de ferro pirofórico incandescente dentro do tanque;
- Depósitos de coque incandescente em tanque de asfalto ou betumem.

Critério API para alívio na condição de emergência

O grande problema é a determinação da vazão de proteção para esses casos listados.

O API STD2000 só considera e apresenta fórmulas de cálculo do alívio de emergência, para a situação de fogo externo, em que há a vaporização do líquido e a expansão súbita do volume de gás, quando um tanque absorve calor do fogo e provoca a pressurização interna excessiva.

O próprio API STD650 12ª Edição estabelece que a ligação frágil satisfaça apenas o alívio de emergência para tanques expostos a fogo externo, deixando a consideração de proteção de outras causa de emergência pelo usuário.

E ainda que os tetos frágeis API não são intencionados para prover alívio de emergência, mesmo nas circunstâncias de alto risco, tais como fogo no interior do tanque, falhas de utilidades, reações químicas ou superenchimento.

Portanto, nessas situações, não há, no API, como estabelecer a vazão de alívio e a correspondente área mínima para o alívio.

Na prática, o que acontece é que para outras condições de sobrepressão, os tanques de armazenamento também devem atender a algum critério de “ligação frágil”, de preferência em bases semelhantes as do API, ou seja, na ligação teto-costado, para prevenir mal maior.

Necessidade de dispositivos adicionais de alívio de emergência

Quando a ligação teto-costado não atende à condição de “frágil”, o API requer o uso de dispositivos de alívio de emergência, conforme API STD 2000 6ª Edição ou ISO 28300.

Proteção nas condições em que a ligação teto-costado não é frágil conforme o API

a) Tanques com diâmetro nominal menor que 15 m (50 ft).

b) Tanques dimensionados pela API STD 650 atual Anexo F.

c) Tanques atmosféricos cuja ligação entre o teto e o costado não é uma ligação de baixa resistência mecânica.

d) Tanques que armazenam líquidos que possam provocar corrosão, condensação de vapores, polimerização ou qualquer outro efeito que seja capaz de bloquear as passagens existentes no corta-chama.

e) Tanques que armazenam produtos ultra viscosos aquecidos acima seu ponto de fulgor, com risco de entupimento por vapores que se solidificam nas sedes das válvulas ou nos elementos internos do corta-chama, provocando a pressurização ou vácuo no tanque.

f) Em tanques de Sistema de Recuperação de Vapores emitidos.

g) Para tanques em que na operação haja possibilidade de formação de sulfeto de ferro pirofórico ou coque incandescente.

Proteção de tanque para ligação teto-costado não frágil

Quando a ligação teto-costado é frágil, não é necessário considerar requisitos adicionais de dispositivos de emergência para proteção contra sobrepressão.

Por outro lado, é obrigatória a existência de dispositivos adicionais projetados conforme os requisitos do API STD 20000 ou ISO 28300, se a ligação entre teto-costado não pode ser considerada de baixa resistência mecânica.

- **Respiros abertos adicionais e de maior diâmetro;**
- **Válvulas de pressão e vácuo adicionais e de maior diâmetro;**
- **Tampa de bocal de medição calibrado para abrir sob pressão anormal;**
- **Tampa de boca de visita calibrada para abrir sob pressão anormal.**

O dispositivo de emergência mais recomendado é a tampa de emergência calibrada para abrir na pressão máxima de projeto instalada em boca(s) de visita do teto.

Ligação frágil teto-costado do API STD650

A sobrepressão pode ser excessiva, isto é, exceder a capacidade de alívio dos dispositivos instalados no tanque, para alívio normal. e ocasionar perda catastrófica da integridade estrutural do tanque.

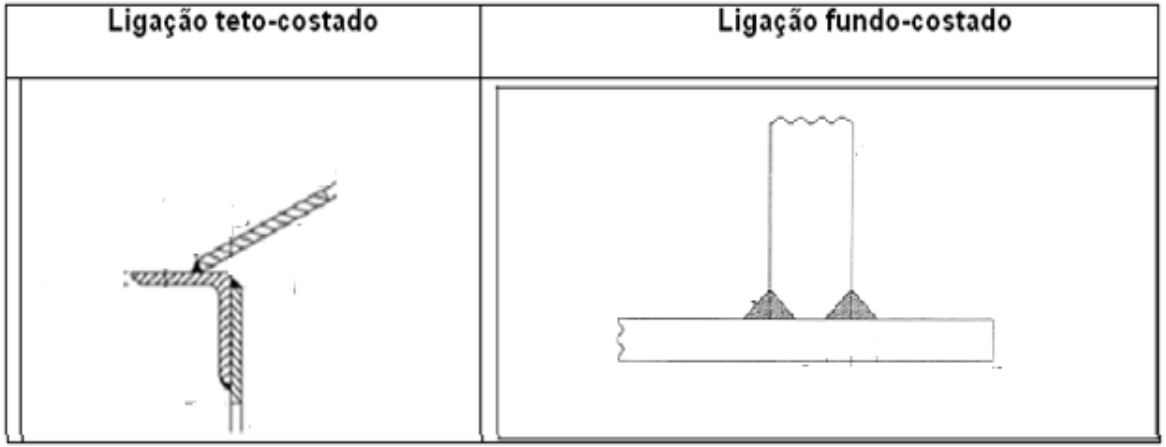
O modo mais indesejável de falha é o rompimento da ligação fundo-costado, que leva ao vazamento incontrolável e derramamento do fluido armazenado.

A proteção prevista pelo API STD 650 e normalmente utilizada em tanque de teto fixo, para a proteção contra a sobrepressão excessiva, é a "ligação frágil" ("frangible joint"), que consiste em ligação mecânica de baixa resistência entre teto e costado.

A garantia do comportamento do rompimento estrutural da ligação teto-costado, que deve falhar antes que qualquer outra solda do tanque, é fundamental para preservar a ligação fundo-costado, no evento de pressurização excessiva.

A ruptura da ligação frágil teto-costado deve prover abertura de uma grande área para alívio da pressão interna

Esquemas típicos de ligações teto-costado e fundo-costado



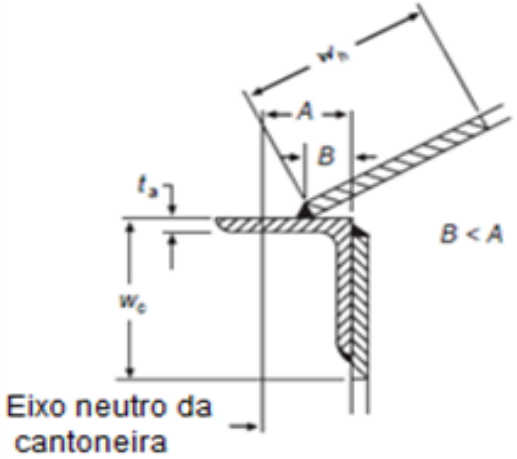
Análise estrutural da ligação frágil do API STD650

O API STD 650 estabelece os critérios de projeto da ligação entre teto-costado de modo a ser frágil, isto é, em caso de pressurização excessiva romper antes de qualquer outra parte do tanque.

Estruturalmente essa ligação age como um anel em compressão, sob o efeito da pressão interna, e dependendo da resistência desse anel pode ou não ser uma ligação é frágil.

- **O propósito é garantir as condições que assegurem a falha da ligação teto-costado antes da solda do rodo (ligação fundo-costado), em que o potencial de sérios problemas é maior.**
- **A ligação teto-costado se constitui dos elementos: trecho superior do costado, cantoneira de topo e periferia do teto.**
- **O anel de compressão é a região da junção teto-costado, dentro dos limites indicados, que é projetada para resistir aos esforços impostos pela pressão interna.**

Ligação teto-costado típica do API STD 650: anel de compressão



Quando a construção do anel de compressão da ligação teto-costado atende às "condições de proteção como ligação frágil", dispositivos adicionais de alívio de emergência não são requeridos.

A experiência com falhas reais indica que há flambagem local na ligação teto-costado, mais no teto que no costado, e provavelmente ocorre quando a tensão de compressão circunferencial excede a de escoamento do material no anel de compressão.

$Wh = 0{,}3\ (R_2.t_h)^{0,5}$ ou 300 mm (o que for menor)

$Wc = 0{,}6\ (Rc.t_c)^{0,5}$

Análise histórica da ligação frágil teto-costado conforme API STD650

As regras de projeto do API STD650 se aplicam aos tanques soldados cilíndricos verticais, acima do solo, de teto fixo cônico suportado, próprios para pressão atmosférica ou para baixas pressões Anexo F).

Ao longo das edições do API STD650, desde a 1ª (Dezembro/1961) até a atual 12ª (Julho/2013), os requisitos de construção da ligação frágil foram sendo modificadas.

Requisitos comuns em todas as edições

- **A chapa do teto deve ter espessura de 5 mm (3/16");**
- **Declividade do teto cônico suportado 3/4 pol X 12 pol (1:16) ou maior, até 1:6, se especificado pelo comprador;**
- **O teto deve ser soldado em cima da cantoneira de topo do costado, com uma solda de filete simples, contínua, sobre o topo da chapa do teto e não maior que 5mm (3/16”);**
- **Não é permitida nenhuma solda abaixo da chapa do teto, nem mesmo solda de selagem;**
- **As chapas não devem ser soldadas às vigas de apoio do teto.**
- **Todos os membros na região da ligação teto-costado, incluindo anéis de isolamento, devem ser considerados como contribuintes da área de compressão.**

Análise histórica da ligação frágil teto-costado conforme API STD650

Requisitos adicionados em cada edição

- A partir da 2ª Edição (1964) requer proteção adicional para teto com declividade maior que 2 pol. x 12 pol. (1/6);
- A partir da 3ª Edição (1966) surgiram o Apêndice F e construção do anel de compressão da ligação teto-costado conforme a Figura F-1 do Apêndice F;
- A partir da 6ª Edição (1979) a limitação da Área máxima para o anel de compressão da ligação teto-costado;
- A partir da 10ª Edição (2005) surgiu a limitação de Diâmetro ≥ 50 ft (15,25 m);
- Nas 11ª (2012) e 12ª (2013) Edições os tanques foram classificados por faixas de diâmetros para a aplicação dos requisitos:

  Diâmetro ≥ 50 ft (15,25 m);

  Diâmetro 9m (30 ft) ≤D<15 m (50 ft) e altura do tanque ≥ 9m (30 ft);

  Diâmetro < 50 ft (15,25 m) sem limitação de altura.

Por que o API STD650 alterou as suas regras para ligação frágil teto-costado?

Ocorrências que questionaram o API

Razão história

Nas décadas de 80 e 90, após uma série de acidentes com tanques atmosféricos de teto fixo, em que a proteção contra a pressão interna excessiva, a conhecida e tradicional ligação frágil, não funcionou.

Alguns pesquisadores se debruçaram na análise e possíveis soluções dessas ocorrências.

Fato real na Petrobras

Acidente com tanque de soda ocorrido em 2006 no final das obras da URFCC (U-300) da REFAP.
A unidade iniciava alguns testes e ocorriam vários condicionamentos.
O tanque estava com a válvula de alívio "raqueteada" e foi alinhado com Nitrogênio de pressão de 7 kgf / cm²,
A "ligação frágil" não rompeu e o tanque já pressurizado, soltou da base de concreto e foi lançado em alguns metros acima do nível do solo, sobre o "pipe-rack".

Ações corretivas do API

Os principais refinadores questionaram os requisitos do API STD650, que decidiu envolver-se nesses estudos, a partir das conclusões dos pesquisadores.

Foram emitidas duas publicações do API, que indicam resultados semelhantes, a partir de programas de análise de tensões por elementos finitos.

API PUBLICATION 937 - April, 1996

Evaluation of Design Criteria for Storage Tanks With Frangible Roof Joints

- As análises de tensões foram realizadas com o programa API-TANK de elementos finitos, desenvolvido pelos próprios pesquisadores e verificado com o uso do programa ANSYS para validação.
- Foram modelados os tanques com diâmetros de 15ft a 120ft, com alturas variando de 15ft a 45ft, dimensionados conforme API STD650.
- As pressões internas foram determinadas, a partir da análise de tensões, e também calculadas com as regras do API STD650, para as seguintes situações:

  Pressão que provoca o “up-lift”do tanque;

  Pressão que leva ao limite de escoamento da ligação teto-costado;

  Pressão que leva ao limite de escoamento na ligação fundo-costado.
- Foram consideradas as condições de tanque completamente vazio e completamente cheio de produto.

Ações corretivas doo API

API PUBLICATION 937-A - August, 2005

Study to Establish Relations for the Relative Strength of API 650 Cone Roof Roof-to-Shell and Shell-to-Bottom Joints

- **Nesta publicação é descrito o uso do programa chamado SafeRoof, desenvolvido pelo mesmo grupo responsável pelo API-TANK, agora sob o patrocínio do API - American Petroleum Institute e do PVRC - Pressure Vessel Research Council, para avaliar o comportamento estrutural das "ligações frágeis".**
- **O programa SafeRoof é mais completo que o API-TANK e inclui além da análise de tensões, considerando diferentes critérios de falha, módulos de pré e pós-processamento.**
- **Utilizando-se o programa SafeRoof versão 2.1, foram avaliados diferentes tanques, com diâmetros variando de 20ft a 120ft e alturas variando de 20ft a 48ft, dimensionados conforme o API STD 650, sendo determinadas as pressões internas máximas.**
- **As ligações teto-costado e fundo-costado foram simuladas no programa desenvolvido pelo API e as análises foram:**

  Análise linear elástica de grande deformação sem flambagem da seção sob compressão das ligações teto-costado e fundo-costado;

  Análise linear elástica de grande deformação com flambagem da seção sob compressão das ligações teto-costado e fundo-costado.
- **Considerou-se tanque vazio, pela metade e cheio, e testadas várias hipóteses de critérios de falha.**

Análise da Publicação API 937A

Programa SafeRoof : verificação da falha em tanques

Intuitivamente, como demonstrado em vários acidentes com tanques de diâmetros pequenos, a resistência do anel de compressão é maior, que a prevista pelo API, permitindo pressões internas mais elevadas.

Com base em vários relatórios das causas de falhas de tanques de pequeno diâmetro (inferiores a 20 m), em eventos de pressurização interna, ocorridos até a década de 90, o próprio API decidiu investigar mais profundamente o critério da "ligação frágil".

Premissas das análises pelo SafeRoof

Foram simulados 13 tanques, com detalhamento das ligações teto-costado e fundo-costado, no programa SafeRoof desenvolvido pelo API.

Características dos tanques analisados

- **diâmetros de 20 a 120 ft e alturas de 20 a 48 ft.**
- **teto cônico suportado com declividade comum de 1:16;**
- **espessura das chapas do teto de aço Carbono igual a 3/16" (5 mm);**
- **cantoneira de topo conforme API STD650.**
- **tanque vazio, pela metade e cheio.**

Programa SafeRoof : verificação da falha em tanques

Pressões internas determinadas

A pressão interna de falha das ligações teto-costado foi calculada e avaliada por dois critérios:

a- Falha puramente por escoamento da ligação teto-costado

- O critério de estabelecimento da pressão de falha é o escoamento da seção comprimida da ligação teto-costado, ou seja, do anel de compressão.

b- Falha por flambagem (“buckling”) localizada da ligação teto-costado

- Após o início do escoamento, no elemento de menor resistência, ocorre a flambagem localizada, que causa o embicamento da cantoneira de topo, e a ruptura da solda da ligação teto-costado, em larga extensão da ligação.

As pressões internas determinadas foram:

- Pressão requerida para o início do “up-lift”;
- Pressão requerida para a falha da ligação teto-costado;
- Pressão requerida para a falha da ligação fundo-costado.

Programa SafeRoof – Pressões resultantes

Para tanques vazios

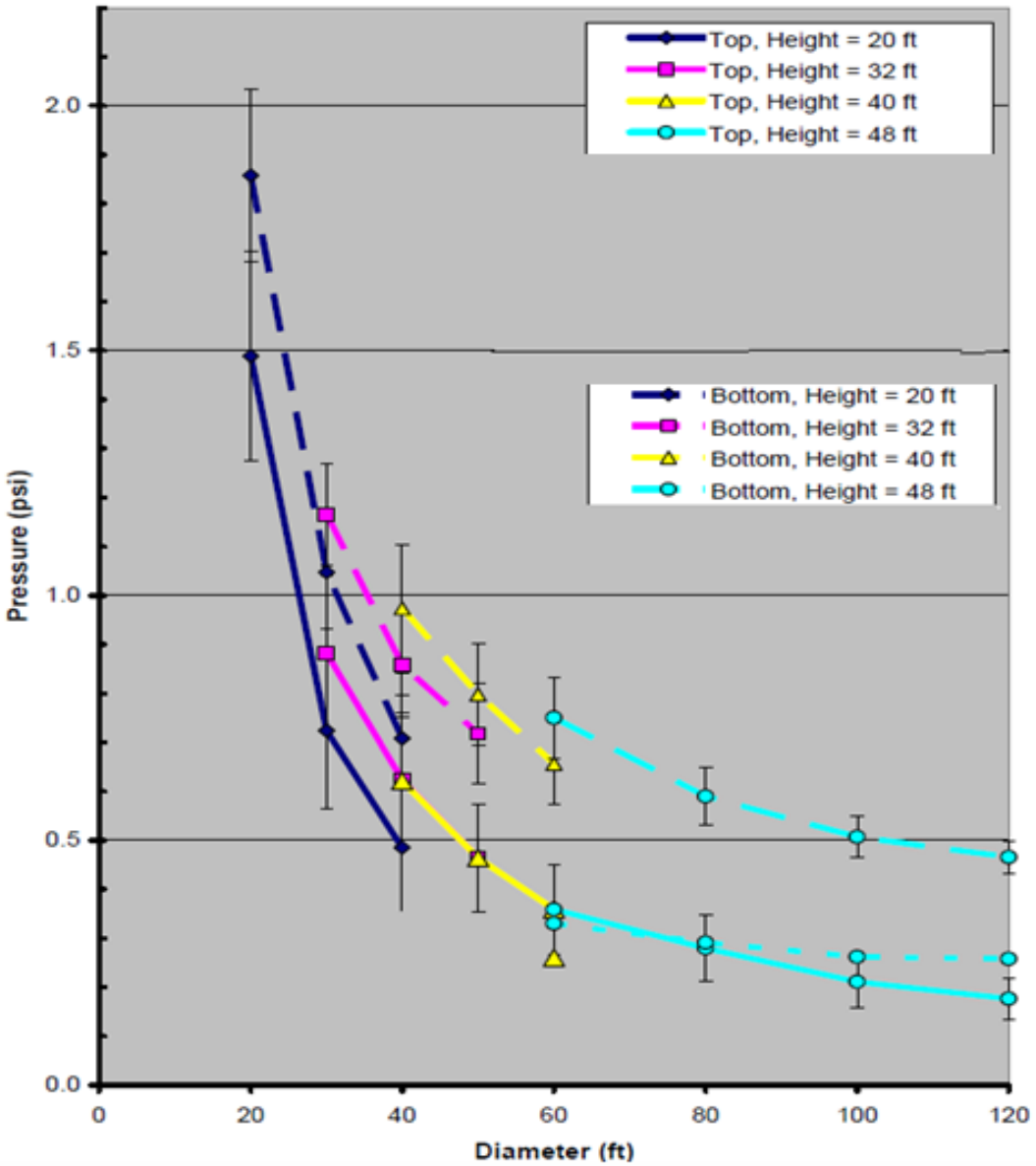
- Pressão requerida para a falha da ligação teto-costado;
- Pressão requerida para a falha da ligação fundo-costado.

As linhas cheias ━━━ pressões de ruptura da ligação teto-costado.

As tracejadas ━ ━ ━ pressões de ruptura da ligação fundo-costado

Dimensões dos tanques: D x H(ft)

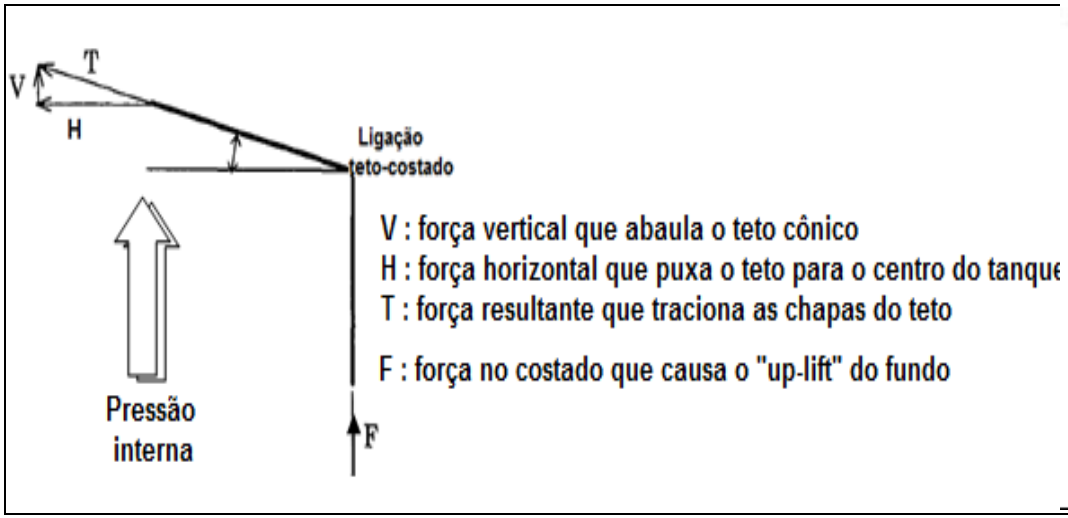
20x20; 30x20; 30x32; 40x20; 40x32; 40x40; 50x32; 50x40; 60x40; 60x48; 80x48; 100x48; 120x48

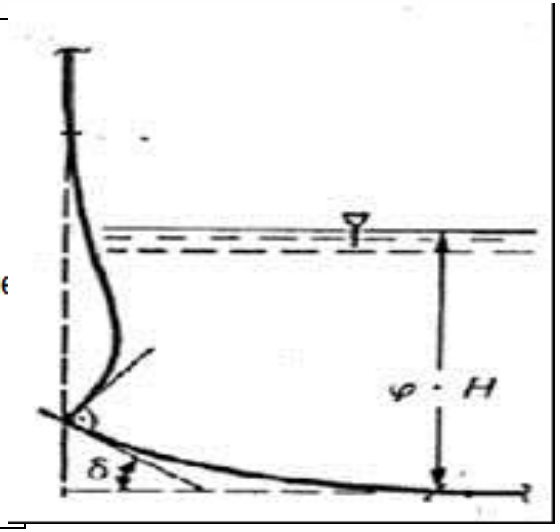


Principais conclusões das análises pelo SafeRoof

- **Ambas as ligações trabalham em compressão circunferencial.**
- **Na ligação teto-costado, a compressão circunferencial surge devido à deformação e abaulamento para cima do teto, sob a pressão interna, que puxa a ligação teto-costado para o interior do tanque.**
- **Como o teto cônico suportado é relativamente plano, ângulo de 3,5º (declividade 1:16), o abaulamento do teto gera tensões de compressão circunferencial elevadas, mesmo em baixas pressões.**
- **Na ligação fundo-costado o comportamento é semelhante, isto é, também fica sob compressão circunferencial, devido ao arredondamento do fundo e levantamento ("up-lift") do costado, que arrasta a ligação fundo-costado para dentro do tanque.**

Esquemas do comportamento das ligações teto-costado e fundo-costado





Principais conclusões das simulações no SafeRoof

- Para os tanques vazios a pressão de falha da ligação teto-costado e a do fundo-costado são aproximadamente de mesmo valor, particularmente para os tanques de diâmetro pequeno, embora o "up-lift" já seja considerável.

Nas condições de tanque cheio, a pressão de falha da ligação teto-costado permanece a mesma do tanque vazio.

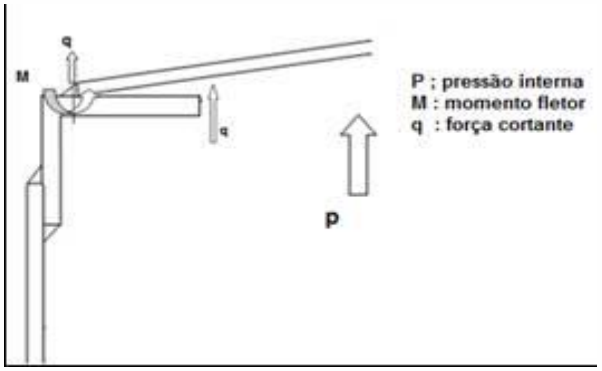
Por outro lado o "up-lift" é menor e consequentemente a pressão de falha da ligação fundo-costado é maior, ou seja, o peso do produto reduz as tensões na ligação fundo-costado

Portanto, para o projeto a condição de tanque vazio é a mais crítica ou predominante.

- Na pressurização interna, surgem tensões secundárias, devido à atuação de momento fletor e forças cortantes, provenientes do efeito do abaulamento do teto.

O escoamento inicia, somente em parte da seção do anel de compressão, a de material de menor resistência, e a ligação teto-costado ainda resiste ao aumento da pressão.

Esforços localizados na ligação teto-costado

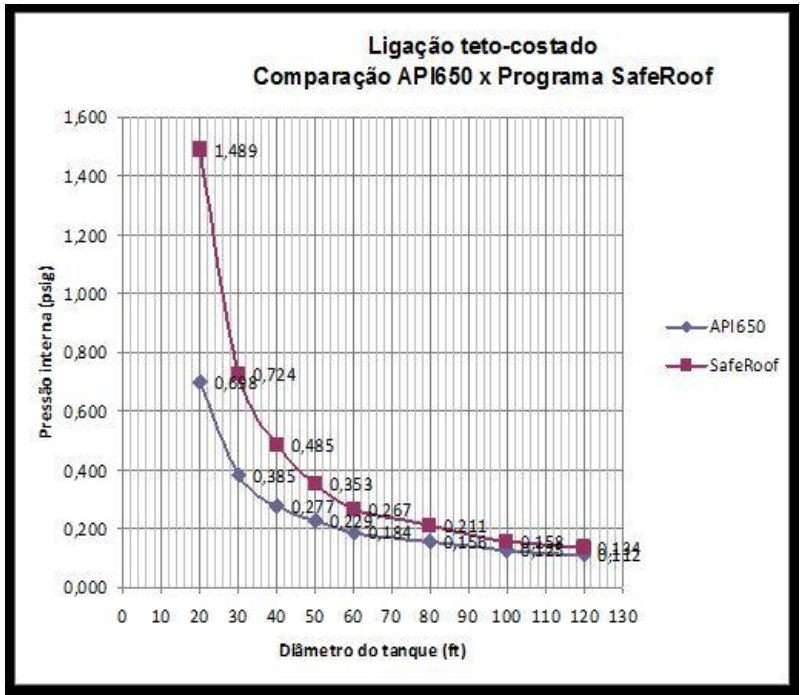


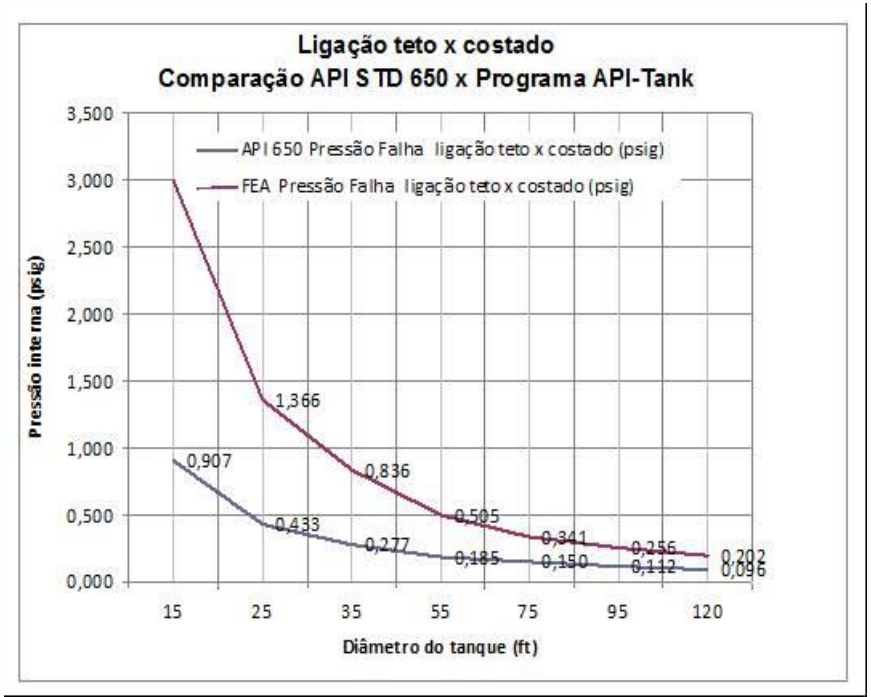
Com o aumento da pressão interna, a ligação ou anel de compressão continua a deformar-se (teoria das grandes deformações), até que o escoamento se estende a toda a seção do anel de compressão, que não suporta mais o esforço, flamba localmente e ocorre a ruína estrutural.

Comentários sobre os resultados

- As pressões de falha da ligação teto-costado, por escoamento seguido de flambagem, calculadas pelos programas de análise de tensões, com a técnica dos elementos finitos, API-TANK e SafeRoof, são, significativamente, maiores que as calculadas conforme API STD 650, para tanques de pequeno diâmetro (inferiores a 20 m).
- Para estes tanques, os cálculos do API STD650 estão subdimensionados, isto é, a pressão de falha calculada é inferior à pressão real e, como a falha da ligação teto-costado é necessária para prover o alívio da pressão, o tanque está sob risco de falha de outro componente ou solda.
- Por estes resultados, fica claro que o critério do API STD650, para a "ligação frágil" só é válida para tanques de diâmetro acima de 24 m (80 ft), no entanto a linha de corte do API STD650 é 15 m (50 ft).

Comparação pressões internas API STD650 com as dos SafeRoof e API-TANK





Modificações das regras do API STD650

Os resultados do API Publication 937A subsidiaram as revisões introduzidas nas edições do API STD650, a partir da 10ª Edição.

Alteração da fórmula de Área máxima da ligação frágil

O critério de falha do API STD650 para a ligação frágil, até a 9ª Edição era o de escoamento e plastificação de toda a seção , para qualquer diâmetro de tanque.

A fórmula da limitação da área admissível da seção do anel de compressão, usava uma tensão de escoamento única, para todo anel de compressão, igual a 32000 psi (220 MPa).

Até a 9ª Edição (1997)	**10ª Edição** (2005)	**11ª (2012) e 12ª Edição (2013)**
$A = \frac{0.153W}{30{,}800 \tan\theta}$ W: peso próprio do costado e acessórios do costado tanθ: declividade Tensão de escoamento embutida na fórmula: 32000 psi	$A = \frac{W}{201{,}000 \tan\theta}$ W: peso próprio do costado e acessórios do costado e do teto tanθ: declividade Tensão de escoamento embutida na fórmula: 32000 psi	$A = \frac{DL_s}{2\pi F\gamma \tan\theta}$ DLs: peso próprio do costado e acessórios do costado e do teto tanθ: declividade Fy: limite de escoamento do material de menor resistência entre os componentes do anel de compressão

Enquanto na realidade, para os tanques de pequeno diâmetro, o escoamento inicia no componente mais fraco do anel de compressão, e é progressivo até a ocorrência da flambagem local.

Modificações das regras do API STD650

Convivência com"up-lift"

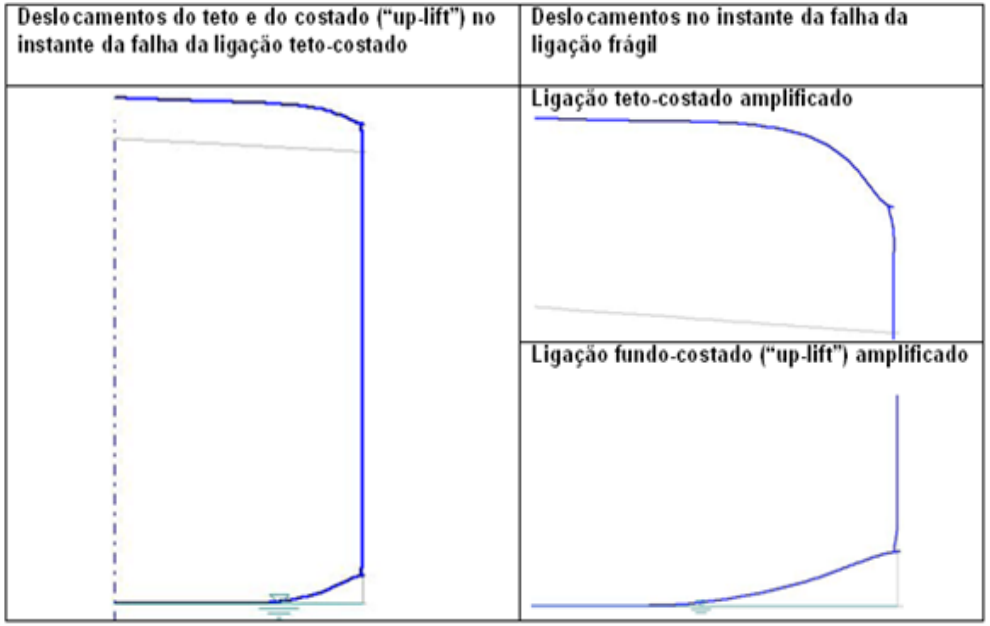
As regras anteriores API650 admitiam que não ocorrendo o "up-lift" no costado do tanque, a ligação fundo-costado estaria segura, portanto a ligação teto-costado deveria falhar em pressão inferior a que causaria o início do "up-lift".

As análises dos programas API-TANK e SafeRoof mostraram essa hipótese é válida, para tanques de grande diâmetro, ou seja, a ligação teto-costado falha antes do "up-lift".

Porém, para tanques menores, o "up-lift" ocorre antes da falha da ligação teto-costado, e nesses tanques há o risco da ligação fundo-costado romper.

Gráficos gerados pelo programa SafeRoof

A consideração de que o "up-lift" do costado acontece e é admissível, até certo limite, sem comprometer o fundo do tanque, obrigou ao API a reavaliar a resistência da ligação teto-costado. Assim, o API STD650 a partir da 11ª Edição (Fev/2012), passou a considerar para tanque com diâmetro menor que 15 m (50 ft), que bocais, bocas de visita e acessórios do costado devem acomodar no mínimo 100 mm (4pol) de "up-lift" sem romper.



Risco de rompimento da ligação fundo-costado

Também na seção da ligação fundo-costado agem forças compressivas circunferenciais, que no evento da pressão interna podem levar ao limite de escoamento e flambagem dessa seção.

- A falha da região fundo-costado é causada pela tensão circunferencial de compressão, oriunda do “up-lift”, ou seja, do arredondamento da região, que leva ao trincamento e rompimento, e não é necessariamente no cordão, mas na ZTA da solda no costado.

- Este mecanismo é, porém influenciado pelo nível de produto armazenado no tanque.

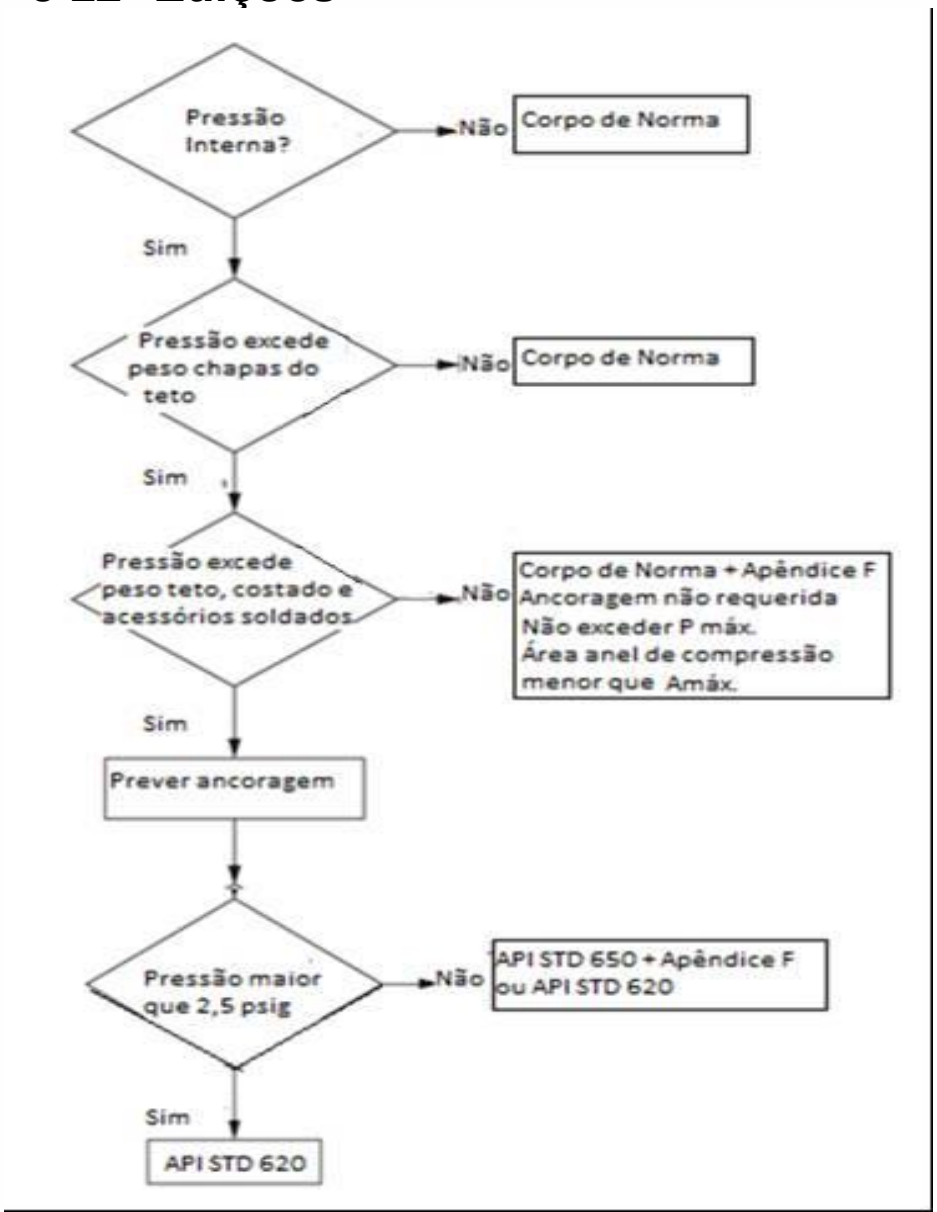
- A sobrepressão seguida do rompimento da ligação fundo-costado não é comum, mas já aconteceu em tanques de teto cônico suportado, de diâmetros inferiores a 15 m (50 ft), embora seja mais comum em tanque de teto auto suportado.

Árvore de decisão de cálculo de pressão máxima do API STD650 Anexo F 11ª e 12ª Edições

1º A pressão interna de projeto deve ser menor que peso chapas costado + teto e acessórios, se maior, porém inferior a 2,5 psig, o tanque deve ser ancorado na base de concreto.

2º A pressão interna máxima de operação do tanque deve ser limitada pelo menor valor de pressão determinada como definido no API STD 650 12ª Edição Anexo F:

- Pressão de projeto calculada a partir da área do anel de compressão;
- Pressão máxima que leva em conta "up-lift");
- 80% Pressão que causa a flambagem.



Novas regras para a ligação frágil teto costado

Em Tanque com diâmetro ≥ 50 ft (15,25 m)

- Declividade teto ≤ 1: 6
- Solda ligação teto-costado ≤ 3/16" (5mm).
- Nenhuma solda, nem mesmo solda de selagem, é permitida pelo lado de baixo da chapa.
- Anel de compressão da ligação teto-costado conforme Figura F-2 detalhes a-e. Todos os membros na região do anel de compressão devem ser considerados no cálculo da área da seção, incluindo anéis de isolamento.
- Área seção anel de compressão ligação teto-costado menor que Amáx área máxima admissível calculada.

São as regras tradicionais do API que continuam sendo indicadas para tanques maiores.

Novas regras para a ligação frágil teto costado

Tanque com diâmetro 9m (30 ft) ≤D<15 m (50 ft) e altura do tanque ≥ 9m (30 ft)

- Declividade ≤ 1:16
- Solda ligação teto-costado ≤ 3/16" (5mm).
- Nenhuma solda, nem mesmo solda de selagem, é permitida pelo lado de baixo da chapa. Anel de compressão da ligação teto-costado conforme Figura F-2 detalhes a-e.

Todos os membros na região do anel de compressão devem ser considerados no cálculo da área da seção.

- Área seção anel de compressão ligação teto-costado menor que Amáx área máxima admissível calculada.

Regras novas:

- **Bocais, bocas de visita e acessórios do costado devem acomodar no mínimo 100 mm (4 in) de "up-lift" sem romper.**
- **O fundo deve ser de solda de topo.**

Novas regras para a ligação frágil teto costado

Alternativa para Tanque Diâmetro < 15m (50ft) sem limitação de altura

- Declividade teto ≤ 1: 6
- Solda ligação teto-costado ≤ 3/16" (5mm).
- Nenhuma solda, nem mesmo solda de selagem, é permitida pelo lado de baixo da chapa.

Anel de compressão da ligação teto-costado conforme Figura F-2 detalhes a-e.
Todos os membros na região do anel de compressão devem ser considerados no cálculo da área da seção.
Área seção anel de compressão ligação teto-costado menor que Amáx área máxima admissível calculada.

Regras novas

- **Deve ser feita uma análise elástica para confirmar que a resistência mecânica da ligação fundo-costado é pelo menos 1,5 vezes maior que a da ligação teto-costado, para tanque vazio, e de 2,5, para tanque cheio.**
- **Bocais, bocas de visita e acessórios do costado devem acomodar no mínimo 100 mm (4 in) de “up-lift” sem romper.**
- **O fundo deve ser de solda de topo.**

Estimativa da vazão de alívio de emergência para eventos diversos

Emergência: fogo externo

Quando a ligação teto-costado não é frágil, o API STD650 remete ao API STD2000 a determinação das condições do alívio de emergência, que só considera e apresenta fórmulas de cálculo, para a situação de fogo externo.

Proposta de consideração da Emergência: vaporização súbita de água ou condensado

- Estabelecer a pressão interna a partir das curvas do programa SafeRoof.
- Seguir o seguinte critério para determinar a vazão de alívio:

a- Fluido: água ou condensado no fundo do tanque;

b- Fonte de calor que gera a vaporização súbita da água ou condensado: produto quente no fundo do tanque ou entrando no tanque, acima de 150ºC;

c- Estimar um volume da água contida ou do condensado vazado e fazer a correspondência com uma “área molhada” no costado;

d- Calcular a vazão de alívio, usando a metodologia do API STD2000 6ª Edição, corrigido para as propriedades da água ou condensado.

- Estimar o diâmetro da abertura no teto de alívio de emergência

O dispositivo de emergência mais recomendado é a tampa de emergência calibrada para abrir na pressão máxima de projeto e instalada em boca(s) de visita do teto.

A seleção deve ser com:

a- pressão máxima adotada, a partir das curvas do SafeRoof;

b- vazão de alívio conforme metodologia proposta.

Utilizar os catálogos de Fabricantes de tampas calibradas de bocas de visita do teto:

PROTECTOSEAL Emergency pressure relief vents;

ATT Advanced Tank Technology Emergency pressure relief valve

PENTAIR/VAREC Tank protection Emergency pressure relief manway covers.

- **Fonte: evento de evaporação súbita da água**
- **água existente no fundo do tanque ou vazamento de condensado do sistema de aquecimento**

Nessa condição de fogo externo há a vaporização do líquido e a expansão súbita do volume de gás, quando o tanque absorve a radiação térmica, acarretando a pressurização interna excessiva.