TANQUE CILÍNDRICO-VERTICAL, FUNDO PLANO E TETO DOMO
CARGA DE PROJETO: PRESSÃO MAIS COLUNA HIDROSTÁTICA
FLUIDO ESTOCADO: ÁGUA ÁCIDA + HIDROCARBONETOS
MATERIAL DE CONSTRUÇÃO: AÇO-CARBONO ASTM-A36
DOC. DE REFERÊNCIA: FD-5230.00-5126-510-PEI-001-Rev.B

API-620-10ª Ed. (Fev/2002), INCL. OS ADDENDA 1 (Jun/2004)
CÁLCULO ESTRUTURAL: ESPESSURAS MÍNIMAS E NOMINAIS
COMPOSIÇÃO DO COSTADO: 6 ANÉIS DE 2440mm DE ALTURA

Édison Guedes
Eng. Mec., M.Sc.

1- Dados de Entrada para o Cálculo das Espessuras Mínimas dos Anéis do Costado

$D := 19100$ $\quad D := \frac{D}{304.8}$ **Diâmetro interno do tanque: 19100mm.**

$Hc := 14640$ $\quad H := \frac{Hc}{304.8}$ **Altura total do costado: 14640mm = 6 x 2440mm (exceto reforço).**

$G := 0.9883$ $\quad \mu := 988.3$ **Densidade do produto: 0,9883; massa específica: 988,3kg/m³.**

$Sd := 160$ $\quad Sd := Sd \cdot 145$ **Tensão normal admissível: 160MPa [ASTM-A36 sob condição de projeto, a 80°C (Tabela 3-2); radiografia parcial].**

$St := 171.7$ $\quad St := St \cdot 145$ **Tensão normal admissível: 171,7MPa (ASTM-A36 sob condição de teste hidrostático, Tabela 3-2; radiografia parcial).**

$CA := 3.0$ $\quad CA := \frac{CA}{25.4}$ **Margem de corrosão: 3,0mm no costado (1,5mm no teto domo).**

$Pman := 14.2233$ $\quad Pp := Pman \cdot 144$ **Pressão de projeto: 1,0kgf/cm² (manométrica).**

2- Cálculo das Espessuras Mínimas dos Anéis Sob Condição de Projeto

$$td1 := \frac{2.6 \cdot D \cdot (H - 1) \cdot G + Pp}{Sd} + CA$$

Equação da espessura sob condição de projeto (primeiro anel).

$td1 := td1 \cdot 25.4$ $\quad td1 = 13.534$ **Espessura requerida no primeiro anel (projeto): 13,53mm.**

$H := H \cdot 304.8 - 2440$ $\quad H := \frac{H}{304.8}$ Corrigindo a altura para chegar ao segundo anel.

$$td2 := \frac{2.6 \cdot D \cdot (H - 1) \cdot G + Pp}{Sd} + CA$$

Equação da espessura sob condição de projeto (segundo anel).

$td2 := td2 \cdot 25.4$ $\quad td2 = 12.122$ **Espessura requerida no segundo anel (projeto): 12,12mm.**

$H := H \cdot 304.8 - 2440$ $\quad H := \frac{H}{304.8}$ Corrigindo a altura para chegar ao terceiro anel.

$$td3 := \frac{2.6 \cdot D \cdot (H - 1) \cdot G + Pp}{Sd} + CA$$

Equação da espessura sob condição de projeto (terceiro anel).

$td3 := td3 \cdot 25.4$ $\quad td3 = 10.711$ **Espessura requerida no terceiro anel (projeto): 10,71mm.**

$H := H \cdot 304.8 - 2440$ $\quad H := \frac{H}{304.8}$ Corrigindo a altura para chegar ao quarto anel.

$td4 := \frac{2.6 \cdot D \cdot (H - 1) \cdot G + Pp}{Sd} + CA$ Equação da espessura sob condição de projeto (quarto anel).

$td4 := td4 \cdot 25.4$ $\quad td4 = 9.3$ **Espessura requerida no quarto anel (projeto): 9,300mm.**

$H := H \cdot 304.8 - 2440$ $\quad H := \frac{H}{304.8}$ Corrigindo a altura para chegar ao quinto anel.

$td5 := \frac{2.6 \cdot D \cdot (H - 1) \cdot G + Pp}{Sd} + CA$ Equação da espessura sob condição de projeto (quinto anel).

$td5 := td5 \cdot 25.4$ $\quad td5 = 7.889$ **Espessura requerida no quinto anel (projeto): 7,889mm.**

$H := H \cdot 304.8 - 1200$ $\quad H := \frac{H}{304.8}$ Corrigindo a altura para chegar ao sexto anel.

$td6 := \frac{2.6 \cdot D \cdot (H - 1) \cdot G + Pp}{Sd} + CA$ Equação da espessura sob condição de projeto (sexto anel).

$td6 := td6 \cdot 25.4$ $\quad td6 = 7.195$ **Espessura requerida no sexto anel (projeto): 7,195mm.**

3- Cálculo das Espessuras Mínimas dos Anéis Sob Condição de Teste Hidrostático

$H := 14640$ $\quad g := 9.81$ $\quad H := \frac{H}{304.8}$ Retornando à altura máxima (teste hid.); gravidade local, m/s^2.

$tt1 := \frac{2.6 \cdot D \cdot (H - 1) + Pp}{St} + CA$ Equação da espessura sob condição de teste (primeiro anel).

$tt1 := tt1 \cdot 25.4$ $\quad tt1 = 12.907$ **Espessura requerida no primeiro anel (teste): 12,91mm.**

$H := H \cdot 304.8 - 2440$ $\quad H := \frac{H}{304.8}$ Corrigindo a altura para voltar ao segundo anel.

$tt2 := \frac{2.6 \cdot D \cdot (H - 1) + Pp}{St} + CA$ Equação da espessura sob condição de teste (segundo anel).

$tt2 := tt2 \cdot 25.4$ $\quad tt2 = 11.572$ **Espessura requerida no segundo anel (teste): 11,57mm.**

$H := H \cdot 304.8 - 2440$ $\quad H := \frac{H}{304.8}$ Corrigindo a altura para voltar ao terceiro anel.

$tt3 := \frac{2.6 \cdot D \cdot (H - 1) + Pp}{St} + CA$ Equação da espessura sob condição de teste (terceiro anel).

$tt3 := tt3 \cdot 25.4$ $\quad tt3 = 10.242$ **Espessura requerida no terceiro anel (teste): 10,24mm.**

$H := H \cdot 304.8 - 2440$ $\quad H := \frac{H}{304.8}$ Corrigindo a altura para voltar ao quarto anel.

$tt4 := \frac{2.6 \cdot D \cdot (H - 1) + Pp}{St} + CA$ Equação da espessura sob condição de teste (quarto anel).

$tt4 := tt4 \cdot 25.4$ $\quad tt4 = 8.911$ **Espessura requerida no quarto anel (teste): 8,911mm.**

$H := H \cdot 304.8 - 2440$ $\quad H := \frac{H}{304.8}$ Corrigindo a altura para voltar ao quinto anel.

$tt5 := \frac{2.6 \cdot D \cdot (H - 1) + Pp}{St} + CA$ Equação da espessura sob condição de teste (quinto anel).

$tt5 := tt5 \cdot 25.4$ $\quad tt5 = 7.58$ **Espessura requerida no quinto anel (teste): 7,580mm.**

$H := H \cdot 304.8 - 2440$ $\quad H := \frac{H}{304.8}$ Corrigindo a altura para voltar ao sexto anel.

$tt6 := \frac{2.6 \cdot D \cdot (H - 1) + Pp}{St} + CA$ Equação da espessura sob condição de teste (sexto anel).

$tt6 := tt6 \cdot 25.4$ $\quad tt6 = 6.25$ **Espessura requerida no sexto anel (teste): 6,250mm.**

4- Seleção das Espessuras Nominais Adequadas aos Anéis do Costado (a condição de projeto é predominante)

$t1 := 16$ **Espessura nominal do primeiro anel: 16mm.**

$t2 := 12.5$ **Espessura nominal do segundo anel: 12,5mm.**

$t3 := 12.5$ **Espessura nominal do terceiro anel: 12,5mm.**

$t4 := 9.5$ **Espessura nominal do quarto anel: 9,5mm.**

$t5 := 8.0$ **Espessura nominal do quinto anel: 8,0mm.**

$t6 := 8.0$ **Espessura nominal do sexto anel: 8,0mm.**

Nota: todos os anéis terão 2440mm de altura.

5- Cálculo do Teto Domo e da Região de Ligação Teto-Costado (Raio Interno do Teto Domo: 19100mm)

$\alpha := \operatorname{asin}\left(\frac{D}{2 \cdot D}\right)$ $\alpha = 0.524$ **Ângulo de declividade do teto domo: 30°.**

$Pte := \frac{Pman}{14.2233} \cdot \frac{9.81}{100}$ $Pte = 0.098$ **Pressão de projeto do teto: 0,098MPa.**

$Ete := 0.85$ $Di := D \cdot 304.8$ $Di = 1.91 \times 10^4$ Diâmetro interno do teto, mm.

$Rteto := Di$ $Rteto = 1.91 \times 10^4$ Raio interno do teto, mm.

$Tte := \frac{Pte \cdot Rteto}{2 \cdot \frac{Sd}{145} \cdot Ete} + \frac{CA}{2} \cdot 25.4$ $Tte = 8.389$ $Tt := 9.5$ **Espessura mínima do teto: 8,389mm (inclusive margem de corrosão de 1,5mm); espessura nominal: 9,5mm.**

$Rtepla := Di \cdot 2 \cdot \alpha$ $Rtepla = 2 \times 10^4$ Raio do teto domo planificado, mm.

$Pchte := 750$ Peso das chapas do teto, N/m^2.

$Pteto := \frac{2}{3} \pi \cdot \left(\frac{Rtepla}{1000}\right)^2 \cdot Pchte$ $Pteto = 6.284 \times 10^5$ Peso do teto, N.

$W := -Pteto$ $W = -6.284 \times 10^5$ Força de compressão na ligação teto-costado, N.

$At := \frac{\pi}{4} \cdot Di^2$ $At = 2.865 \times 10^8$ Área da seção transversal do tanque, mm^2.

$Rc := \frac{Di}{2}$ $Rc = 9.55 \times 10^3$ Raio interno do costado, mm.

$T1 := \frac{Rc}{2} \cdot \left(Pte + \frac{W}{At}\right)$ $T1 = 457.955$ Força de membrana longitudinal na ligação teto-costado, N/mm.

$T2 := Pte \cdot Rc$ $T2 = 936.855$ Força de membrana circunferencial na ligação teto-costado, N/mm.

$wh := 0.6 \cdot \sqrt{Di \cdot \left(Tt - CA \cdot \frac{25.4}{2}\right)}$ $wh = 234.538$ Resistência do teto à compressão, mm (Fig. 5.6, detalhe "f").

$wc := 0.6 \cdot \sqrt{Rc \cdot (t6 - CA \cdot 25.4)}$ $wc = 131.111$ Resistência do costado à compressão, mm (Fig. 5.6, detalhe "f").

$Q := T2\cdot(wh + wc) - T1\cdot Rc\cdot\sin(\alpha)$ $\quad Q = -1.844 \times 10^6$ Força cortante no perfil de fechamento, N.

$Ac := \frac{-Q}{103.4}$ $\quad Ac = 1.784 \times 10^4$ Seção transversal mínima do perfil de fechamento, mm^2.

$Tref := 22.4$ **Espessura do perfil de fechamento: 22,4mm (vide figura abaixo).**

$Lref := \frac{Ac}{Tref}$ $\quad Lref = 796.221$ Comprimento mínimo de reforço para compressão: 796mm.

$Lc := 400$ **Comprimento do reforço no costado: 400m.**

$Lh := Lref - Lc$ $\quad Lh = 396.221$ Comprimento mínimo do reforço no teto: 396mm (vide Fig. 1 abaixo).

$Lext := wh - 16\cdot t6$ $\quad Lext = 106.538$ Comprimento externo mínimo do reforço anterior: 107mm (idem).

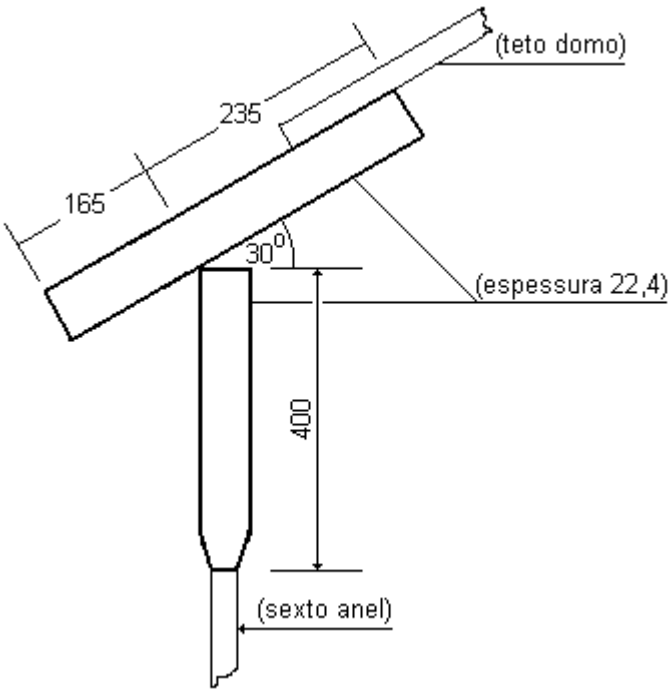

Fig. 1: perfil especial de fechamento na ligação teto-costado (vide API 620, Fig. 5.6, detalhe "f").

6- Cálculo dos Chumbadores Necessários à Ancoragem do Tanque

$pc1 := 1250$ Peso específico do primeiro anel: 1250N/m^2.

$pc2 := 1000$ Peso específico do segundo anel: 1250N/m^2.

$pc3 := pc2$ Peso específico do terceiro anel: 1250N/m^2.

$pc4 := 750$ Peso específico do quarto anel: 1250N/m^2.

$pc5 := 640$ Peso específico do quinto anel: 1250N/m^2.

$pc6 := pc5$ Peso específico do sexto anel: 1250N/m^2.

$Hanel := 2440$ Altura nominal de todos os anéis: 2440mm.

$Pan1 := \pi \cdot (Di + t1) \cdot Hanel \cdot 10^{-6} \cdot pc1$ $Pan1 = 1.832 \times 10^5$ Peso do primeiro anel: 183200N.

$Pan2 := \pi \cdot (Di + t2) \cdot Hanel \cdot 10^{-6} \cdot pc2$ $Pan2 = 1.465 \times 10^5$ Peso do primeiro anel: 183200N.

$Pan3 := \pi \cdot (Di + t3) \cdot Hanel \cdot 10^{-6} \cdot pc3$ $Pan3 = 1.465 \times 10^5$ Peso do primeiro anel: 183200N.

$Pan4 := \pi \cdot (Di + t4) \cdot Hanel \cdot 10^{-6} \cdot pc4$ $Pan4 = 1.099 \times 10^5$ Peso do primeiro anel: 183200N.

$Pan5 := \pi \cdot (Di + t5) \cdot Hanel \cdot 10^{-6} \cdot pc5$ $Pan5 = 9.374 \times 10^4$ Peso do primeiro anel: 183200N.

$Pan6 := \pi \cdot (Di + t6) \cdot Hanel \cdot 10^{-6} \cdot pc6$ $Pan6 = 9.374 \times 10^4$ Peso do primeiro anel: 183200N.

$Pcp := (Pteto + Pan1 + Pan2 + Pan3 + Pan4 + Pan5 + Pan6) \cdot 1.05$ Equação do peso total, oposto à resultante das forças de pressão que solicitam o teto domo.

$Pcp = 1.472 \times 10^6$ Peso total, oposto à resultante das forças de pressão: 1472000N.

$Fp := Pte \cdot \frac{\pi}{4} \cdot Di^2$ $Fp = 2.811 \times 10^7$ Resultante das forças de pressão: 28110000N.

$Nchu := 72$ $Cchu := 19350$ **Número de chumbadores: 72; circunferência respectiva: D=19350mm.**

$Achu := 2397$ **Área de resistência nom. dos chumbadores: 2397mm^2; 72 chumbadores, Dnom=2.1/2".**

$Trachu := \frac{Fp - Pcp}{Nchu}$ $Trachu = 3.699 \times 10^5$ **Tração máxima por chumbador: 369900N.**

$Sadchu := 172.4$ **Tensão admissível nos chumbadores: 172,4MPa (ASTM-A193-B7; porcas A194-2H).**

$Schu := \frac{Trachu}{Achu}$ $Schu = 154.335$ **Tensão máxima nos chumbadores: 154,3MPa<172,4MPa (aprovados).**

7- Fundo do Tanque (Anel Periférico, Esp.=16mm; Núcleo, Esp.=8,0mm; Soldas de Topo, Sem RX Obrigatório)

$Defundo := 19500$ Diâmetro externo do fundo: 19500mm (anel periférico de 19500mm x 18200mm x 16mm).

$Denúcleo := 18200$ Diâmetro externo do núcleo: 18200mm (espessura 8,0mm).

8- Cálculo do Peso Máximo Sobre a Base e dos Esforços Devidos ao Vento (Momento Fletor e Força Cortante)

$pan := 2 \cdot pc5$ $\quad pan = 1.28 \times 10^{3}$ Peso específico do anel periférico do fundo: 1280N/m^2.

$Panel := \frac{\pi}{4} \cdot \left(Defundo^{2} - Denúcleo^{2}\right) \cdot 10^{-6} \cdot pan$ $\quad Panel = 4.927 \times 10^{4}$ Peso de tal anel: 49270N.

$pnu := pc5$ $\quad pnu = 640$ Peso específico do núcleo do fundo: 640N/m^2.

$Ri := \frac{Di \cdot 10^{-3}}{2}$ $\quad Ri = 9.55$ Raio interno do costado: 9,55m.

$Pfundo := Panel + pnu \cdot \frac{\pi}{4} \cdot Denúcleo^{2} \cdot 10^{-6}$ $\quad Pfundo = 2.158 \times 10^{5}$ **Peso do fundo: 215800N.**

$Pcos := Pan1 + Pan2 + Pan3 + Pan4 + Pan5 + Pan6$ $\quad Pcos = 7.735 \times 10^{5}$ **Peso do costado: 773500N.**

$Ptqvazio := Pfundo + Pcos + Pteto$ $\quad Ptqvazio = 1.618 \times 10^{6}$ **Peso do tanque vazio: 1618000N.**

$Hcos := 14640$ Altura de projeto do costado: 14640mm.

$Pprod := \pi \cdot Ri^{2} \cdot Hcos \cdot 10^{-3} \cdot \mu \cdot g$ $\quad Pprod = 4.067 \times 10^{7}$ **Peso de produto: 40670000N.**

$Pbase := Ptqvazio + Pprod$ $\quad Pbase = 4.229 \times 10^{7}$ **Peso máximo sobre a base: 42290000N.**

$Vo := 35$ $\quad Qv := 10 \cdot \frac{Vo^{2}}{16}$ $\quad Qv = 765.625$ Pressão do vento local: 766N/m2 (Vo=35m/s; NBR-6123).

$Hteto := 2 \cdot Ri \cdot (1 - \cos(\alpha))$ $\quad Hteto = 2.559$ **Altura do teto domo: 2559mm.**

$Hv := Hcos \cdot 10^{-3} + Hteto$ $\quad Hv = 17.199$ Altura cilíndrica de vento (simulada): 17199m.

$Ff := 0.70$ Fator de forma:0,70 (cilindro "liso").

$Fv := Ff \cdot Hv \cdot 2 \cdot Ri \cdot Qv$ $\quad Fv = 1.761 \times 10^{5}$ **Força horizontal na base (devida ao vento): Fv=176100N.**

$Mv := Fv \cdot \frac{Hv}{2}$ $\quad Mv = 1.514 \times 10^{6}$ **Momento fletor na base (devido ao vento): Mv=1,514*10^{6}Nm.**

$Mres := \frac{2}{3} \cdot \left(Pfundo + \frac{Pprod}{100}\right) \cdot Ri$ $\quad Mres = 3.963 \times 10^{6}$ **Momento restaurador (API-650, 3.11.1): Mres=3,963*10^{6}Nm.**

Conclusão: aplicando-se apenas 1% do peso de produto, verifica-se que o respectivo momento restaurador supera o momento devido ao vento de projeto; logo, os chumbadores acima calculados (72) servem apenas para resistir à pressão interna; o vento de projeto é incapaz de produzir efeito de tombamento.

This document was created with Win2PDF available at http://www.daneprairie.com.
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.