

Casos Especiais de Emprêgo de Tubulações de Aço

Eng.º THIERRY CELSO DE REZENDE

DAE — S. Paulo

1. — Generalidades

Por circunstâncias várias e que não cabe aqui citar, o emprêgo de tubulações de aço para a construção de adutoras de grande diâmetro vem se intensificando e ganhando rapidamente preferência sôbre as outras variantes que seriam tubulações de ferro fundido e de concreto. Do ponto de vista de operação e manutenção, a tubulação de aço apresenta grandes vantagens sôbre as outras duas, o que pode ser confirmado pela menor incidência de vazamentos e arrebentamentos. O único argumento que se pode empregar contra a tubulação de aço seria a sua durabilidade, que eventualmente pode ser bem menor que a de outros materiais.

Entretanto, o objetivo dêste trabalho, longe de discutir as vantagens de um ou outro material, é o de apresentar um caso em que o emprêgo de tubulações de aço se torna muito interessante, tanto do ponto de vista da rapidez de construção como do ponto de vista econômico. Este problema, muito conhecido dos engenheiros que lidam constantemente com obras de abastecimento d'água, é a travessia de vãos livres, assunto sempre delicado quando se emprega tubulações de ferro fundido ou concreto.

Sem pretender apresentar assunto inteiramente nôvo, vejamos como se procede no caso de se utilizar tubulações de aço.

2. — Apreciação do Problema

Comumente, a resistência das tubulações à flexão longitudinal é assunto pouco estudado; em primeiro lugar pelas raras ocasiões em que as mesmas ficam submetidas a êste tipo de esforço e em segundo lugar pela baixa resistência dos tubos a êsse tipo de esforço. Sempre que se tenha necessidade de

vencer vãos de comprimento superior a poucos metros, o que se faz é construir uma estrutura de sustentação.

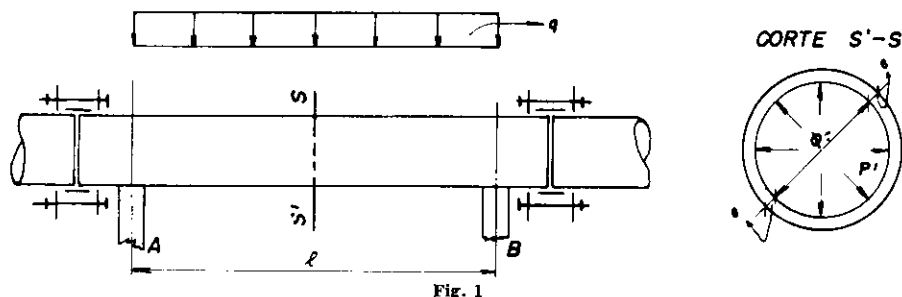
No caso do emprêgo de tubulações de aço, as condições mudam de figura, uma vez sendo estas dimensionadas para resistir a esforços de compressão oriundos de pressões menores que a atmosférica e reinantes em seu interior, apresentam também elevada resistência à flexão. É justamente o aproveitamento desta característica das tubulações de aço que permite fazê-la vencer vãos de comprimentos elevados, sem necessidade de estruturas de sustentação.

Êste tipo de solução se indica muito para a travessia de cursos d'água, onde se terá, inclusive, facilidade em executar cavaletes sem depender de ancoragens, uma vez que os empuxos nas curvas serão absorvidos pela própria tubulação que tem suas juntas soldadas.

Antes de entrarmos prôpriamente no assunto, há que se pedir excusas aos leitores por uma provável falta de rigor na sua apresentação, uma vez que o autor dêste trabalho não é especialista em Estruturas. Entretanto, o que nos animou a escrevê-lo foi a possibilidade de difundir um conhecimento de grande aplicação prática, de maneira tal, que a sua compreensão dependa apenas de conhecimentos de Resistência dos Materiais que qualquer engenheiro deve possuir.

3. — Análise de um caso concreto

Vamos inicialmente estudar o caso de uma tubulação de aço de diâmetro interno " ϕ ", espessura "e", sujeita a uma pressão interna "p", devendo vencer um vão "l" e dotada de juntas de dilatação como indica a figura 1:



Vamos supor que esta tubulação possa ser admitida como sendo simplesmente apoiada em "A" e "B". Por efeito de seu pêso próprio, pêso da água e uma eventual sobrecarga, ela estará sujeita a uma carga vertical uniformemente distribuída "q".

A carga uniformemente distribuída "q" dará origem a um momento fletor (com valor máximo no meio do vão onde $M = \frac{ql^2}{8}$) e a um esforço cor-

tante (com valor máximo no apoio onde $Q = \frac{ql}{2}$).

Por efeito da pressão interna, a tubulação estará sujeita a um esforço de tração agindo no plano de sua secção transversal, com direção da tangente em cada ponto e constante. Este esforço de tração terá por valor:

$$F = \frac{p' \varnothing}{2} \quad \text{para um comprimento de tubo unitário.}$$

Para que a tubulação apresente estabilidade, deverá resistir à combinação dos três esforços agindo simultaneamente. Assim a ação do momento fletor M dará origem a tensão de tração e compressão (máximas, respectivamente, nas bordas inferior e superior) e tendo por valor:

$$\sigma = \pm \frac{M}{J} y$$

onde y é a distância do ponto considerado a linha neutra.

Evidentemente estas tensões serão máximas no meio do vão onde M é o máximo.

A força cortante Q dará origem a tensão de cisalhamento que, agindo no plano das secções transversais, variam com a distância à linha neutra segundo a expressão:

$$\tau = \frac{QM_s}{b_1 J}$$

onde M_s representa o momento estático da área hachureada da figura 2 em relação ao eixo CG e b_1 tem o significado indicado na mesma figura.

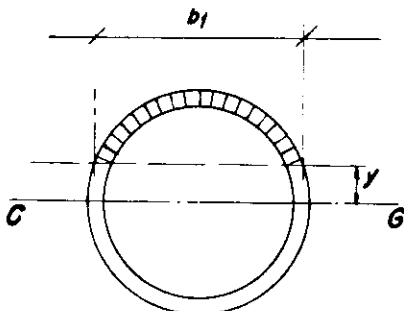


Fig. 2

Quanto ao efeito da pressão interna, ela dá origem a tensões de tração p, constantes ao longo de toda a tubulação e tendo por valor:

$$p = \frac{F}{e}$$

A estabilidade da tubulação deve ser estudada em determinados pontos onde os esforços solicitantes serão máximos, tendo em vista o estado duplo de tensão que irá verificar nesses mesmos pontos. Para os colegas que, como o autor quando se defrontou inicialmente com o problema, estão desabilitados com a Resistência dos Materiais, apresentamos a seguir uma breve explanação sobre o Estado Duplo de Tensão, a fim de que os mesmos possam melhor compreender o que vem a seguir.

4. — Estado Duplo de Tensão

As tensões em torno de um ponto, no caso do estado duplo de tensão, ficam determinadas quando se conhecem as que atuam em dois planos perpendiculares quaisquer, que passam pelo referido ponto. Conhecidas estas últimas, obtém-se o valor das tensões que atuam em outro plano qualquer que passe pelo ponto.

Consideremos a figura 3:

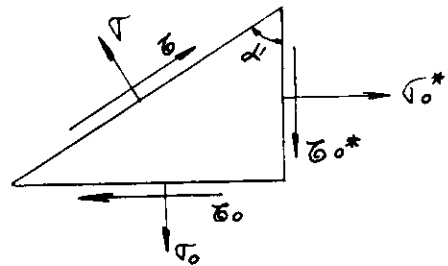


Fig. 3

Adotando-se o sinal (+) para as tensões nos sentidos indicados nessa figura, a partir das equações de equilíbrio dos esforços obtém-se:

$$\sigma = \sigma_0 \cos^2 \alpha' + \sigma_0^* \sin^2 \alpha' - \tau_0 \sin 2 \alpha'$$

$$\tau = \frac{\sigma_0 - \sigma_0^*}{2} \sin 2 \alpha' - \tau_0 \cos 2 \alpha'$$

O ângulo α' variando de 0 a π , os valores de σ e τ também variam, passando por um máximo e um mínimo. Para σ , os valores máximo e mínimo se verificam para:

$$\operatorname{tg} 2 \alpha' = \frac{\sigma_0 - \sigma_0^*}{2 \tau_0}$$

equação que fornece dois valores de α' defasados de 90°. Os valores extremos de σ são:

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_o + \sigma_o^*}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_o - \sigma_o^*}{2}\right)^2 + \tau_o^2}$$

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_o + \sigma_o^*}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_o - \sigma_o^*}{2}\right)^2 + \tau_o^2}$$

Estes valores de σ denominam-se tensões principais e, como já foi visto, atuam em planos ortogonais. Demonstra-se que nestes planos a tensão de cisalhamento é nula.

Quanto ao valor de τ_{\max} , demonstra-se que sua expressão é de:

$$\tau_{\max} = \tau_{\min} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_o - \sigma_o^*}{2}\right)^2 + \tau_o^2} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}$$

e que estas tensões atuam em planos ortogonais e bissetores dos diedros formados pelos planos em

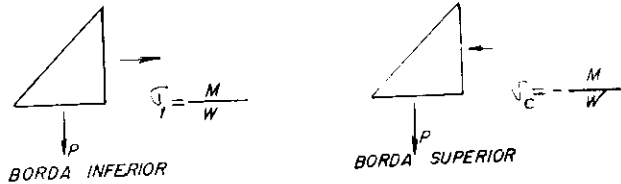
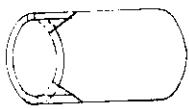
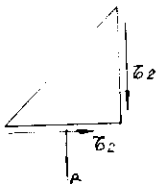


Fig. 4

Como nesses pontos, as tensões de cisalhamento agindo nos planos acima são nulas, as tensões σ_1 , σ_c e p são tensões principais. A tensão máxima de cisalhamento terá lugar na borda superior e terá por valor:

$$\tau_1 = \frac{\frac{M}{W} - p}{2}$$

Para uma seção próxima ao apoio, teremos $M = 0$ e $Q = Q_{\max}$. As tensões de cisalhamento devidas ao esforço cortante serão máximas na linha neutra, onde teremos a seguinte situação:



$$\tau_2 = \frac{Q M_s}{b_1 J} \text{ p.c. } / = \frac{p}{2} + e$$

Fig. 5

Conforme já foi visto, o valor máximo de τ será:

$$\tau_{\max} = \tau_3 = \sqrt{\frac{p^2}{2} + \tau_2^2}$$

que agem as tensões principais (isto é, formando ângulo de 45° com estes).

5. Verificação da Estabilidade da Tubulação

Para o caso apresentado na figura 1: tubulação de diâmetro " ϕ ", espessura da parede " e ", sujeita a uma pressão interna " p ", vencendo um vão de comprimento " l " e sujeita a uma carga vertical uniformemente distribuída " q ", as seções a serem verificadas são o meio do vão, onde o momento fletor é máximo. Desde que a pressão " p " é constante ao longo da tubulação, esta afirmação é evidente.

Analisemos, então, uma seção situada no meio do vão. Como as tensões devidas à flexão são máximas nas bordas inferior e superior da tubulação, o estado de tensão de um elemento situado nesses pontos é:

Tendo em vista o exposto, para que a tubulação apresente estabilidade face aos esforços solicitantes assinalados, devemos ter:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &\leq \bar{\sigma}_1 \\ \sigma_c &\leq \bar{\sigma}_c \\ p &\leq \bar{p} \\ \tau_1 &\leq \bar{\tau} \\ \tau_3 &\leq \bar{\tau} \end{aligned}$$

Os cálculos para a determinação das tensões acima serão muito facilitados com a utilização das tabelas anexadas ao trabalho onde as tensões σ_1 , σ_c e τ_2 já se encontram calculadas para as espessuras mais comuns de chapas e diferentes vãos.

Para os casos não tabelados, a determinação de τ_2 (a mais trabalhosa) poderá ser extremamente simplificada com o uso da tabela para o cálculo de τ apresentado no 1.º volume da obra "Cálculo de Concreto Armado" do professor Telemaco Von Langendonck.

6. Caveletes

Em muitas situações, há necessidade de se construir caveletes para transpor o vão, necessidade esta, ditada pelas condições topográficas do terreno (problema de N. A. máximo de cursos d'água na maioria das vezes). Um caso típico é o apresentado na figura seguinte:

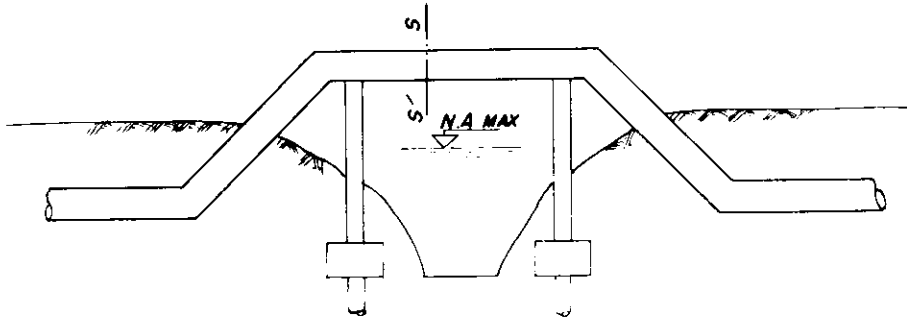


Fig. 6

Nestes casos, caso se utilize as juntas de dilatação indicadas atrás, as curvas necessitariam de ancoragem, uma vez que poderiam se deslocar por efeito do empuxo provocado pela pressão interna.

Para se evitar este fato, pode-se eliminar as juntas de dilatação, soldando toda a tubulação. Procedendo desta maneira, iríamos criar um empuxo horizontal de valor

$$N = \frac{p' \pi \phi^2}{4}$$

e tracionando a tubulação no seu sentido longitudinal.

Este empuxo deverá ser absorvido pela própria tubulação. Uma sua seção s-s' ficará sujeito a um esforço de flexo-tração, sendo as tensões máximas dadas pelas expressões:

$$\sigma_t = \frac{N}{S} + \frac{M}{W} \leq \sigma_t$$

$$\sigma_c = \frac{M}{W} \leq \sigma_c$$

$$\tau_1 = \frac{\frac{N}{S} + \frac{M}{W} - p}{2} \leq \tau$$

$$\tau_2 = \frac{\frac{N}{S} + \frac{M}{W} - p}{2} \leq \tau$$

$$\tau_3 = \sqrt{\left(\frac{\frac{N}{S} - p}{2}\right)^2 + \tau_2^2} \leq \tau \quad \text{onde}$$

S = área da Seção transversal da tubulação

A força N é deixada de lado para o cálculo de σ_c porque o caso mais desprovável seria aquele em que a linha estivesse em carga mas com $p' = 0$.

Evidentemente, neste caso aparecerão esforços devidos a dilatação, assunto que será tratado no item seguinte.

7. Dilatação

De acôrdo com as Normas Brasileiras de Estruturas Metálicas, estas últimas devem ser verificadas para uma variação de temperatura de $\pm 30^\circ\text{C}$ desde que expostas ao sol e de $\pm 15^\circ\text{C}$ quando protegidas. Quanto ao coeficiente de dilatação do aço, é tomado como sendo de $0,000012/^\circ\text{C}$.

Embora no caso de travessia de vãos livres a tubulação se encontre exposta, quando em carga, a temperatura de sua superfície é sensivelmente a da água. Este fato pode ser verificado experimentalmente com facilidade e é facilmente compreensível, uma vez que a vazão que passa pela tubulação age como excelente meio de refrigeração. Sendo assim, para o estudo da dilatação, há dois casos a se considerar:

a) Tubulação vazias. Este caso não apresenta grande importância, uma vez que estando a tubulação vazia os demais esforços serão consideravelmente menores.

b) Tubulação carregada. Admitindo-se que a tubulação apresente a temperatura da água, o que nos interessa é a variação desta última. Segundo dados fornecidos pela Seção de Estações de Tratamento de Água do D. A. E. (D.T.-2), para um período de 6 anos, na E. T. A. de Theodoro Ramos, anquanto a temperatura do ar variou de 7°C a 31°C , a temperatura da água variou de 16°C a 26°C . A amplitude de variação da temperatura do ar foi de 24°C e a da água foi de 10°C . Para a E.T.A. de Cotia, a temperatura do ar para um período de 5 anos, variou de 1°C a 39°C e a da água para o mesmo período variou de 13°C a 25°C . A amplitude de variação da temperatura do ar foi de 38°C e a da água foi de 12°C .

Observa-se assim, que, admitindo-se que se possa considerar a tubulação em carga como sendo protegida para efeito de aplicação das Normas Brasileiras, estaremos sendo até pessimistas; Julgamos que se pode admitir como sendo de $\pm 10^\circ\text{C}$ a variação de temperatura a se considerar neste caso.

Tendo em vista o exposto, a tensão a que estaria sujeita uma tubulação reta desprovida de jun-

ta de dilatação e carregada por efeito da variação de temperatura seria de:

$$\text{sendo } \begin{cases} \sigma_d = E\delta \\ E = 2.100.000 \text{ Kg/m}^2 \\ \delta = \alpha t \\ \alpha = \text{coef. de dilatação do} \\ \text{aço} = 0,000012 \\ t = 10^\circ \end{cases}$$

teremos: $\sigma_d \cong 250 \text{ Kg/cm}^2$

Esta tensão deve ser somada às demais de maneira idêntica às tensões devidas ao empuxo e já vistas no item anterior. Apenas, como ela pode ser de tração ou compressão conforme diminua ou aumente a temperatura, irá provocar aumento também de σ_c .

U'a maneira de se evitar os efeitos da dilatação seria a construção de cavaletes, que por permitirem a deslocação do trecho horizontal da tubulação, dispensam a sua consideração nos cálculos. Os seus efeitos aparecerão nos trechos inclinados e nas curvas entretanto, nestes os demais esforços solicitantes são pequenos.

8. Considerações Finais

Como já foi dito, este trabalho foi elaborado para possibilitar a engenheiros não especializados em estruturas, projetar em pouco tempo travessias de vão com o emprego de tubulações de aço, mediante um simples cálculo de verificação. Desta maneira, foi apresentado de modo elementar, visando tornar fácil o seu entendimento. As simplificações feitas, como a suposição de que a tubulação possa ser considerada como simplesmente apoiadas, estão a favor da segurança, não havendo portanto, inconveniente em se proceder desta forma. Entretanto, cabem algumas considerações sobre as mesmas e que são as seguintes:

a) Para o caso em que a tubulação trabalhe como viga contínua, pode perfeitamente ser utilizado o critério seguido. O momento fletor máximo terá valor eventualmente menor e o esforço cortante valor eventualmente maior. Entretanto, no caso dos vãos serem aproximadamente iguais, este não sofrerá grande alteração.

b) A verificação da tubulação para outras soluções estruturais, como pórticos, arcos etc., envolvem conhecimentos, cuja discussão não cabe neste

trabalho. O assunto já seria da alçada de especialistas.

c) No que se refere às tensões admissíveis do aço soldado, temos usado:

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_t &= 1.000 \text{ Kg/cm}^2 \\ \bar{\sigma}_c &= 800 \text{ Kg/cm}^2 \\ \bar{\tau} &= 700 \text{ Kg/cm}^2 \end{aligned}$$

A tensão admissível a compressão é tomada nesse valor em virtude da possibilidade de aparecer o fenômeno de flambagem parcial (enrugamento por efeito de compressão) da zona comprimida. Para contornar esse problema, temos, na Divisão de Águas do D.A.E., soldados chapas longitudinais nesta zona, sem serem consideradas no cálculo e visando exclusivamente aumentar a rigidez da tubulação. Com esta medida admitimos taxa de 1.000 kg/m² também para compressão (ver figura 7).

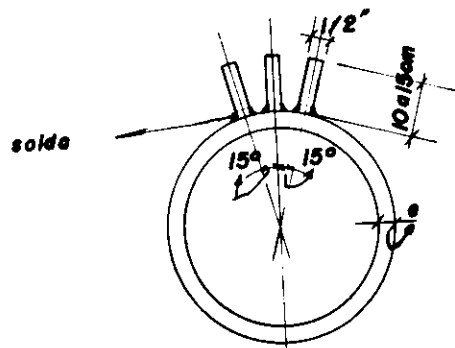


Fig. 7

Quanto à flexa admissível, convém não deixá-la ultrapassar $\frac{l}{500}$ do vão I, ou seja:

$$f \leq \frac{l}{500}$$

d) Apoio. No que se refere aos apoios, além de tornar possível o deslizamento da tubulação sobre os mesmos (o que pode ser facilmente conseguido com a utilização de placas de chumbo), outros cuidados devem ser tomados. Por efeito da força cortante há uma tendência da tubulação em ovalizar-se, com a aparecimento de tensões eventualmente elevadas. O assunto é de difícil tratamento teórico e sua discussão não cabe neste trabalho. Pode-

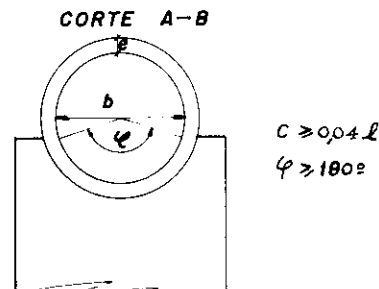
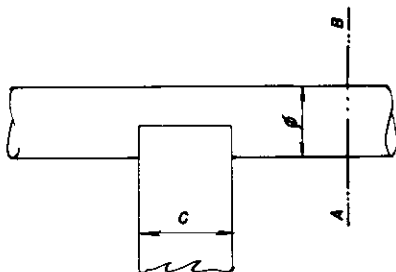
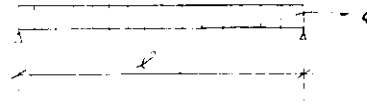


Fig. 8

T A B E L A S



$$R = \frac{D+2e}{2}$$

$$\pi = \frac{\theta}{2}$$

$$J = \text{Momento de inércia} = \frac{\pi(R^4 - r^4)}{4}$$

$$S = \text{Área de seção transversal} = \pi(R^2 - r^2)$$

$$q = \text{Peso próprio do tubo} + \text{peso da água} + \text{peso revestimento} + \text{sobre carga}$$

Sobre carga: 100 kg/m

$$W = \frac{J}{R}$$

$$\tau_2 = \frac{QMs}{bJ} \text{ (p/á linha neutra)}$$

$$Q = \frac{ql}{2}$$

$$\tau = \frac{M}{W}$$

$\phi=0,50 \quad e=5/16 \quad S=129 \quad q=450$
 $J=40652 \quad W=1576$

l	τ	Q	τ_2	f
10	357	2250	34	1
12	514	2700	40	2
14	699	3150	48	3
16	913	3600	54	5
18	1155	4050	62	8

$\phi=0,60 \quad e=5/16 \quad S=151 \quad q=550$
 $J=69698 \quad W=2264$

l	τ	Q	τ_2	f
10	304	2750	32	0,5
12	438	3300	42	1
14	596	3850	50	2
16	778	4400	58	3
18	985	4950	64	6

$\phi=0,70 \quad e=5/16 \quad S=176 \quad q=700$
 $J=110000 \quad W=3075$

l	τ	Q	τ_2	f
10	284	3500	38	0,5
12	409	4200	46	1
14	557	4900	54	2
16	728	5600	62	3
18	921	6300	70	4

$\phi=0,80 \quad e=5/16 \quad S=200 \quad q=850$
 $J=163596 \quad W=4011$

l	τ	Q	τ_2	f
12	381	5100	50	1
14	519	5950	58	2
16	678	6800	68	3
18	858	7650	76	4
20	1059	8500	84	6

$\phi=0,90 \quad e=5/16 \quad S=225 \quad q=1000$
 $J=232172 \quad W=5070$

l	τ	Q	τ_2	f
14	483	7000	62	1
16	631	8000	70	2
18	798	9000	80	3
20	986	10000	88	5
22	1193	11000	96	7

$\phi=1,00 \quad e=5/16 \quad S=250 \quad q=1200$
 $J=319025 \quad W=6281$

l	τ	Q	τ_2	f
14	488	8400	66	1
16	611	9600	76	2
18	773	10800	86	3
20	955	12000	96	4
22	1155	13200	106	6

$\phi=1,20 \quad e=5/16 \quad S=300 \quad q=1.600$
 $J=546740 \quad W=8994$

l	τ	Q	τ_2	f
14	435	11200	74	0,7
16	569	12800	84	1
18	720	14400	96	2
20	889	16000	106	3
22	978	17000	116	4

$\theta = 0,50$ $e = 3/8$ $S = 152$ $q = 450$
 $J = 49441$ $W = 1905$

l	r	Q	ζ_2	f
10	295	2250	28	1
12	425	2700	34	1
14	578	3150	40	2
16	755	3600	46	4
18	956	4050	52	6

$\theta = 0,60$ $e = 3/8$ $S = 182$ $q = 600$
 $J = 84487$ $W = 2730$

l	r	Q	ζ_2	f
10	274	3000	32	0,5
12	393	3600	38	1
14	538	4200	46	2
16	703	4800	52	3
18	890	5400	58	5

$\theta = 0,70$ $e = 3/8$ $S = 212$ $q = 700$
 $J = 133.700$ $W = 3721$

l	r	Q	ζ_2	f
10	235	3500	32	0,3
12	338	4200	38	0,7
14	460	4900	46	1
16	601	5600	52	2
18	761	6300	58	4

$\theta = 0,80$ $e = 3/8$ $S = 241$ $q = 890$
 $J = 197.916$ $W = 4833$

l	r	Q	ζ_2	f
12	316	5100	42	0,6
14	430	5950	48	1
16	562	6800	56	2
18	712	7650	62	3
20	879	8500	70	4

$\theta = 0,90$ $e = 3/8$ $S = 271$ $q = 1050$
 $J = 280690$ $W = 6109$

l	r	Q	ζ_2	f
14	421	7350	54	1
16	550	8400	60	2
18	696	9450	68	3
20	859	10500	76	4
22	1039	11550	84	6

$\theta = 1,00$ $e = 3/8$ $S = 301$ $q = 1200$
 $J = 383.823$ $W = 7533$

l	r	Q	ζ_2	f
14	390	8400	54	0,8
16	509	9600	62	1
18	645	10800	70	2
20	796	12000	78	3
22	963	13400	88	5

$\theta = 1,20$ $e = 3/8$ $S = 361$ $q = 1650$
 $J = 660.115$ $W = 10830$

l	r	Q	ζ_2	f
14	389	11550	62	0,6
16	509	13200	72	1
18	644	14850	82	2
20	795	16500	90	3
22	962	18150	100	4

UNIDADES

θ — metros
 S — cm^2
 q — kg/metro
 J — cm^4
 W — cm^3

l — metros
 r — kg/cm^2
 Q — kg
 ζ_2 — kg/cm^2
 f — cm
 e — polegadas

-se evitar este problema tomando a precaução de apoiar a tubulação na maior área possível tanto transversal como longitudinalmente. A figura seguinte esclarece o que foi dito e indica valores práticos que tem sido usados em São Paulo:

No caso de vãos maiores que 15 metros, convém também reforçar a chapa no apoio, com outra de espessura igual:

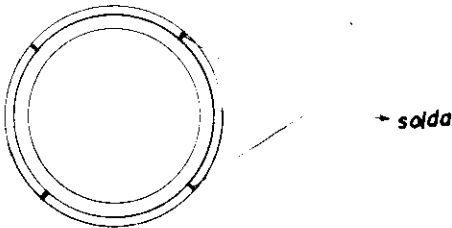


Fig. 9

BIBLIOGRAFIA

Cálculo de Concreto Armado. Vol. I — Telemaco Von Langendonck.

Le Calcul des Tuyaux en Beton Armé et non Armé — A.

Guerrin e G. Daniel.

Estática Aplicada — R. Saliger.

Resistência dos Materiais — S. Timoshenko.



ABASTECIMENTO DE ÁGUA, de H. E. Babbit, J. J. Doland e J. L. Cleasby.

É uma tradução da 6.ª edição do clássico "Water Supply Engineering", de Babbit e Doland. Babbit já prestou serviços no Brasil, como assessor da Fundação SESP e lecionando na Escola de Engenharia de Minas Gerais. Sua obra dispensa apresentação, mas deve-se pontualizar que a presente edição foi profundamente modificada em relação às anteriores.

O eng.º Zadir Castelo Branco soube produzir uma tradução em linguagem agradável, natural, isenta daquelas expressões forçadas, "cheirando" ao texto estrangeiro, que se notam freqüentemente nas obras traduzidas.