

MÓDULO 4

4.9 - PROCEDIMENTOS DE INSTALAÇÃO SUBAQUÁTICA
OU SOB LENÇOL FREÁTICO● **Forças Atuantes em Tubos Submersos**

Quando submersos, como sob lençol freático ou em instalações subaquáticas (emissários submarinos, travessias de lagos e rios, etc) os tubos são submetidos ao empuxo e às forças de levantamento e arraste decorrentes das correntes e ondas de fundo.

Portanto, ao se dimensionar a ancoragem (blocos ou poitas) dessas tubulações essas três forças devem ser consideradas, sob risco da tubulação vir a movimentar-se ou mesmo flutuar, podendo ser levada a colapso ou ruptura em pontos de soldas e juntas mecânicas. Além disso, torna-se particularmente importante a análise da pressão externa e/ou a subpressão interna à tubulação, decorrentes da coluna d'água sobre a tubulação e/ou de ondas de pressão negativa advindas de transientes hidráulicos, que também podem conduzir ao seu colapso.

● **Empuxo (forças de flutuação)**

Uma tubulação flutuará quando o empuxo sobre ela for maior que as forças que a ancoram (que a puxam para baixo).

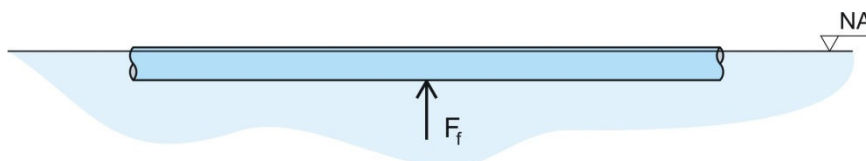


Fig.1- Empuxo em tubo submerso

O empuxo (F_F) corresponde ao peso de água deslocado, ou seja:

$$F_F = \rho_w \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \text{ (kgf/m)}$$

Onde: ρ_w = peso específico da água (1000 kgf/m³)
 D = diâmetro externo do tubo (m)

As forças de ancoragem são: O peso do tubo e o peso do fluido no seu interior.

O peso próprio do tubo (W_T) normalmente é fornecido nas tabelas dos fabricantes, entretanto é facilmente determinado por:

$$W_T = \rho_T \cdot \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} \text{ ou } W_T = \rho_T \cdot \pi \cdot e \cdot (D - e) \text{ (kgf/m)}$$

Onde: ρ_T = peso específico do tubo (PEAD = 950 kgf/m³ e PP = 920 kgf/m³)
 d = diâmetro interno do tubo (m)
 e = espessura do tubo (m)

O peso do fluido interno ao tubo é determinado por:

$$W_i = \rho_i \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \text{ (kgf/m)}$$

Onde: ρ_l = peso específico do fluido interno (kgf/m³). Se vazio igual a zero

Deve-se atentar que em casos como os de emissários de esgoto pode ocorrer a formação de gases decorrentes da decomposição orgânica.

Nas situações de tubulações enterradas sob lençol freático, ou mesmo em instalações subaquáticas enterradas, surge uma outra força de ancoragem proveniente do peso do solo.

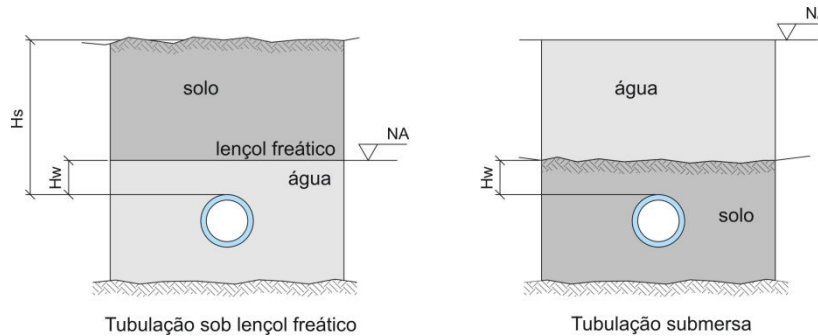


Fig.2- Tubulação submersa e enterrada

Quando sob lençol freático, temos o peso do solo seco (W_{SS}) e o peso do solo molhado (W_{SL}). Já em instalações subaquáticas enterradas não há a componente do solo seco ($W_{SS} = 0$).

$$W_{SS} = \rho_s \cdot (H_s - H_w) \cdot D \text{ (kgf/m)}$$

$$W_{SL} = (\rho_s - \rho_w) \cdot \left[D^2 \frac{(4 - \pi)}{8} + D \cdot H_w \right] \text{ (kgf/m)}$$

Onde: ρ_s = peso específico do solo seco (kgf/m³)

H_s = altura do solo seco (m)

H_w = altura do solo molhado (m)

A somatória das forças contrárias à flutuação podemos chamar de empuxo negativo (E_N), pois se opõe ao empuxo (F_f):

$$E_N = W_T + W_l + W_{SS} + W_{SL}$$

Assim, para que a tubulação não flutue, a seguinte condição deve ser mantida:

$$F_f < E_N$$

• **Forças devido às correntes de fundo**

Nas instalações não enterradas, as correntes aquáticas de fundo são extremamente importantes, incorrendo em uma componente de arraste tendendo a deslocar a tubulação (F_a), e outra de levantamento (F_l), somando-se ao empuxo.

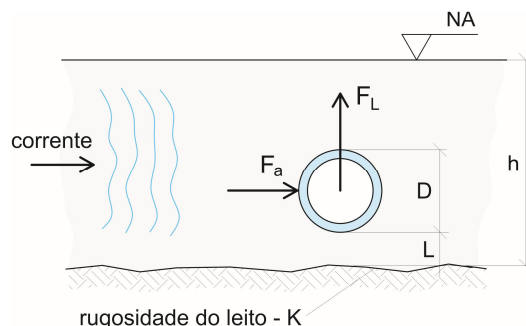


Fig.3 - Correntes de fundo

As forças de arraste e levantamento dependem da rugosidade do leito subaquático, do ângulo de incidência da corrente sobre a tubulação e até da lâmina d'água.

A condição mais crítica ocorre com a tubulação assentada sobre o leito ($\lambda=0$), quando a força de levantamento é da ordem de 8 vezes a força de arraste ($F_l = 8 F_a$), enquanto que para a tubulação afastada do leito mais do que $\frac{1}{4}$ de seu diâmetro ($\lambda > 1/4.D$) as forças resultantes são menores.

• Forças devido às ondas de fundo

Em mar, em especial na chamada zona de arrebentação, as forças resultantes do movimento das ondas são de crucial importância na determinação dos blocos de ancoragem, pois muitas vezes são de magnitude bem maior que as derivadas do empuxo e das correntes.

As ondas resultam em 3 componentes: Força de arraste (F_a), Força de levantamento (F_l) e Força inercial (F_i).

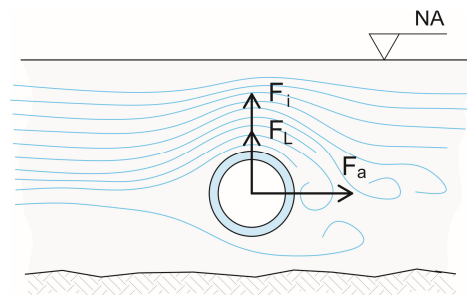


Fig.4- Ondas de fundo

As forças de arraste e levantamento são da mesma natureza das geradas pelas correntes, enquanto que a força inercial é decorrente das oscilações de pressão na passagem das ondas e que mantêm o próprio movimento da água.

A força inercial, por vezes de magnitude superior às outras duas, ocorre defasadamente àquelas, ou seja, é máxima quando as outras são mínimas e vice-versa.

São dependentes também do ângulo de incidência da onda na tubulação, da profundidade da lâmina d'água, e da altura da onda

A determinação das características das ondas é complexa e exige grande especialidade e pesquisa de campo. Os projetistas procuram definir os dados das ondas centenárias (a maior a cada 100 anos) para um projeto seguro das ancoragens.

Maiores informações podem ser obtidas em JANSO, Lars Eric – *PlasticsPipes for WaterSupplyandSewageDisposal*, Borealis, 1995.

• Blocos de Ancoragem

Quando as forças de deslocamento da tubulação são superiores àquelas que tendem a mantê-la estável é preciso aplicar cargas de ancoragem, os chamados blocos de ancoragem.

A determinação do tamanho, peso e posicionamento dos blocos tem de considerar o empuxo e as forças de arraste, levantamento e inercial decorrentes das correntes e ondas de fundo, dessa forma é importante que esses cálculos sejam feitos por especialistas.

Como regra prática, para efeito de avaliação das condições de ancoragem, algumas literaturas recomendam que o peso dos blocos de ancoragem (B_L , peso molhado) seja de 30 a 50% do empuxo.

Assim, podemos sugerir a relação:

$$B_L > F - E_N, \text{ onde } F = K \cdot F_F$$

Sendo: $K = 1,0 \rightarrow$ sem movimento de água (neutro)

$K = 1,3 \rightarrow$ lagos, rios de corrente baixa ou mar calmo

$K = 1,5 \rightarrow$ rios de corrente alta ou mar agitado

$B_L = 0$ peso molhado considera o peso dentro da água. Para a determinação do peso do bloco no seco (B_S) deve-se aplicar a relação: $B_S = B_L \rho_B / (\rho_B - \rho_W)$, sendo $\rho_B =$ peso específico do material do bloco

O espaçamento entre blocos de ancoragem deve levar em consideração a resistência à flambagem, bem como ao colapso por pressão externa ou subpressão, abordados à frente.

Características preferenciais dos blocos de ancoragem:

- ser assimétricos, tal que o centro de gravidade esteja na parte inferior;
- ter sapatas que aumentem o atrito com o leito subaquático;
- ter altura que garanta que a distância do tubo ao leito seja superior a $D/4$;
- ter elementos de fixação (prisioneiros) que mantenham a compressão sobre o tubo constante (como molas);
- ter elementos metálicos protegidos contra corrosão

EXEMPLO

Travessia de um rio de baixa correnteza, de uma adutora de água de Tubo PE 80, DE 630 mm SDR 17 (espessura $e = 37,4$ mm), assentada sobre o leito subaquático.

- Empuxo: F_F

$$F_F = \rho_W \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} = 1000 \cdot \frac{\pi \cdot 0,63^2}{4} = 311,72 \text{ (kgf/m)}$$

- Peso do tubo: W_T : Pode ser obtido da Tabela do fabricante, ou pela fórmula

$$W_T = \rho_T \cdot \pi \cdot e \cdot (D - e)$$

$$W_T = 950 \cdot \pi \cdot 0,0374 \cdot (0,63 - 0,0374) = 66,15 \text{ (kgf/m)}$$

- Peso do fluido (água) dentro do tubo: W_I

$$W_I = \rho_I \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} = 1000 \cdot \frac{\pi \cdot 0,555^2}{4} = 241,92 \text{ (kgf/m)}$$

- Empuxo negativo: E_N

$$E_N = W_T + W_I = 66,15 + 241,92 = 308,07 \text{ (kgf/m)}$$

- Cálculo do bloco molhado: B_L

$$B_L > K \cdot F_F - E_N = 1,3 \cdot 311,72 - 308,07 = 97,17 \text{ (kgf/m)}$$

- Cálculo do bloco seco: (B_S): (concreto armado com $\rho_B = 2450 \text{ kgf/m}^3$)

$$B_S > B_L \rho_B / (\rho_B - \rho_W) = 97,17 \cdot 2,45 / (2,45 - 1) = 163,9 \text{ (kgf/m)}$$

Se adotarmos um bloco a cada 3 m, teríamos blocos de 491,72 kgf, e podemos adotar por segurança pesos de 500 kgf, com, por exemplo, a geometria abaixo:

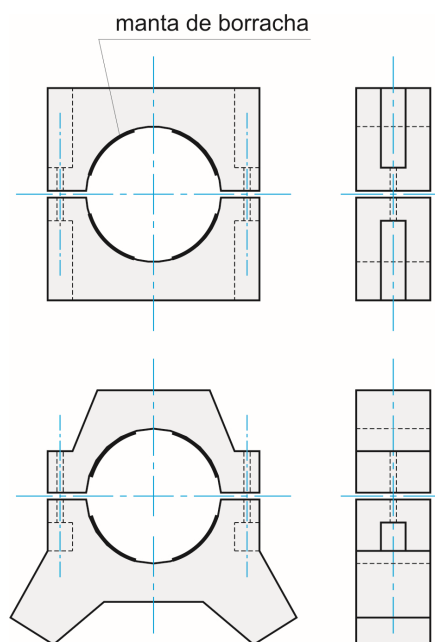


Fig.5- Exemplos de blocos de ancoragem em concreto armado

• **Espaçamento Máximo Entre Blocos de Ancoragem**

O espaço entre os blocos de ancoragem deve levar em consideração dois aspectos:

- Máximo espaçamento entre blocos para evitar flambagem devido à pressão externa;
- Espaçamento entre blocos para aumentar a resistência ao colapso da tubulação.

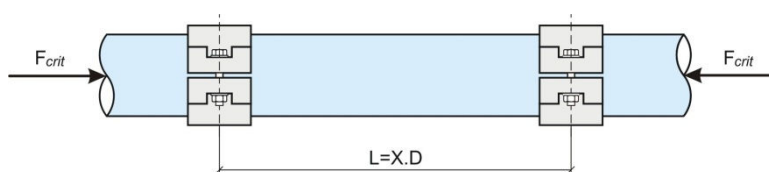


Fig.6-Espaçamento entre blocos de ancoragem

O colapso por flambagem pode ocorrer devido ao impedimento, pelos suportes de fixação, da expansão longitudinal resultante da compressão diametral oriunda de pressão externa ou subpressão interna, semelhante ao que ocorre com a dilatação térmica.

Em termos práticos, para evitar-se o colapso por flambagem, podemos representar o espaçamento $L = X.D$, sendo D o diâmetro externo do tubo e X dado por:

Para $SDR \geq 17$: $X \leq 12$

Para $SDR < 17$: $X \leq 10$

Por outro lado, como abordaremos a frente, os blocos de ancoragem aumentam a rigidez aparente da tubulação, e conseqüentemente sua resistência ao colapso devido a pressões externas ou sub-pressões internas.

Quanto menor o espaçamento entre os blocos, menor X , maior o aumento da resistência ao colapso. Se esse incremento de resistência for desejado, então o valor de X deverá ser determinado conforme abordado a seguir, mas dentro dos seguintes limites:

$$\frac{1,56}{SDR} \sqrt{(SDR-1)^3} \geq X > \frac{4}{SDR} \sqrt{\left(\frac{SDR-1}{2}\right)}$$

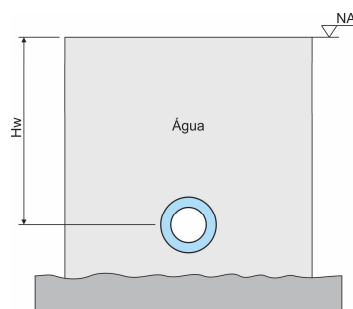
Ou seja, se a resistência ao colapso devido a pressões externas (ou sub-pressões internas) for preponderante na instalação, o espaçamento entre os blocos de ancoragem será limitado por essa questão e não à flambagem.

• Pressão de Colapso devido à Pressão Externa e/ou Sub-pressão interna

Numa instalação subaquática, a pressão externa decorrente da coluna d'água é de extrema importância, em especial em tubulações sem pressão interna, muito comum em tubulações de esgoto, e naquelas que trabalham com sub-pressão interna (linhas de sucção).

A tubulação pode estar enterrada, e assim conta com o suporte lateral do solo, ou apenas apoiada no leito subaquático. Pode ocorrer ainda a situação em que uma tubulação com pressão interna maior que a pressão externa, logo não sujeita ao colapso por pressão externa, apresente transientes hidráulicos, com conseqüentes ondas de sub-pressão, e nesse instante receber a carga momentânea (de curta duração) resultante da soma da coluna d'água externa com a subpressão do transiente.

• a) Tubulação Não Enterrada (apoiada sobre o leito subaquático)



A pressão de colapso pode ser expressa por P_{C0} , dada em kgf/cm^2 :

$$P_{C0} = \frac{E}{4(1-\nu^2)} \cdot \frac{e^3}{rm^3} \text{ ou } P_{C0} = 2 \cdot \frac{E}{(1-\nu^2) \cdot (SDR-1)^3};$$

Ou ainda $P_{C0} = 24 \cdot S_T / (1-\nu^2)$

Onde: S_T = rigidez do tubo: $E.I / Dm^3 = E/12(SDR-1)^3$
 E_L = Módulo de elasticidade de longa duração:

PE 100

PE 80

PPH

PPB/PPR

E_L (kgf/cm ²)	2.200	1.900	3.000	2.400
E_C (kgf/cm ²)	11.000	9.000	12.000	11.000

rm =Raio médio do tubo

ν = Coeficiente de Poisson do material do tubo (0,45 para PEAD; 0,4 para PP)

Para o caso da resistência à pressão externa ou a subpressão interna de longa duração, usar o módulo de elasticidade E_L . Para as cargas de curta duração (transientes hidráulicos) usar E_C .

Deve-se aplicar um fator de segurança mínimo de 2 ao valor admissível para a carga de colapso e ainda o fator de redução de resistência em função da deformação (ovalização) do tubo:

Assim, pela segurança, indicamos a pressão admissível de colapso P_C , por:

$$P_C = fa \cdot 12 \cdot S_T,$$

A pressão de colapso expressa em m.c.a (metros de coluna d'água) é dada por $P_C \times 10$.

Sendo fa , fator devido à deformação vertical do tubo, normalmente deve ser menor que 2%:

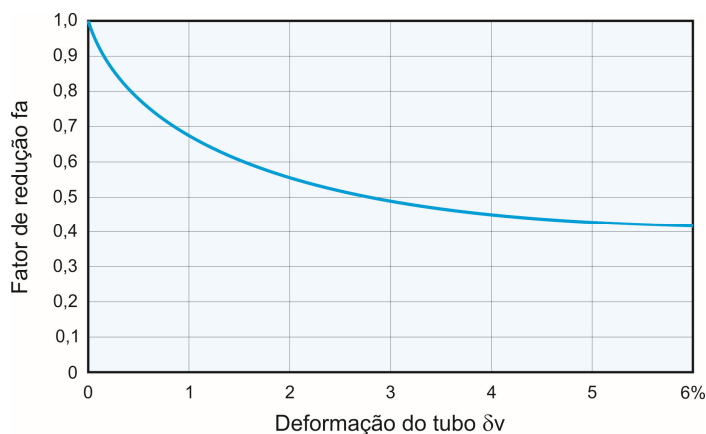


Fig. 7 – Gráfico de fa função da deformação vertical do tubo

Logo,

A somatória da coluna d'água (H_w) + a subpressão interna (se houver) deve ser menor que P_C .

• b) Tubulação Enterrada sob o leito subaquático ou sob lençol freático

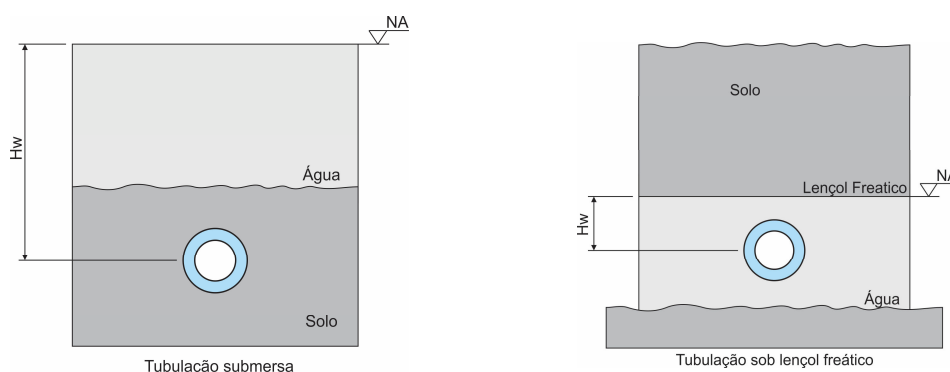


Fig. 8– Tubulação enterrada sob leito subaquático

Nessas situações, o solo exerce uma suporte lateral que aumenta a resistência ao colapso da tubulação, sendo:

$$P_{C1} = fs \cdot P_{C0}$$

$$fs = 0,235\sqrt{(E'_s/S_T} = 1,15\sqrt{E'_s/P_{C0}}$$

Onde E'_s = módulo tangente do solo: $\approx(1,5 \text{ a } 2) \cdot E_s$ (módulo secante)

Logo: $P_{Cl} = 1,15\sqrt{P_{C0} \cdot E'_s}$;ou ainda $P_{Cl} = 5,63\sqrt{E'_s \cdot S_T}$

Para solos de baixo suporte: $S_T > 0,0275E'_s$, pode ser simplificada para:

$$P_{Cl} = 24 \cdot S_T + \frac{2}{3} E'_s$$

Na falta de valores mais precisos do módulo tangente do solo (E'_s), sugerimos abaixo:

Condição de Instalação	Solo	Tipo Aterro	E'_s (MPa)/ Proctor Modificado (Pr _{MD})
1	Coesivo Misto $\rho = 1,9 \text{ g/cm}^3$	Sem Compactação	0,8 75 %
2	Coesivo Misto $\rho = 1,9 \text{ g/cm}^3$	Baixa Compactação	1,2 80 %
3	Granular/Coesivo $\rho = 1,8 \text{ g/cm}^3$	Média Compactação	1,8 85 %
4	Não Coesivo $\rho = 1,7 \text{ g/cm}^3$	Alta Compactação	2,5 90 %

A pressão de colapso admissível P_C , deve ser a P_{Cl} com fator de segurança de mínimo de 2 (FS) e o fator de redução devido a deformação vertical da tubulação fa . No caso de tubulações enterradas $fa = 1 - 3 \cdot \delta/Dm$; onde δ é a deformação (deflexão) vertical.

Ou seja: $P_C = P_{Cl} \cdot fa \cdot (1/FS)$

Podemos representar graficamente a pressão admissível de colapso de curta e de longa duração, como segue:

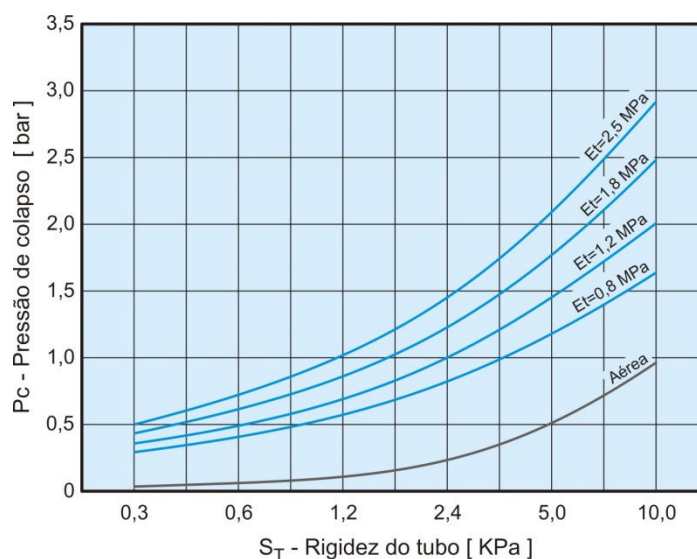


Fig. 8– Gráfico de P_C em função da Rigidez do tubo (S_T)

Considerações:

- Instalação aérea ou enterrada típicas

- Tubos enterrados em solo saturado, nas condições 1, 2, 3 e 4 acima.
- Pressão externa admitida (ou subpressão interna) a 25°C;
- Tubos enterrados com ovalização (deformação vertical) de 6%;
- Fator de Segurança = 2,5

Os valores de Rigidez de Curta (S_{TC}) e de Longa Duração (S_{TL}), são apresentados abaixo:

VALORES DE S_{TC} (KPa) – Curta Duração				
SDR	PE 80	PE 100	PP-H	PP-B
32,25	2,5	3,0	3,3	3,0
26	4,8	5,9	6,4	5,9
21	9,4	11,5	12,5	11,5
17	18,3	22,4	24,4	22,4
13,6	37,5	45,8	50,0	45,8
11	75,0	91,7	100,0	91,7
9	146,5	179,0	195,3	179,0

VALORES DE S_{TL} (KPa) – Longa Duração				
SDR	PE 80	PE 100	PP-H	PP-B
32,25	0,4	0,6	1,0	0,7
26	0,8	1,2	1,9	1,3
21	1,6	2,3	3,6	2,5
17	3,1	4,5	7,1	4,9
13,6	6,2	9,2	14,6	10,0
11	12,5	18,3	29,2	20,0
9	24,4	35,8	57,0	39,1

Como dito, os blocos de ancoragem aumentam a rigidez aparente da tubulação e, por conseguinte, sua Pressão Crítica de Colapso por um fator K, sendo:

$$P_{Cr} = K . P_C$$

Sendo, simplificada, $K = \frac{1,34}{X} \sqrt{SDR - 1}$

E X a relação da distância entre blocos dada por $L = X.D$.

Onde se devem respeitar os limites anteriormente dados para a distância entre blocos.

• Forças de Puxamento Durante Afundamento E Transporte

Em instalações subaquáticas é comum a utilização de grandes rebocadores para transportar a tubulação flutuando até o local da instalação, bem como seu posicionamento. Nesses casos é adequado que a força de puxamento não ultrapasse o limite de resistência à tração do tubo, evitando que ultrapasse seu limite elástico, comprometendo sua estrutura. O controle da força normalmente é feito por fusíveis mecânicos, que rompem antes da força limite. O cálculo da força máxima de tração é feito conforme abaixo, considerando esforços de curta duração.

A força máxima de puxamento para esforços de curta duração pode ser dada por:

$$F_S = 1,2 . MRS . \pi . e . (D - e) kgf$$

Onde: MRS = Tensão Hidrostática Padrão do Material da tubulação, em kgf/cm^2
 D = Diâmetro externo do Tubo, em cm
 e = espessura do tubo, em cm

Logo:

Para PE 80/PPB-80/PPR-80: $F_s = 94. \pi. e. (D - e)kgf$
 Para PE 100/PPH-100: $F_s = 120. \pi. e. (D - e)kgf$

Ou ainda, pode ser expressa por:

Para PE 80/PPB-80/PPR-80: $F_s = 94. \pi. \left(\frac{D}{SDR}\right)^2 . (SDR - 1)kgf$
 Para PE 100/PPH-100: $F_s = 120. \pi. \left(\frac{D}{SDR}\right)^2 . (SDR - 1)kgf$

Onde: $SDR = (D/e)$ relação padrão e D = diâmetro externo do tubo em cm

No afundamento da tubulação no leito subaquático é importante que a flexão não ultrapasse os raios mínimos de curvatura, evitando seu colapso. Enquanto em águas rasas esse problema é minimizado, em águas profundas é preciso aplicar uma força de puxamento na tubulação para assegurar que a mesma se comporte como uma corrente, não uma estrutura rígida, fazendo com que o momento de flexão seja mantido em níveis mínimos, próximo a zero. Nesses casos, a força de puxamento irá gerar uma tensão axial que se somará à tensão axial de flexão. Mais detalhes vide GRANN-MEYER, Einar – Polyethylene Pipes in Applied Engineering.

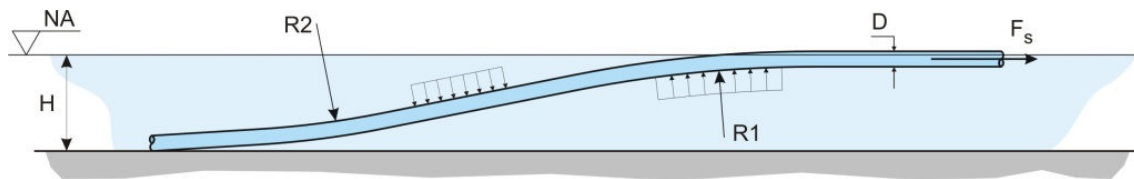


Fig.9- Afundamento de tubulação durante instalação subaquática

Considera-se água profunda quando a relação entre a profundidade (H) e o diâmetro externo do tubo (D) é maior ou igual a 15:

$$\beta = H/D \geq 15$$

Para que a teoria de corrente seja aplicável é preciso que:

$$F_s.H^2 \geq E_c.I_a$$

Onde E_c é o módulo de elasticidade de curta duração (vide Tabela apresentada para cálculo de pressão de colapso) e I_a o momento de inércia axial.

Demonstra-se que a deformação axial causada pela força F_s é:

$$\varepsilon_s = \frac{F_s}{A \cdot E_c} = \frac{I_a}{A \cdot H^2} \approx \frac{0,028}{\beta^2}$$

sendo A = área da seção transversal do tubo = $\pi \cdot (D^2 - d^2)/4$

A deformação axial resultante da flexão é dada por $\varepsilon_a = 1/2 \alpha$. Onde $\alpha = R/D$

Logo para $\beta = 20$ e razão de curvatura $\alpha = 30$, temos:

$\varepsilon_s=0,07\%$ e $\varepsilon_a= 1,7\%$, ou seja, a Força de puxamento F_S provoca uma deformação axial desprezível diante dos esforços de flexão, mesmo com valores de F_S bem superiores ao mínimo necessário.

Maiores detalhes sobre esse módulo, vide Danieletto, José Roberto B.- Manual de Tubulações de Polietileno e Polipropileno: Características, Dimensionamento e Instalação: 2007