

COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE TUBOS RÍGIDOS E FLEXÍVEIS ENTERRADOS

Pedro Jorge Chama Neto

Engenheiro Civil pela Faculdade de Engenharia Civil de Araraquara, Mestre em Engenharia de Construção Civil e Urbana pela Escola Politécnica da USP, Gerente do Departamento de Acervo e Normalização Técnica da Sabesp - TXA

Rua Costa Carvalho, 300 - Alto de Pinheiros - São Paulo - São Paulo – CEP 05429-900 – Brasil - Tel. +55 (11) 33888294 – email:pchama@sabesp.com.br

RESUMO

O projeto de um sistema de abastecimento de água e coleta de esgoto sanitário deve merecer o mesmo cuidado de um projeto de estrutura, embora, pela particularidade das tubulações ficarem enterradas às vezes se dá menos atenção a obras deste tipo.

Uma rede de abastecimento de água ou esgoto sanitário danificada ou destruída pode resultar em problemas sérios e consideravelmente onerosos, ainda que não envolva acidentes.

Esse artigo apresenta considerações sobre conceitos envolvendo tubos rígidos e flexíveis, cuidados a serem tomados no assentamento desses tubos e principais falhas que ocorrem devido ao assentamento feito de maneira inadequada.

PALAVRAS - CHAVES

Tubos rígidos, Tubos flexíveis, Assentamento de tubos

1. INTRODUÇÃO

Como a capacidade de carga de um tubo enterrado não depende apenas da resistência do tubo, mas também das condições de execução, este artigo procura demonstrar que as redes de abastecimento de água e coletores de esgoto, construídos com tubos classificados estruturalmente como rígidos (tubos de ferro de pequeno diâmetro, manilha cerâmica e os tubos de concreto), devem ter tratamento diferente quando do assentamento, comparados aos tubos flexíveis (PVC, PEAD e Aço).

Em virtude das manilhas cerâmicas e os tubos de concreto terem sido durante muito tempo os materiais tradicionalmente utilizados para a construção dos coletores de esgoto e, ainda hoje, encontram grande aplicação em diversas localidades e situações, a técnica construtiva associada a esses materiais pode estar erroneamente sendo associada à construção de coletores com outros tipos de materiais, tais como, PVC e PEAD.

As normas técnicas publicadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (NBR 9814, NBR 7367) e as principais normas técnicas publicadas em outros países sobre o assunto (DIN 4033, BS 5955, BS 8005, ASTM F 1668, ASTM D 2321, EM 1610, AS/NZS 2566), não fazem referência às condições de apoio como condição para melhoria da capacidade de carga dos tubos flexíveis, como por exemplo, o uso de berço de concreto para apoio de tubos flexíveis, ao contrário, quando fazem referência ao tipo de base de apoio fica claro que ela é indicada para tubos rígidos, e desaconselham o uso de berço para assentamento de tubo flexível (PVC, PEAD, Aço). Somente em situações muito especiais esta técnica pode ser indicada para tubos flexíveis.

Para que se possa entender as razões das recomendações construtivas expressas nas normas técnicas, inicialmente apresentaremos a conceituação de tubos rígidos e flexíveis e seus respectivos comportamentos quando enterrados.

Em seguida, apresentaremos os principais critérios para o dimensionamento de tubos rígidos e flexíveis, mostrando a importância que o berço de apoio exerce sobre o comportamento estrutural de tubos rígidos e a

importância que o solo de envolvimento exerce sobre o comportamento estrutural de tubos flexíveis. Apresentaremos, também, os principais mecanismos de falha que podem ocorrer nas tubulações rígidas e flexíveis, para que se possa avaliar a importância de se utilizar o berço de concreto na instalação de tubos rígidos e do solo de envolvimento no caso de tubos flexíveis.

2. OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo apresentar, de forma resumida, os princípios que regem o comportamento de tubos rígidos (manilha cerâmica, concreto, ferro fundido de pequeno diâmetro) e tubos flexíveis (PVC, PEAD e Aço) enterrados (situação de vala), fornecendo dados para projeto, bem como recomendações práticas para a instalação. Portanto, serão apresentados os principais conceitos sobre o assunto, de maneira que este trabalho venha a contribuir com os usuários de tubos rígidos e flexíveis, no sentido de facilitar o entendimento do comportamento destas tubulações, quando aplicadas tanto em redes de águas quanto em redes de esgotos sanitários. Não serão abordados conceitos sobre tubos semirrígidos.

3. PRINCÍPIOS BÁSICOS

3.1 Definições: Tubos Rígidos e Flexíveis

Tubos rígidos: são aqueles que, quando submetidos à compressão diametral, podem sofrer deformações de até 0,1% no diâmetro, medidas no sentido de aplicação da carga, sem que apresentem fissuras prejudiciais.

Exemplo: tubos de concreto simples e armado, manilhas de barro e ferro fundido de pequeno diâmetro.

Tubos flexíveis: são aqueles que quando submetidos à compressão diametral, podem sofrer deformações superiores a 3% no diâmetro, medidas no sentido da aplicação da carga, sem que apresentem fissuras prejudiciais.

Exemplo: tubos de aço, tubos de PVC, polietileno (PEAD).

3.2 Carga de Terra

É resultante do peso do prisma de solo situado diretamente acima da tubulação, o qual é modificado por forças de atrito geradas pelo movimento entre o tal prisma e os prismas laterais adjacentes. A figura 1 representa tubos em condições de aterro, sendo identificado: o prisma de solo 1, situado diretamente acima da tubulação, os prismas laterais adjacentes 2 e 3, o solo de envolvimento lateral (regiões pontilhadas, nas laterais da tubulação) e o leito (região pontilhada, abaixo do tubo).

Esta figura é importante para passar o conceito de funcionamento dos tubos rígidos e flexíveis, e deixar claras as diferenças quanto ao dimensionamento de ambos.

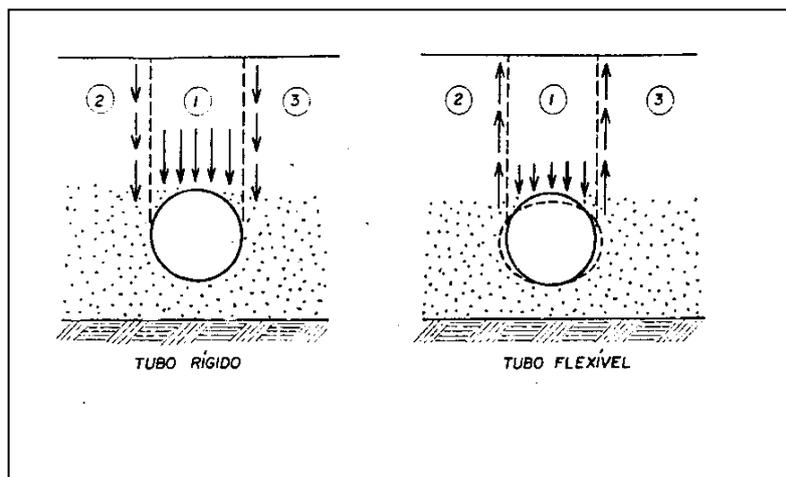


Figura 1 – Carga sobre tubos enterrados

No caso de **tubos rígidos**, o solo de envolvimento lateral é menos rígido que o tubo, sofrendo recalque devido ao peso do aterro. Observa-se que os prismas laterais adjacentes tendem a descer, puxando consigo, por atrito, o prisma 1 (solo acima do tubo). Para esta situação a carga de terra sobre o tubo rígido será maior pela contribuição do solo adjacente.

No caso de **tubos flexíveis**, o tubo é geralmente menos rígido que o solo de envolvimento lateral (com a devida compactação). Sob ação do peso de solo (prisma 1), o tubo flexível tende a se deformar em maior grau que o solo de envolvimento lateral. Este, por ação da força de atrito ajudará o tubo a resistir à carga de terra.

Pelo que foi descrito, nota-se a importância do solo de envolvimento lateral para os tubos flexíveis. Quanto mais rígido for o solo (a rigidez dependerá do tipo de solo e grau de compactação), menor será a carga sobre a tubulação.

Na condição de vala o comportamento é semelhante, mas a carga é menor devido às forças de atrito interna do solo e atrito nas paredes da vala.

3.3 Capacidade de Carga

Os tubos flexíveis derivam sua capacidade de carga da sua própria flexibilidade. Sob a carga de solo, o tubo tende a defletir, acarretando uma diminuição do diâmetro vertical e um aumento do diâmetro horizontal. Isto provoca uma reação do solo de envolvimento lateral, que impede maiores deformações conforme mostra a figura 2.

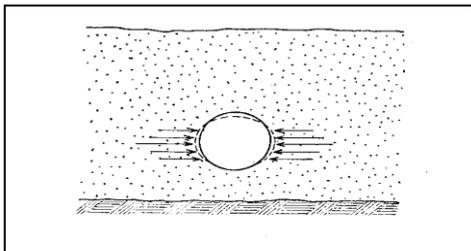


Figura 2 – Reação do solo de envolvimento lateral

Portanto:

A capacidade de carga dos tubos flexíveis não pode ser analisada considerando-se apenas o tubo isoladamente, mas o sistema tubo–solo. Portanto, verifica-se a importância do solo de envolvimento lateral. Quanto mais rígido (compactado) for o solo, melhor será a capacidade de carga do tubo flexível.

Os tubos rígidos por não se deformarem, não necessitam utilizar o solo de envolvimento lateral para resistirem aos esforços, e sua capacidade de carga dependerá apenas da resistência do próprio tubo.

4. DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL

O êxito de uma obra não depende, apenas, da elaboração de um bom projeto, mas e principalmente, da boa observância deste na fase da construção. Um fato amplamente comprovado é que, todos os acidentes, de quaisquer proporções, verificados em instalações de tubos, estão de alguma forma e sistematicamente, relacionados com deficiências de execução. A falta de sintonia entre o projeto e a construção é tão habitual que enquanto não se tiver convenientemente encaminhada a solução do problema, numa avaliação global, pouco se poderá aproveitar das potencialidades estruturais dos tubos.

A seguir, serão apresentados alguns conceitos envolvidos no cálculo estrutural de tubos rígidos e tubos flexíveis, abordando o aspecto dos dois principais tipos de cargas atuantes sobre as tubulações, e determinando a classe de resistência das tubulações rígidas e capacidade de carga das tubulações flexíveis.

4.1 Cargas de Terra

Uma das contribuições mais marcantes da teoria de MARSTON – SPANGLER é a demonstração, por princípios racionais de mecânica, que a carga de terra sobre uma canalização enterrada é grandemente afetada pelas condições de execução desta e não, apenas, pela altura do terrapleno. A carga de terra pode ser calculada pelas fórmulas de MARSTON, e depende principalmente do tipo de tubo (rígido ou flexível), tipo de solo, profundidade, e tipo de instalação. Em razão da reconhecida influência das condições construtivas as canalizações enterradas podem ser classificadas em dois tipos principais: valas ou trincheiras e aterros conforme figura 3.

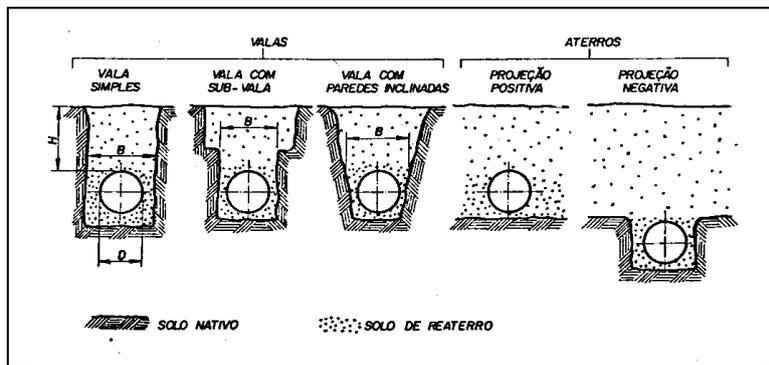


Figura 3 – Principais tipos de instalação para tubos enterrados

4.1.1. Situação de Vala ou aterro

A carga de terra sobre um tubo na condição de vala pode ser calculada pelas fórmulas de Marston:

- **Tubos rígidos:** $P = C_v * \gamma * B * B$
- **Tubos flexíveis:** $P = C_v * \gamma * B * D$

Onde:

P = carga sobre o tubo, por unidade de comprimento (N/m²);

C_v = coeficiente de carga para tubos instalados em vala, que depende do tipo de solo, da profundidade da instalação (H) e da largura da vala (B),

D = diâmetro externo do tubo (m);

B = largura da vala, no nível da geratriz superior do tubo (m).

Analisando as duas expressões, para cálculo da carga de terra, nota-se que a carga sobre um tubo rígido, nas mesmas condições de instalação, é sempre superior à carga sobre um tubo flexível, já que **B (da fórmula para o cálculo)** é sempre maior que **D**. Das fórmulas de Marston podemos concluir que a carga é diretamente proporcional à largura da vala, ou seja, um aumento da largura da vala acarreta um aumento da carga.

O cálculo da carga em tubulações para tubos na condição de aterro também pode ser feito usando-se a fórmula de MARSTON, sendo que nesta situação o tubo estará sujeito à carga máxima, pois não haverá alívio de carga devido ao atrito nas paredes da vala.

- **Tubos rígidos e flexíveis:** $P = C_A * \gamma * D^2$

Onde:

C_A = coeficiente de carga para tubos instalados na condição de aterro, sendo função do tipo de solo, da profundidade da instalação e do diâmetro do tubo, além de outros fatores dependentes de deformações do solo e da tubulação.

D = diâmetro externo do tubo (m);

γ = peso específico do solo de reaterro (Kgf/m³).

4.2 Cargas Móveis

São resultantes do tráfego na superfície, sendo que a pressão resultante no solo pode ser calculada através da integração de NEWMARK para a fórmula de BOUSSINESQ:

- $q_m = C * f * p$

Onde:

q_m = carga móvel distribuída (Kgf.m);

C = coeficiente de carga

f = fator de impacto (f = 1,5 - para rodovias e f = 1,75 - para ferrovias)

p = carga distribuída na superfície sobre uma área a x b (Kgf/m²)

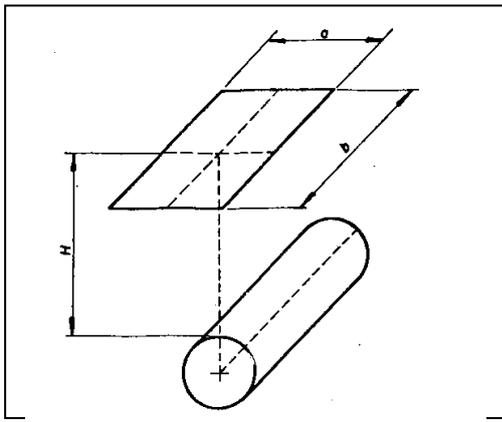


Figura 4 – Distribuição da carga móvel

4.3 Carga Total

É a soma da carga de terra, da carga móvel e de outras que porventura existam, tais como fundações, outras cargas localizadas, etc.

- $Q_{total} = Q_{terra} + Q_{móvel}$

4.4 Dimensionamento do Tubo - Rígido

O dimensionamento dos tubos rígidos pode ser simplificado ao cálculo de um tubo capaz de resistir a uma determinada carga num determinado ensaio de laboratório. Este processo é conhecido como de Spangler e Marston, sendo largamente aceito e aplicado no caso de tubos rígidos.

Dentre os vários métodos de ensaio destinados à determinação da resistência de um tubo, os quatro mais conhecidos, são o de três cutelos, o de dois cutelos, o do colchão de areia e o de Minnesota, conforme apresentado na figura 5:

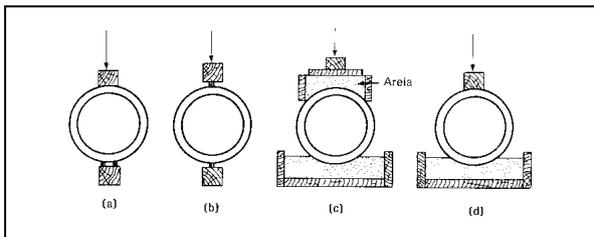


Figura 5 – Métodos de ensaio de tubos

LEGENDA

- (a) – ensaio de três cutelos
- (b) – ensaio de dois cutelos
- (c) – ensaio do colchão de areia
- (d) – ensaio de Minnesota

Quer pela simplicidade e facilidade de realização, quer pela exatidão e uniformidade dos resultados, o método dos três cutelos é o mais largamente usado; inclusive no Brasil. Como a capacidade de carga de uma tubulação enterrada, não depende apenas da resistência do tubo, mas também das condições de execução, e no caso dos tubos rígidos das condições de apoio, que melhoram a capacidade de carga, a relação entre a efetiva resistência do tubo instalado e a carga fornecida pelo ensaio de três cutelos, é dada em cada caso por um fator de equivalência (**fe**).

Portanto em função das condições de assentamento têm-se os seguintes fatores de equivalência para tubos na condição de valas.

- a) **bases condenáveis** – em que os tubos são assentes sem cuidados suficientes, não se tendo preparado o solo para que a parte inferior dos tubos repouse convenientemente, e deixando de encher os vazios do seu redor, ao menos parcialmente, com material granular. (**Fator de equivalência (fe) = 1,1**)
- b) **bases comuns** – em que os tubos são colocados no fundo das valas, sobre fundação de terra conformada para adaptar-se, perfeitamente, à parte inferior dos tubos, numa largura no mínimo igual a 0,5 D; sendo a parte restante envolvida, até uma altura de, pelo menos, 15cm acima da geratriz superior dos mesmos, por material granular, colocado e socado a pá, de modo a preencher os vazios. (**Fator de equivalência (fe) = 1,5**)
- c) **bases de 1ª classe** – em que os tubos são completamente enterrados em vala e cuidadosamente assentes sobre materiais de granulação fina, propiciando uma fundação, convenientemente conformada à parte inferior do tubo, numa largura de, pelo menos, 0,6 D. A superfície restante dos tubos é envolvida, inteiramente, até a altura mínima de 30cm acima da sua geratriz superior, com materiais granulares colocados, de modo a preencher todo o espaço periférico. O material de enchimento deve ser bem apilado, em camadas de espessura não superior a 15cm. (**Fator de equivalência (fe) = 1,9**)
- d) **bases de concreto** – em que a face inferior dos tubos é assente num berço de concreto, com $f_{ck} \geq 14$ MPa e cuja espessura, sob o tubo, deve ser no mínimo 0,25 D, e estendendo-se, verticalmente, até 0,25 D. Neste caso o fator de equivalência depende do tipo de execução e da qualidade de compactação de enchimento.
Fator de equivalência (fe) = 2,25 (concreto simples) e 3,40 (concreto armado)

Portanto, em função de todos os conceitos e variáveis envolvidas no projeto e dimensionamento de tubos rígidos abordados até este ponto, e considerando-se a condição de assentamento, pode-se calcular a carga total atuante sobre a tubulação através da seguinte fórmula:

- $Q = (Q_1 + Q_2 + Q_n) / fe$

Onde:

Q = carga total atuante sobre a tubulação

Q_1, Q_2, Q_3 e Q_n = cargas atuantes na tubulação (terra, carga móvel, e outras cargas),

fe = fator de equivalência em função do tipo de assentamento da tubulação.

Após o cálculo do valor da carga total atuante sobre a tubulação, deverá ser escolhida a classe de resistência do tubo que atende ao valor calculado.

Escolhida a classe do tubo que atende ao valor da carga total atuante sobre a tubulação, os tubos produzidos devem ser submetidos ao ensaio de compressão diametral pelo método dos três cutelos, para verificação do atendimento dos valores prescritos em norma, sendo que:

- TUBOS SIMPLES

$Q < Q_{ruptura}$

- TUBOS ARMADOS

$Q < Q_{trinca}$ e $1,5 \times Q < Q_{ruptura}$

4.5 Dimensionamento do tubo flexível – Cálculo da Deflexão

Os tubos flexíveis, se defletem sob carga, como já vimos, usando então o solo de envolvimento lateral como suporte para resistirem às cargas. Porém, há limites para esta deflexão, pois a partir de um determinado valor ocorre o colapso do tubo. Este é o comportamento normal de tubos flexíveis enterrados, sendo seu projeto pela teoria de Spangler, baseado na limitação da deflexão a um valor seguro. Para cargas muito elevadas (profundidades superiores a 10 m) em solos rígidos, é aconselhável a verificação do dimensionamento quanto ao esmagamento da parede e possibilidade de colapso localizado.

Portanto, o cálculo da deflexão de tubos flexíveis enterrados, baseado na teoria de Spangler, pode ser expresso por:

$$\frac{\delta}{D} = K \frac{D_r \times q_t \times q_m}{8 \times CR + 0,061 \times E'}$$

Onde:

δ = deflexão a longo prazo (diminuição do diâmetro vertical do tubo)

D = diâmetro médio do tubo;

K = constante de leito

D_r = coeficiente de deformação retardada

q_t = pressão no solo devido a carga de terra

q_m = pressão no solo devido a carga móvel

CR = classe de rigidez do tubo

E' = módulo reativo do solo

Entre todos fatores que entram na composição da fórmula de Spangler um os mais importantes é o **módulo reativo do solo, que é um fator indicativo da capacidade de suporte do solo de envolvimento lateral**, desempenhando papel fundamental na resistência à deflexão do tubo flexível.

O módulo reativo do solo depende principalmente do tipo de solo de envolvimento lateral e do grau de compactação. Solos granulares (areia, pedregulhos, brita) apresentam valores do módulo reativo bem maiores do que os solos finos (argila, siltes).

O grau de compactação do solo de envolvimento lateral influi tanto quanto o tipo de solo, sendo tanto maior o módulo reativo quanto maior o grau de compactação. Um dos melhores trabalhos produzido com o objetivo de apresentar valores para E' foi conduzido por HOWARD, do Bureau of Reclamation, dos Estados Unidos.

5. FALHAS EM TUBULAÇÕES RÍGIDAS

Dois mecanismos de falhas são característicos nas tubulações rígidas: falhas por deformação progressiva e falhas por subsidência.

5.1 Falha por deformação progressiva

Provocada pela combinação de uma falha estrutural do tubo (trincas) combinada com a perda de suporte do solo na região da geratriz inferior (e também ao redor do tubo), dando origem a deformações progressivas que podem levar ao colapso da tubulação. A perda de suporte normalmente deve-se à presença de água que infiltra/exfiltra pelas trincas existentes na tubulação e umedece o solo que perde resistência. A figura a seguir ilustra esse mecanismo de falha.

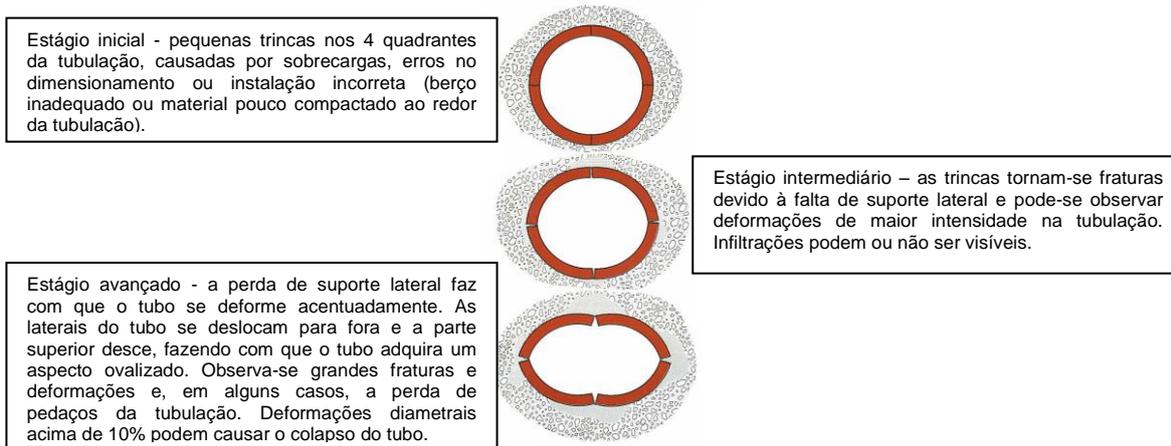


Figura 6 – Mecanismo de falha de tubulação rígida por deformação progressiva.



Figura 7 – Ilustração de falhas em tubulações rígidas por deformação progressiva.

5.2 Falha por subsidência

Outro mecanismo de falha dos tubos rígidos ocorre pela subsidência da tubulação. A infiltração de água do lençol freático ou a infiltração/exfiltração de água da própria tubulação por falta de estanqueidade nas juntas lavam o solo ao redor, causando perda de suporte da tubulação. Sem suporte o tubo sofre recalques que aumentam a abertura das juntas e a lavagem do solo ao redor. O carregamento assimétrico e a falta de suporte da tubulação devido ao deslocamento das juntas podem causar o trincamento dos tubos, o que acelera o processo, levando ao surgimento de deformações ou mesmo ao colapso da tubulação. A figura a seguir ilustra esse mecanismo de falha.

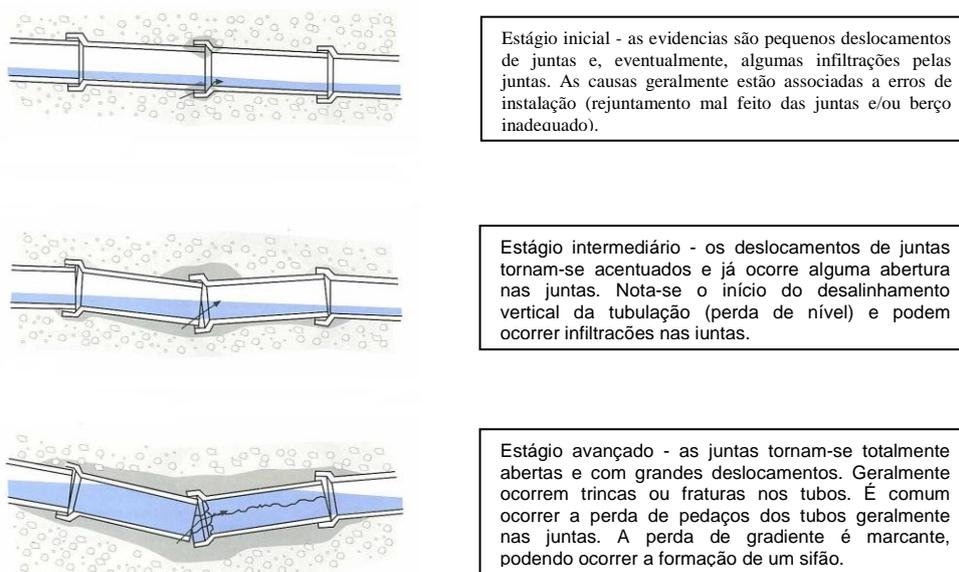


Figura 8 – Mecanismo de falha de tubulação rígida por *subsidência*.



Figura 9 – Ilustração de falhas em tubulações rígidas por *subsidência*.

6. FALHAS EM TUBULAÇÕES FLEXÍVEIS

Três mecanismos de falhas são característicos nas tubulações flexíveis: reversão de curvatura, esmagamento da parede e flambagem da parede.

6.1 Falha por reversão de curvatura

Mecanismo de falha dos tubos dos tubos flexíveis que ocorre pela deformação diametral excessiva provocando a reversão de curvatura e o subsequente colapso da tubulação. Este mecanismo de falha quase sempre ocorre devido a uma instalação inadequada da tubulação, seja pela escolha de um material inadequado para o envolvimento da tubulação, seja pela má compactação deste material dentro da vala. Em alguns casos, ocorre pela falta de resistência das paredes da vala sem que se tenha adotado uma largura de vala adequada para esta condição. Pouco tempo depois de ter sido instalada, a tubulação já apresenta deformações acentuadas que progressivamente vão aumentando até que seja alcançado o ponto de reversão de curvatura, quando a tubulação pode, a qualquer momento, entrar em colapso. Este mecanismo de falha é ilustrado nas figuras a seguir.

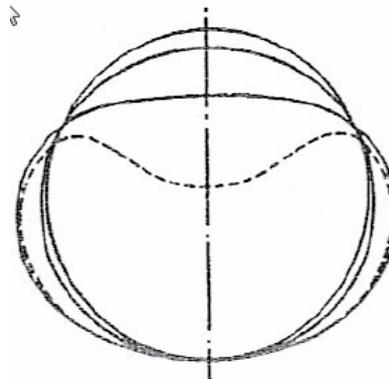


Figura 10 – Deformação progressiva até a reversão de curvatura (linha pontilhada)



Figura 11 – Reversão de curvatura - Deformação progressiva (tubo recém-instalado, após 2 semanas e apresentando início de reversão de curvatura)

6.2 Falha por esmagamento de parede

Mecanismo de falha que se dá pela compressão da parede além do limite suportado pelo material. Apesar de ser uma ocorrência muito rara em tubulações flexíveis, este tipo de falha pode ocorrer em tubos de elevada rigidez diametral, envolvidos por solos altamente compactados e sujeitos a uma elevada carga de aterro (tubos enterrados a grandes profundidades). A figura a seguir mostra esquematicamente o esmagamento da parede de um tubo flexível.

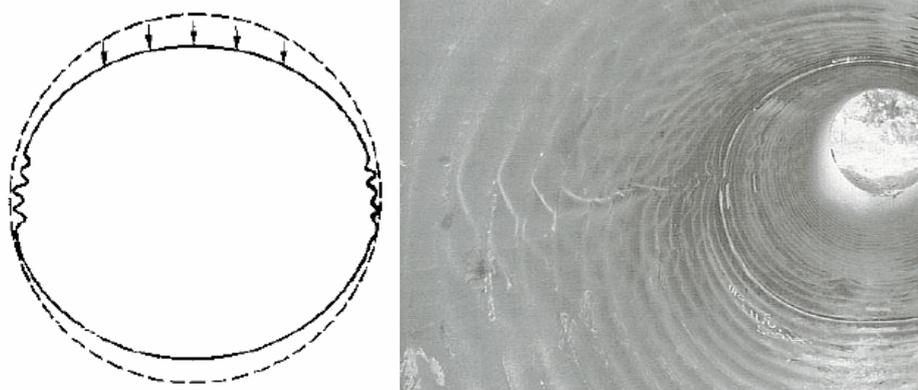


Figura 12 – Esmagamento de parede em um tubo flexível (tubo corrugado de PEAD)

6.3 Falha por flambagem da parede

Mecanismo de falha que pode ocorrer em tubos flexíveis e se dá por uma condição de instabilidade elástica da parede da tubulação. Esta falha, que pode ocasionar um colapso total da tubulação, geralmente ocorre em tubos com pequena rigidez diametral, envolvidos por solos bem compactados e submetidos a elevadas pressões externas, hidrostáticas ou aplicadas pelo solo, associadas ou não à ocorrência de subpressões internas. A sequência de colapso é ilustrada na figura a seguir.

O tubo que originalmente possui forma circular (a) é envolvido por um material de elevado módulo reativo e começa a ser carregado pelo solo de aterro. À medida que a altura de aterro vai aumentando, a parede do tubo (que geralmente possui pequena espessura) começa sofrer pequenas ondulações elásticas na metade inferior (b). A certa altura, uma dessas ondulações se torna maior que as demais e se projeta para o interior (c). Isto permite que o diâmetro vertical do tubo se contraia provocando o colapso da parte superior para dentro, como indicado em (d) na figura.

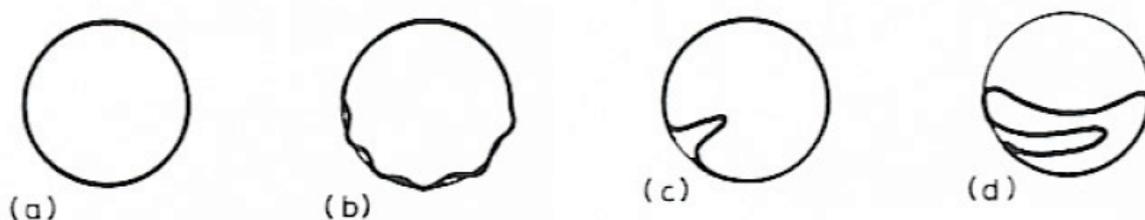


Figura 13 – Sequência de colapso de um tubo flexível por instabilidade elástica

7 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conforme apresentado anteriormente, na instalação de tubos rígidos o tipo da base de apoio é de fundamental importância, pois quanto maior for o fator de equivalência, fator este que depende da melhoria da qualidade do tipo de base de apoio, menor serão os esforços solicitantes atuando sobre a tubulação. Com a melhoria da base de apoio a possibilidade de ocorrerem falhas estruturais nos tubos será menor, sendo que, no caso do uso de lastro, laje e berço de concreto para assentamento de tubos rígidos, além da carga atuante sobre a tubulação ser menor também será menor a pressão exercida pela tubulação sobre o solo. Face ao exposto, a possibilidade de ocorrerem falhas estruturais nos tubos será menor e o solo no fundo da vala poderá ser menos resistente sem

que ocorram recalques expressivos ou diferenciais. Assim, grande parte das falhas que ocorrem em tubulações rígidas poderia ser evitada se a construção de laje e berço de concreto fosse uma prática comum. Complementando, os tubos rígidos por não se deformarem não utilizam o solo de envolvimento lateral para resistirem aos esforços e sua capacidade de carga dependerá apenas da resistência do tubo.

Com relação à instalação de tubos flexíveis há alguns fatores importantes que devem ser observados, como o tipo de solo, o tipo de instalação, o material de envolvimento do tubo e a correta colocação e compactação do mesmo, ou seja, o tipo de instalação influi diretamente na carga atuante sobre o tubo.

Os tubos flexíveis enterrados derivam sua capacidade de suportar cargas de um complexo mecanismo de interação entre o tubo e o solo que o envolve. Sob a ação de cargas verticais aplicadas pelo solo, um tubo flexível tende a se deformar diametralmente, de tal modo que sua seção transversal passe da forma circular original a uma forma elíptica final, havendo consequentemente uma diminuição do diâmetro vertical e um correspondente aumento do diâmetro horizontal.

Estando o tubo confinado lateralmente pelo solo de envolvimento, o aumento do diâmetro horizontal enfrentará uma resistência passiva do solo que restringirá este movimento. O empuxo passivo que atua na parede lateral do tubo restringindo o seu deslocamento pode ser entendido como a resultante das tensões horizontais desenvolvidas no solo, quando o tubo se desloca empurrando a massa de solo, em seu estado limite de ruptura. Nessa situação, as tensões horizontais efetivas que surgem no solo serão superiores às tensões horizontais na condição de repouso e serão dependentes da coesão e do ângulo de atrito do solo de envolvimento. Ao mesmo tempo em que a deformação horizontal mobiliza o empuxo passivo do solo, a deformação vertical do tubo irá aliviá-lo de grande parte da carga vertical que passará a ser suportada pelo solo de envolvimento através de um mecanismo de arqueamento das tensões no solo circundante.

8. REFERÊNCIAS

1. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **Tubo de Concreto, de seção circular, para águas pluviais e esgotos sanitários – Requisitos e métodos de ensaio, NBR 8890-2007.**
2. AMERICAN CONCRETE PIPE ASSOCIATION. **Concrete Pipe Handbook.** Chicago, Illinois, USA, August, 1959.
3. AMERICAN CONCRETE PIPE ASSOCIATION. **Concrete Pipe Handbook.** Vienna, Virginia, USA, January, 1980.
4. AMERICAN CONCRETE PIPE ASSOCIATION. **Concrete Pipe Handbook.** Irving, 1998.
5. AMERICAN CONCRETE PIPE ASSOCIATION. **Concrete Pipe Design Manual.** Arlington, Virginia, USA, February, 1970.
6. CHAMA NETO, PEDRO JORGE **Avaliação de Desempenho de tubos de Concreto com fibras de Aço,** São Paulo, 2002, Dissertação de Mestrado apresentado a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
7. CHAMA NETO, PEDRO JORGE e RELVAS, FERNANDO JOSÉ **Avaliação Comparativa de Desempenho entre Tubos Rígidos e Flexíveis para Utilização em Obras de Drenagem de Águas Pluviais,** Boletim Técnico ABTC / ABCP, São Paulo, 2003.
8. LATERZA, L.B.M. **Contra-indicação do uso de berços de concreto para tubulações plásticas enterradas,** Artigo Técnico, São Paulo, Junho 2007
9. ZAILLER, WALDEMAR. **Projetos estruturais de tubos enterrados.** PINI Editora, São Paulo, S.P., 1983.