

COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DE TUBOS RÍGIDOS E FLEXÍVEIS ENTERRADOS



Pedro Jorge Chama Neto
Departamento de Acervo e Normalização
Técnica - TXA

Objetivo do Trabalho

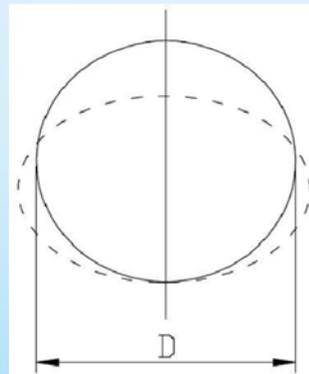
Apresentar, de forma resumida, os princípios que regem o comportamento de tubos rígidos e flexíveis enterrados, visando facilitar o entendimento :

- dos conceitos aplicados em projeto; e
- causa das falhas, devido ao assentamento feito de forma inadequada.

Princípios Básicos

Tubos rígidos: aqueles que, quando submetidos à compressão diametral, podem sofrer deformações de até 0,1% no diâmetro (cerâmica, concreto e ferro fundido - nos diâmetros menores).

Tubos flexíveis: aqueles que, quando submetidos à compressão diametral, podem sofrer deformações superiores a 3% no diâmetro (aço e materiais plásticos).

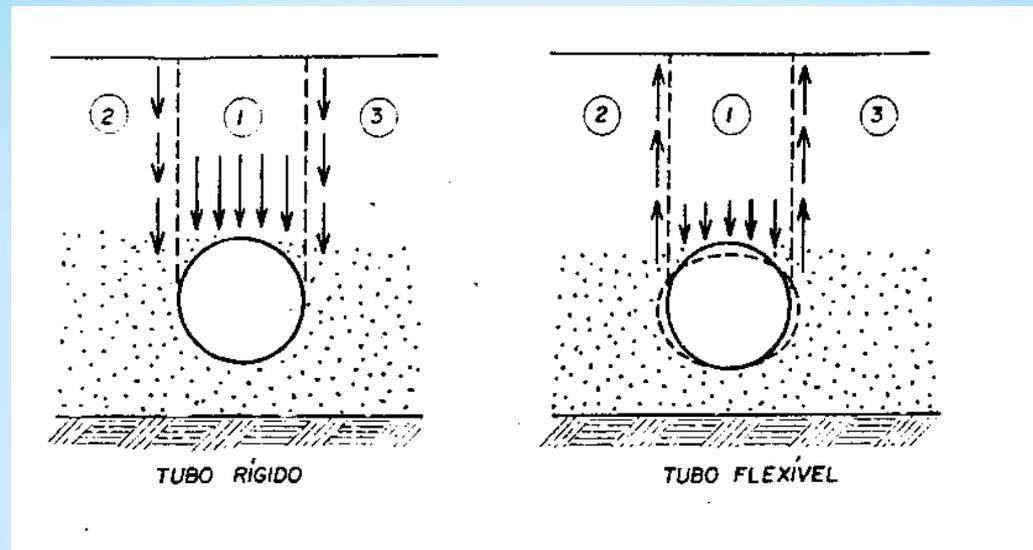


○ Capacidade de carga

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.

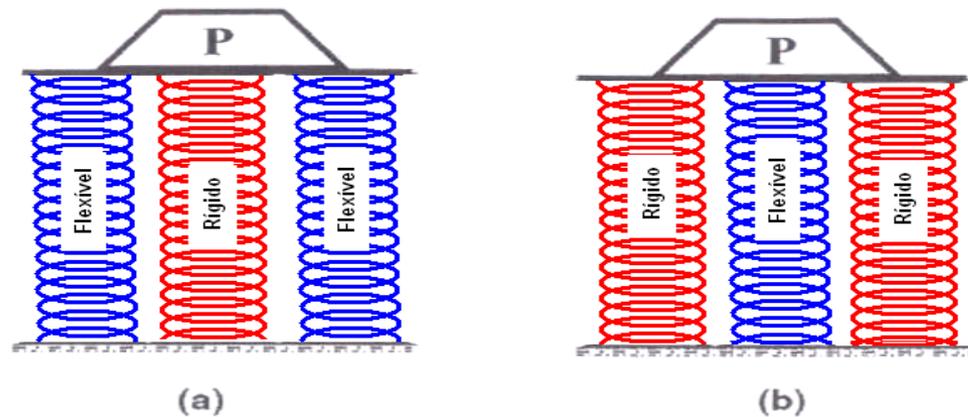
Tubos flexíveis: A capacidade de carga não pode ser analisada considerando-se apenas o tubo isoladamente, mas o sistema tubo–solo. Portanto, verifica-se a importância do solo de envolvimento lateral. Quanto mais rígido (compactado) for o solo, melhor será a capacidade de carga do tubo flexível.

Capacidade de carga



MOLAS VERMELHAS SÃO RÍGIDAS

MOLAS AZUIS SÃO FLEXÍVEIS



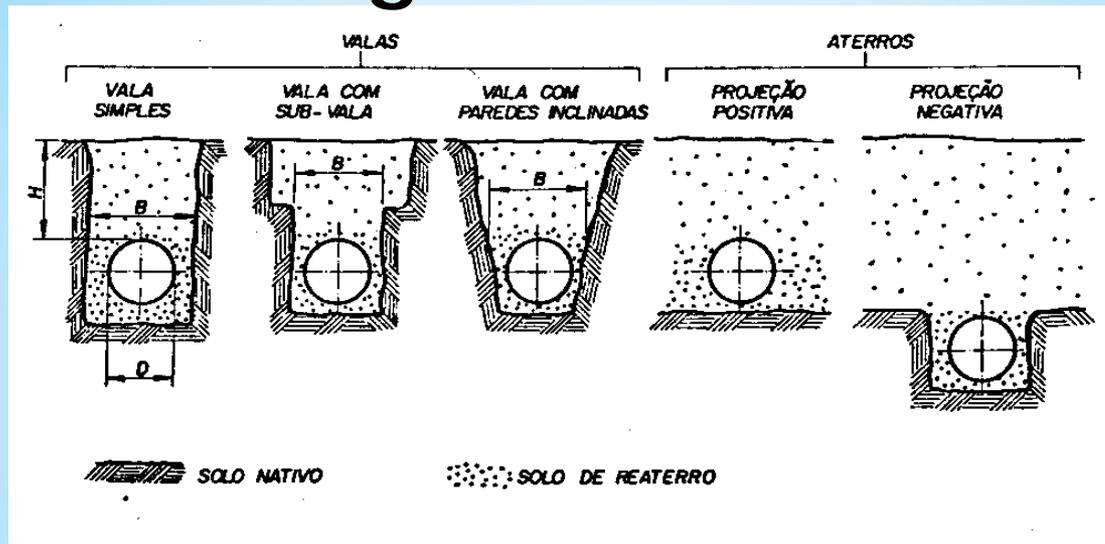
Capacidade de carga

EFEITO DOS PARÂMETROS NA DEFLEXÃO – TUBOS FLEXÍVEIS



Dimensionamento estrutural

Carga de Terra



Situação de vala

Tubos rígidos: $P = C_v * \gamma * B * B$

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

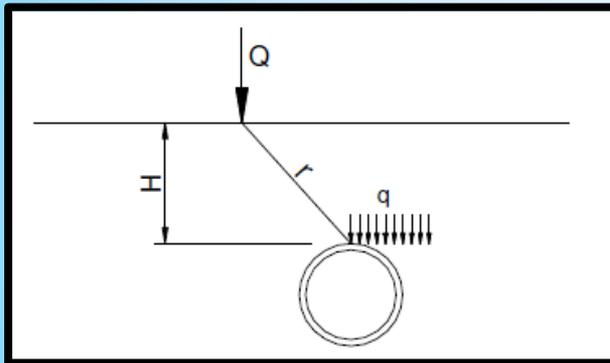
Situação de aterro

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

Dimensionamento estrutural

Cargas Acidentais

Para determinar a máxima pressão vertical atuante sobre a tubulação, devida a uma carga situada na superfície, costuma-se utilizar a expressão de Boussinesq:



$$q = \frac{3 \cdot Q \cdot H^3}{2 \cdot \pi \cdot r^5}$$

onde:

q = pressão vertical sobre o tubo devida à uma carga atuante na superfície (kN/m²)

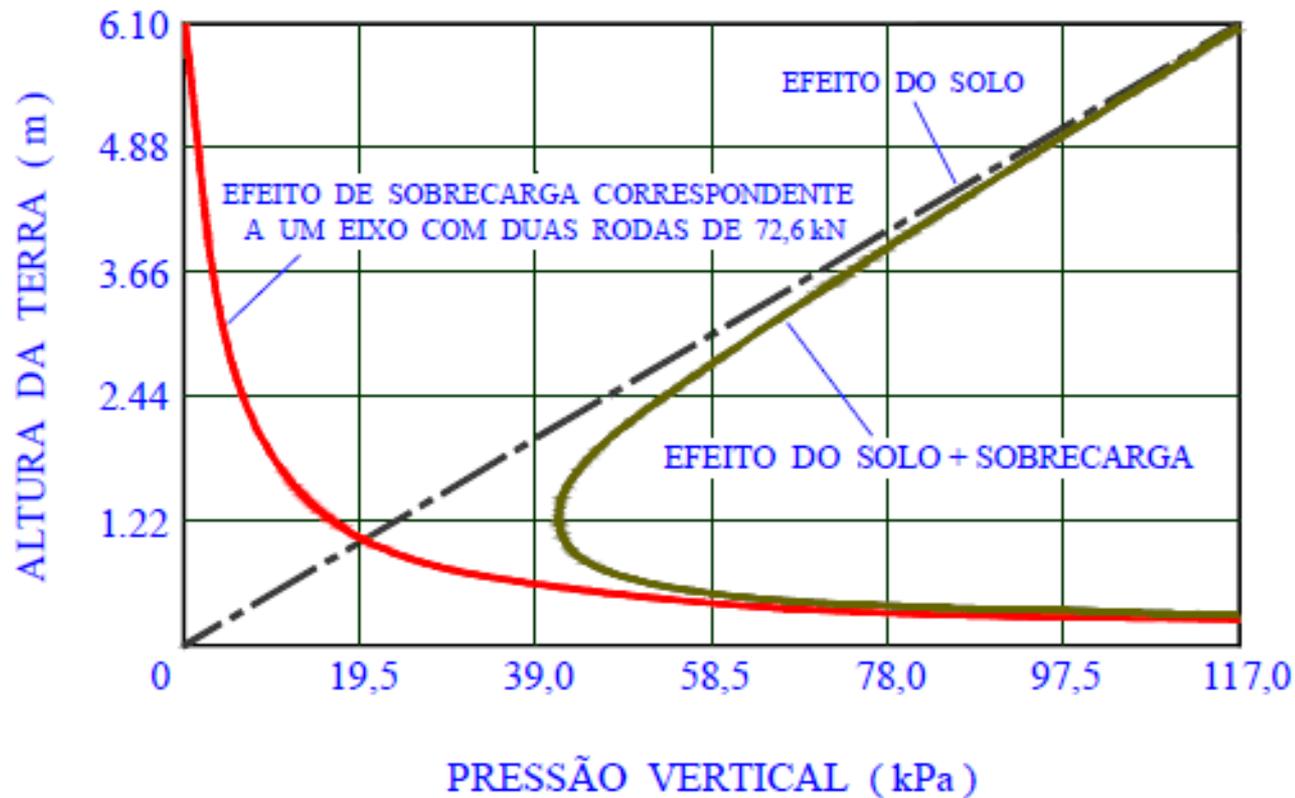
Q = carga atuante na superfície (kN)

H = recobrimento total (distância vertical entre a carga e o tubo) (m)

r = distância entre a geratriz superior do tubo e o ponto de aplicação da carga (m)

Dimensionamento estrutural

Carga Total

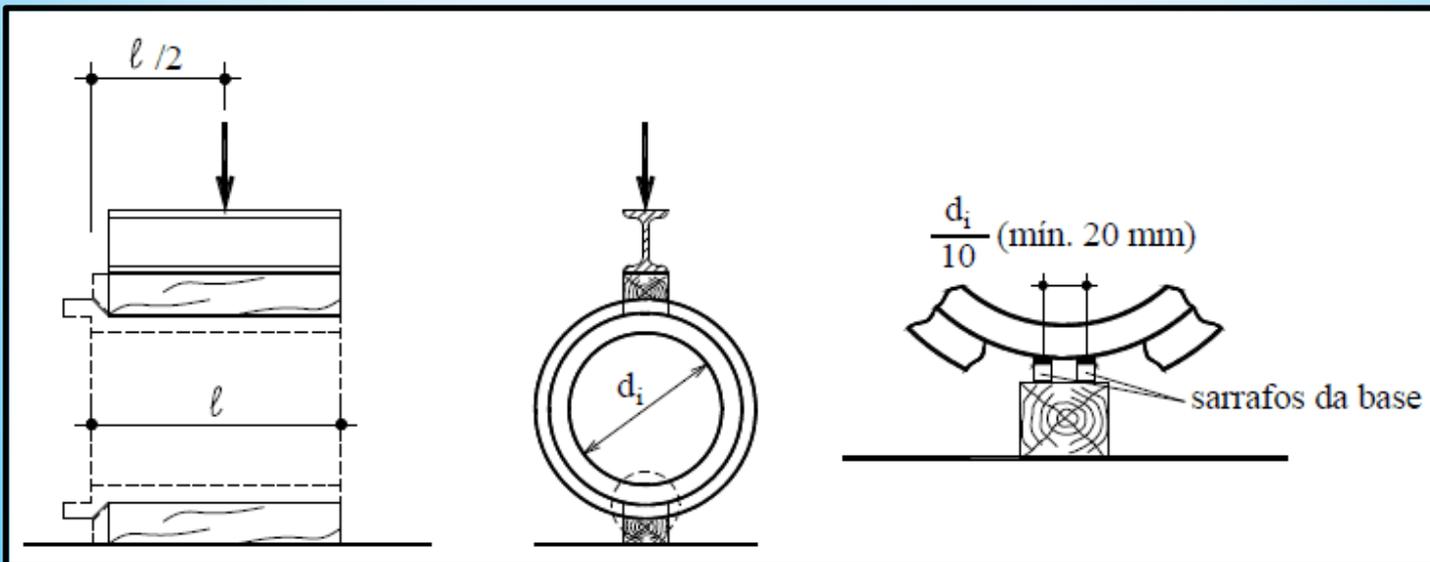


Dimensionamento estrutural

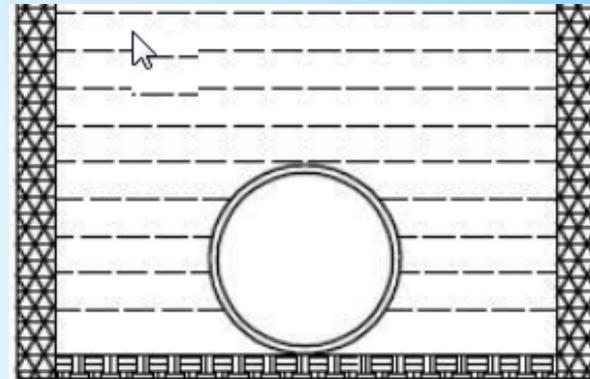
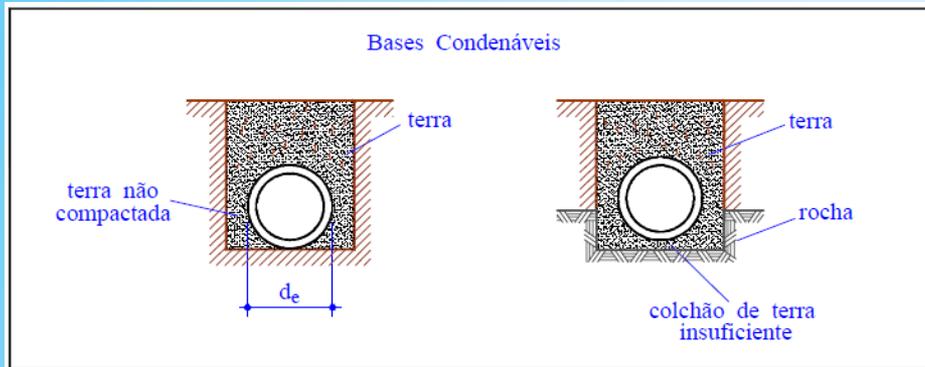
Tubos Rígidos

A força correspondente ao ensaio de compressão diametral vale:

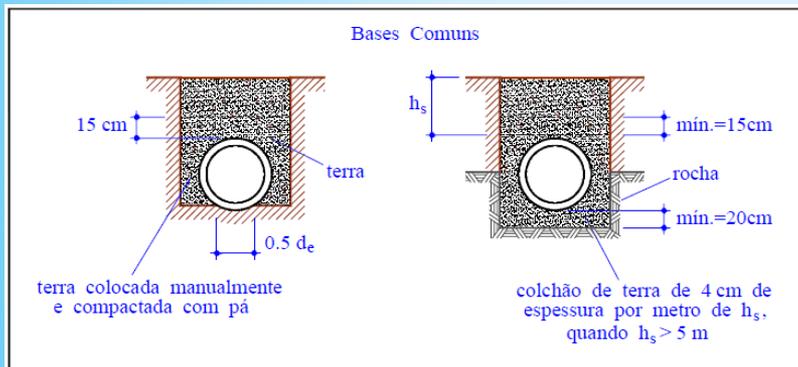
$$F_{ens} = \frac{(q + q_m)}{\alpha_{eq}}$$



Dimensionamento estrutural



Fator de equivalência = 1,1



Fator de equivalência = 1,5

Bases de concreto ou Classe A	2,25 a 3,4
Base de primeira classe ou Classe B	1,9
Base comum ou Classe C	1,5
Base condenável ou Classe D	1,1

$$F_{ens} = \frac{(q + q_m)}{\alpha_{eq}}$$

Dimensionamento estrutural

DN	Água pluvial								Esgoto sanitário					
	Carga mín. trinca (kN/m)				Carga mín. ruptura (kN/m)				Carga mín. trinca (kN/m)			Carga mín. ruptura (kN/m)		
Classe	PA1	PA2	PA3	PA4	PA1	PA2	PA3	PA4	EA2	EA3	EA4	EA2	EA3	EA4
300	12	18	27	36	18	27	41	54	18	27	36	27	41	54
400	16	24	36	48	24	36	54	72	24	36	48	36	54	72
500	20	30	45	60	30	45	68	90	30	45	60	45	68	90
600	24	36	54	72	36	54	81	108	36	54	72	54	81	108
700	28	42	63	84	42	63	95	126	42	63	84	63	95	126
800	32	48	72	96	48	72	108	144	48	72	96	72	108	144
900	36	54	81	108	54	81	122	162	54	81	108	81	122	162
1000	40	60	90	120	60	90	135	180	60	90	120	90	135	180
1100	44	66	99	132	66	99	149	198	66	99	132	99	149	198
1200	48	72	108	144	72	108	162	216	72	108	144	108	162	216
1500	60	90	135	180	90	135	203	270	90	135	180	135	203	270
1750	70	105	158	210	105	158	237	315	105	158	210	158	237	315
2000	80	120	180	240	120	180	270	360	120	180	240	180	270	360

Carga diametral de fissura / ruptura kN/m⁽¹⁾

Qd	40	60	90	120	60	90	135	180	60	90	120	90	135	180
----	----	----	----	-----	----	----	-----	-----	----	----	-----	----	-----	-----

(1) Carga diametral de fissura ou ruptura (Qd) é a relação entre a carga de trinca ou ruptura e o diâmetro nominal do tubo.

(2) Para tubos simples com diâmetro igual ou menor que 400 mm, a carga mínima de ruptura é a correspondente a este valor.

(3) Outras classes podem ser admitidas mediante acordo entre fabricante e comprador, devendo ser satisfeitas as condições estabelecidas nesta Norma para tubos de classe normal. Para tubos armados a carga de ruptura mínima deve corresponder a 1,5 da carga de fissura mínima.

Nomenclatura: PS = Tubo de concreto simples para águas pluviais; ES = Tubo de concreto simples para esgoto sanitário;

PA = Tubo de concreto armado para águas pluviais; EA = Tubo de concreto armado para esgoto sanitário;

Dimensionamento estrutural

Tubos Flexíveis

$$\frac{\Delta y}{D} = \frac{K(p + q)}{8 \times RA + 0,061 \times E'}$$

Δy = deformação diametral (m);

D = diâmetro da tubulação (m);

K = constante de assentamento, normalmente igual a 0,1;

p = carga permanente (N/m²);

q = carga móvel (N/m²);

RA = rigidez anular da tubulação (N/m²);

E' = módulo de reação do solo de envolvimento (Pa)

Módulo Reativo do Solo E' (Mpa)					
Tipo de Solo	Classificação USCS	Exemplo	Compactação Boa GC $\geq 90\%$	Compactação Moderada $80\% < GC < 90\%$	Sem Compactação
Material granular sem finos (menos de 12%)	GW GP SW SP	Brita Graduada Brita Corrida Areia Bem Graduada Areia Pura	14	7	1,4
Material granular com finos (entre 12 e 25%)	GM GC SM SC	Pedregulho Argiloso Pedregulho Arenoso Areia Argilosa Areia Siltosa Solo - Brita	7	2,8	0,7

GW	= Pedregulho bem Graduado
GP	= Pedregulho Pobremente Graduado
SW	= Areia bem Graduada
SP	= Areia Pobremente Graduada
GM	= Pedregulho Siltoso
GC	= Pedregulho Argiloso
SM	= Areia Siltosa
SC	= Areia Argilosa

USCS = Sistema Unificado de Classificação de Solos

Falhas em tubulações Rígidas

Falha por deformação progressiva

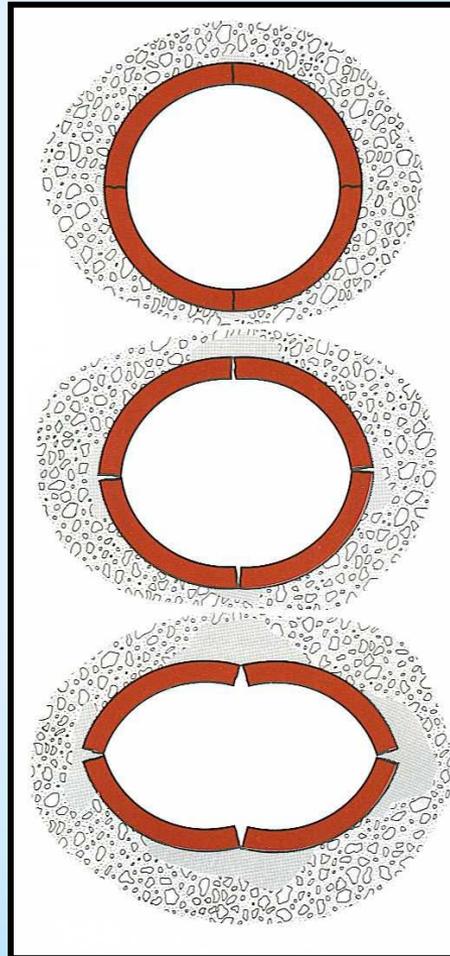
Falha estrutural do tubo
(trincas)

+

perda de suporte do solo
(região da geratriz inferior
e ao redor do tubo)

+

água que infiltra/ exfiltra
pelas trincas existentes na
tubulação



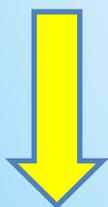
Falhas em tubulações Rígidas

Falha por subsidência

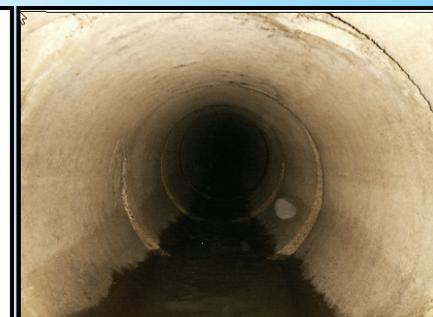
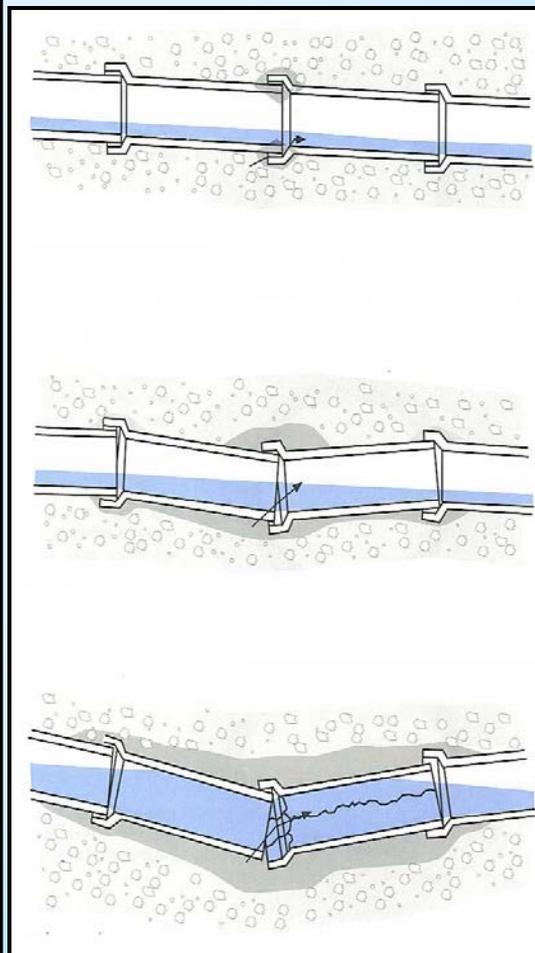
Infiltração de água do lençol ou a infiltração/exfiltração de água tubulação por falta de estanqueidade nas juntas

+

carreamento do solo ao redor do tubo



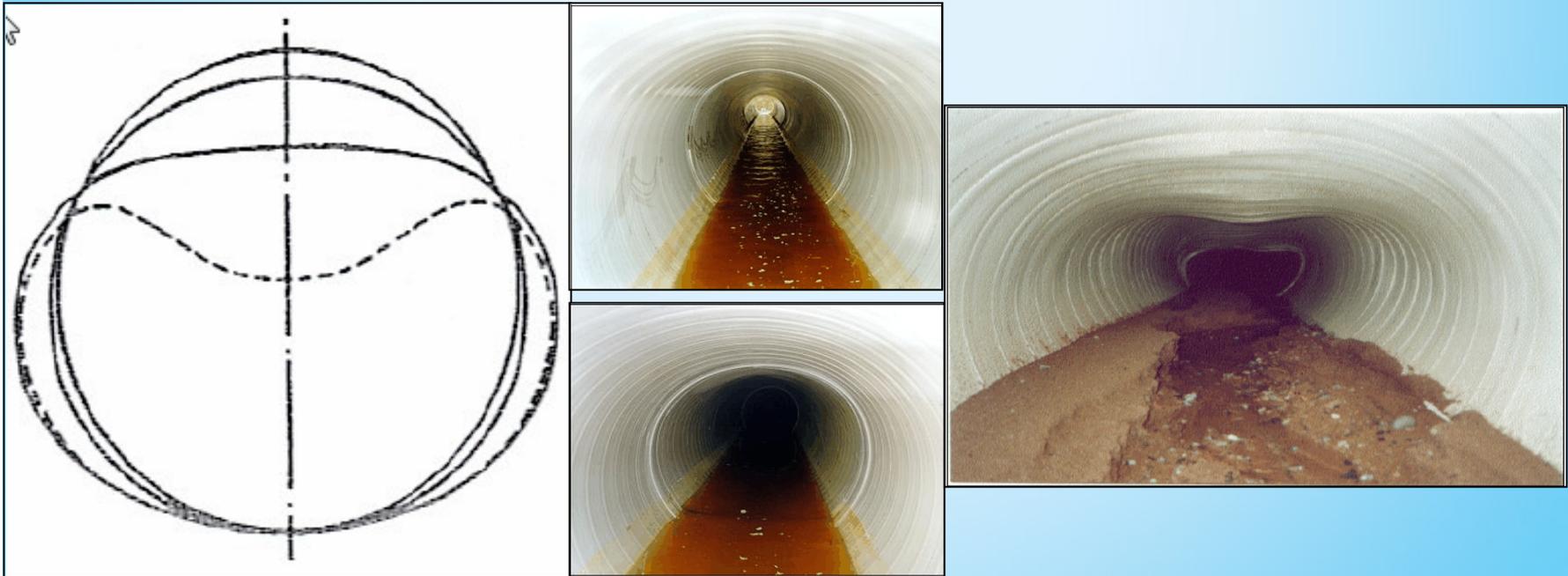
perda de suporte e posterior recalque causando trincas dos tubos e levando ao colapso.



Falhas em tubulações Flexíveis

Falha por Inversão de curvatura

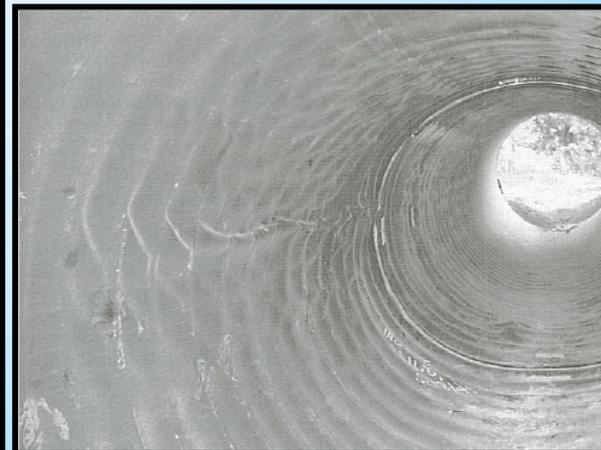
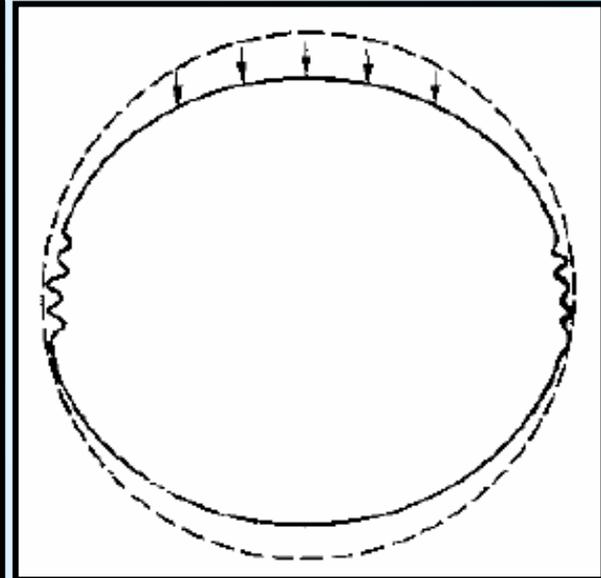
Deformação diametral progressiva devido a instalação inadequada (escolha de um material inadequado para o envolvimento da tubulação ou má compactação deste material dentro da vala) até que seja alcançado o ponto de inversão de curvatura provocando o colapso.



Falhas em tubulações Flexíveis

Falha por esmagamento de parede

- Compressão da parede além do limite suportado pelo material do tubo
- Ocorrência muito rara em tubulações flexíveis
- Mas 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).

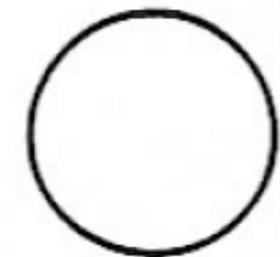


Falhas em tubulações Flexíveis

Falha por flambagem da parede

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.

Tubo de forma circular (a). Conforme a altura de reaterro vai aumentando, a parede do tubo (com pequena espessura) começa sofrer pequenas ondulações (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).



(a)



(b)



(c)



(d)