



APRH

ASSOCIAÇÃO PORTUGUESA DOS RECURSOS HÍDRICOS



ABES ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE
ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

I SIMPÓSIO LUSO-BRASILEIRO DE
ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

SISTEMAS DE PRODUÇÃO E DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

TUBOS DE POLIESTER REFORÇADO COM FIBRA DE
VIDRO DE GRANDE DIÂMETRO

JORGE DIAS DE CARVALHO

E

JOSE COSTA MIRANDA

Engenheiros Consultores da Hidrotécnica Portuguesa
Lisboa. Portugal

RESUMO

A utilização deste tipo de tubos em sistemas de adução de água com diâmetros iguais ou superiores a 1000 mm é de utilização recente em Portugal e não tem sido muito frequente, conhecendo -se mesmo a nível mundial a sua aplicação em número muito limitado.

No artigo descrever-se-ão os critérios de dimensionamento estrutural e hidráulico dos tubos, que em geral são considerados, os diferentes tipos de junta de ligação entre tubos e outros por menores construtivos, tais como amarrações e ligações a obras de betão, que para este tipo de tubos têm aspectos particulares.

la acção das cargas verticais, as paredes do tubo desenvolvem um movimento horizontal contra o solo, colocado lateralmente, a que se opõe a resistência passiva desse mesmo solo.

A resistência do solo é afectada essencialmente pelo tipo de solo e seu grau de compactação, donde resulta que a deformação perimetral do tubo é tanto menor quanto maior for a resistência do solo onde está inserido. É fundamental, portanto, para a sua boa colocação, que os solos envolvendo tubos flexíveis, disponham de características adequadas, de modo a assegurar a fácil mobilização da necessária resistência passiva, por forma a evitar uma excessiva deformação do tubo.

2 - PRINCÍPIOS DE CÁLCULO

2.1 - CARGAS VERTICAIS EXTERNAS SOBRE O TUBO

2.1.1 - Acção das terras

As teorias de Marston têm sido aplicadas na determinação das cargas verticais produzidas pela acção dos solos sobre o tubo. Recentemente, têm sido adaptados processos mais conservativos para estimar a acção das terras, considerando a altura do aterro sobre o tubo sem alteração. Essa acção será dada por:

$$q_j = \gamma \cdot H \text{ (kgf.m}^2\text{)}$$

em que:

$$q_j = \text{pressão vertical das terras (kg.m}^{-2}\text{)}$$

$$\gamma = \text{peso específico do aterro (kgf.m}^{-3}\text{)}$$

$$H = \text{altura do aterro sobre o tubo (m)}$$

Se o nível freático estiver posicionado acima da geratriz superior do tubo, as pressões das terras situadas inferiormente a esse nível, são determinadas considerando o peso específico submerso.

Há também que ter em conta a pressão externa da água, no caso de presença do nível freático acima do tubo e que é determinada por:

$$q_v = \gamma_a \cdot h \text{ (kgf.m}^{-2}\text{)}$$

em que:

$$q_v = \text{pressão da água no tubo (kgf.m}^{-2}\text{)}$$

$$\gamma_a = \text{peso específico da água (kgf.m}^{-3}\text{)}$$

1 - INTRODUÇÃO

Nos últimos anos tem-se assistido a uma utilização cada vez maior de tubos de plástico, devido à necessidade de recorrer a diâmetros de grandeza apreciável, nas condutas adutoras dos abastecimentos de água importantes e nos emissários das redes de esgoto, sobretudo de instalações industriais. Tem-se destacado, neste crescimento de aplicação, os tubos de poliéster reforçado a fibra de vidro.

A principal dificuldade com que se depara o projectista quando tem necessidade de utilizar este tipo de material diz respeito essencialmente à escassa informação disponível, nomeadamente quanto a características do material e sua evolução a longo prazo. Esta dificuldade é agravada pelo modo pouco automatizado com que os tubos são feitos e pela heterogeneidade do material utilizado na sua confecção, o que impede uma fácil extrapolação dos resultados obtidos.

Vários investigadores se têm debruçado sobre os princípios de cálculo de tubos de plástico dos quais são de salientar, entre outros, SPANGLER, MATTSSON, LUSCHER, NIELSON, GREENWOOD, ALLGOOD e JAN MOLIN.

No presente trabalho pretende-se, com base na bibliografia referida e na experiência pessoal, referir princípios de cálculo práticos, a nível de ante-projecto, do dimensionamento estrutural de tubos de plástico enterrados em valas.

A estabilidade de um tubo flexível depende, em muito, das características do solo que o rodeia. De acordo com a teoria de Spangler a distribuição das pressões à volta de um tubo flexível está representada na Figura 1. Verifica-se dessa figura que, pe-

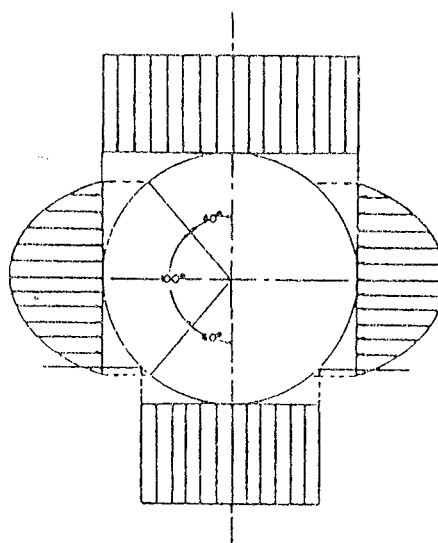


Figura 1 - Distribuição das pressões à volta de um tubo enterrado (Teoria de SPANGLER)

h = distância entre o nível freático e o centro do tubo (m)

A Figura 2 define a simbologia usada.

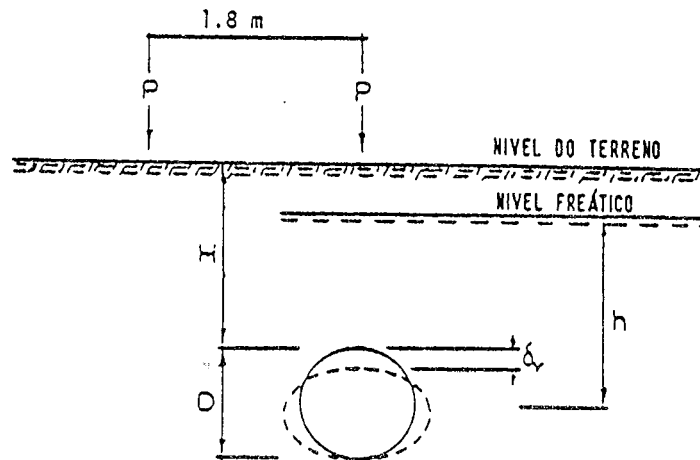


Figura 2 - Tubo enterrado. Simbologia

O peso efectivo por unidade de volume de aterro, normalmente considerado, varia entre $1,8$ e $2,0 \text{ tf.m}^{-3}$, acima do nível freático, e de $1,1 \text{ tf.m}^{-3}$ abaixo do nível freático.

2.1.2 - Cargas concentradas

As pressões devidas a cargas concentradas (ou cargas rolantes) actuando na superfície do terreno, sobre os tubos, podem ser deduzidas através da teoria de BOUSSINESQ.

A pressão sobre os tubos é porém dependente da sua rigidez.

Para os graus de rigidez, que usualmente os tubos de plástico apresentam, a pressão vertical pode ser determinada através da fórmula:

$$q_t = C \cdot \frac{3P}{2 \cdot \pi \cdot H^2} \text{ (kgf.m}^{-2}\text{)}$$

em que:

$$q_t = \text{pressão vertical (kgf.m}^{-2}\text{)}$$

C = coeficiente dependente da influência de várias cargas

P = carga concentrada (carga por roda no caso de cargas rolantes) (kgf.)

H = altura do aterro sobre o tubo (m)

C terá o valor de $1,0$ se o tubo for influenciado apenas por

uma roda. A Figura 3 apresenta a variação do valor de C para o caso de o tubo ser influenciado por duas rodas distanciadas de 1,8m.

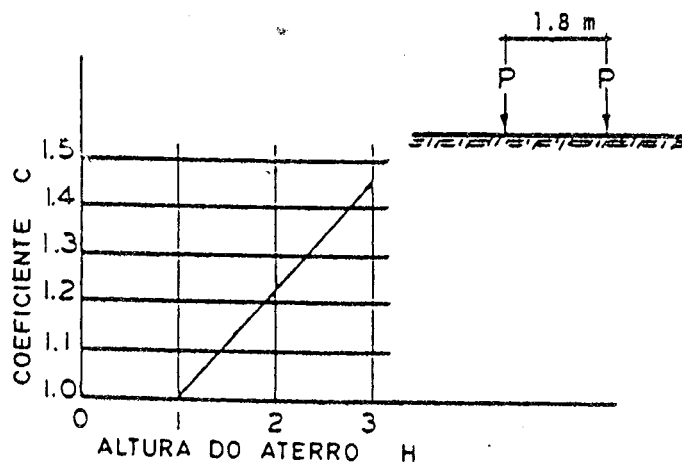


Figura 3 - Coeficiente C para duas rodas separadas de 1,8 metros

A influência das cargas rolantes diminui rapidamente com a altura do aterro, sendo pequena, se comparada com a ação das terras, para aterros superiores a 3 metros.

2.2 - PARAMETROS DO SOLO ENVOLVENDO OS TUBOS

As expressões dadas por Molin, para cálculo das deformações e da pressão exterior crítica de rotura dos tubos, tem em conta os seguintes parâmetros do solo: módulo secante e módulo tangente. A definição destes módulos está patente na Figura 4 e são obtidos através de ensaios de compressão feitos em moldes cilíndricos.

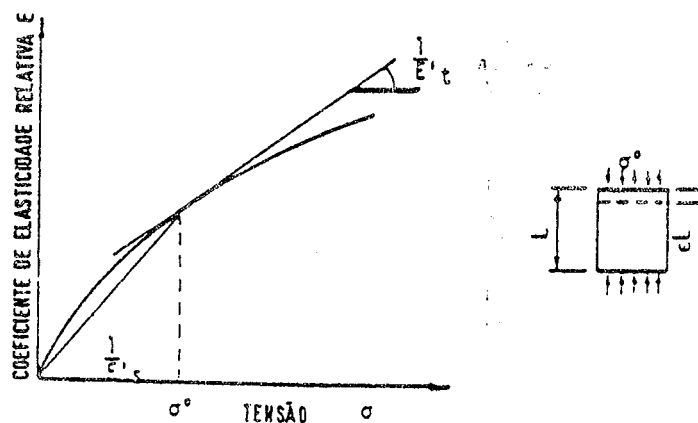


Figura 4 - Definição dos módulos secante (E'_s) e tangente (E'_t)

Segundo Molin o método do módulo secante pode ser usado, em casos práticos, na determinação da deformação dos tubos desde que o aterro circunferencial seja constituído por material granular.

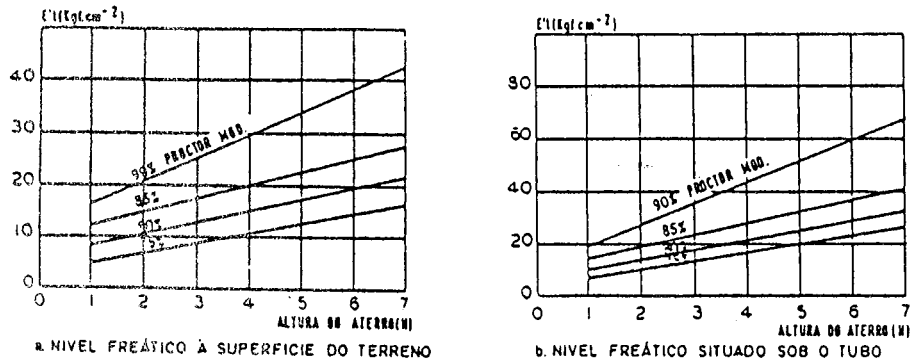


Figura 7 - Módulos tangentes para solos granulares

Molin aconselha que o aterro circunferencial seja constituído por material granular compactado a 85% do grau óptimo dado pelo ensaio do Proctor modificado. Sob estradas, com tráfego pesado, preconiza 90% do Proctor modificado.

2.3 - PRESSÃO CRÍTICA DE DEFORMAÇÃO

A pressão crítica (acção externa) dos tubos de plástico, pode ser determinada pela expressão seguinte que se aplica a um anel rodeado de solo:

$$q_{cr} = 2,3 \cdot (E'_t \cdot E_{50})^{1/2} \cdot (e/D)^{3/2}$$

em que:

q_{cr} = pressão exterior crítica de rotura por deformação (kgf.cm^{-2})

E'_t = módulo tangente à pressão exterior de rotura (valores dados pela Figura 7) (kgf.cm^{-2})

E_{50} = módulo de elasticidade do material do tubo em prazo longo (após 50 anos - Quadro 1)

e = espessura da parede do tubo (cm)

D = Diâmetro do tubo (cm).

A pressão admissível é dada por $q_{ad} = \frac{q_{cr}}{F}$, sendo F o factor de segurança, que não deve ser inferior a 2. A pressão exterior exercida sobre o tubo não deve exceder a pressão admissível.

A expressão precedente aplica-se a tubos flexíveis envolvidos por material granular. Para tubos mais rígidos ou envolvidos por material mais flexível deve ser usada a expressão seguinte:

Como se observa da Figura 4 os módulos secante e tangente são obtidos do traçado da curva tensões de compressão-deformação relativas.

A Figura 5 mostra curvas típicas de tensões-deformações relativas e também outras que relacionam tensões e módulos secantes, para vários tipos de solos.

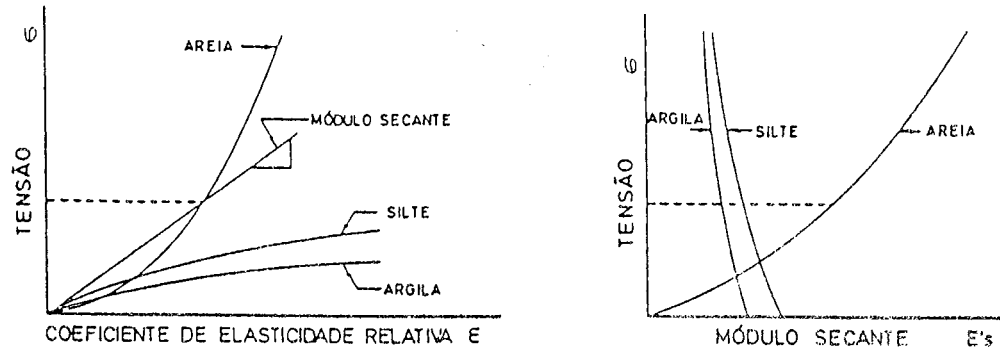


Figura 5 - Deformações relativas e módulo secante

Destas curvas pode-se inferir que os solos granulares possuem módulos superiores aos dos solos coesivos.

Os módulos referidos dependem do grau de compactação do aterro à volta do tubo, da pressão efectiva (altura do aterro) e da posição do nível freático.

A Figura 6 indica, em relação a solos granulares, os mínimos valores do módulo secante, para diferentes graus de compactação e diferentes alturas de aterro e nas situações de nível freático coincidindo com a superfície do terreno e situado abaixo do tubo.

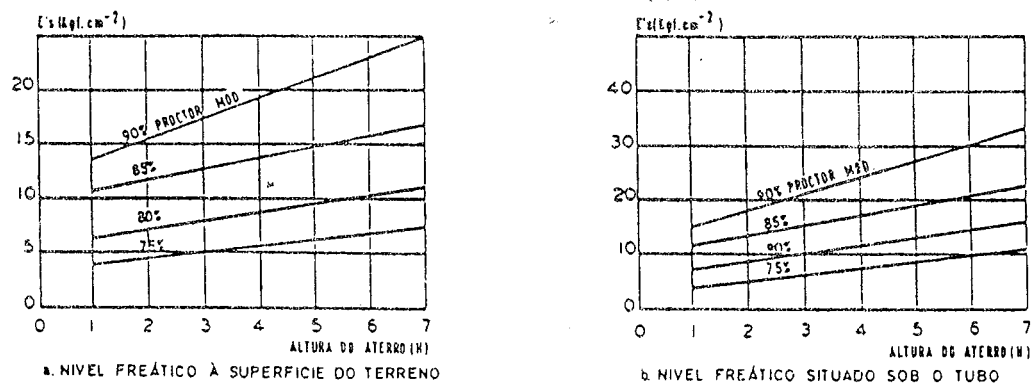


FIGURA 6 - MÓDULOS SECANTES PARA MATERIAL GRANULAR

A Figura 7 mostra, para condições idênticas às referidas no precedente, os valores do módulo tangente.

$$q_{ad} = \frac{2}{F} \cdot E_{50} \left(\frac{e}{D}\right)^3 + \frac{2}{3F} \cdot E'_t, \text{ com o limite de aplicação:}$$

$$E_{50}/E'_t \cdot \left(\frac{e}{D}\right)^3 > 0,33$$

No caso de existência de pressões internas negativas as mesmas serão adicionadas às pressões externas. Nesta eventualidade, Molin refere que a pressão admissível dada pela equação anterior deve ser reduzida de 50% e o seu limite de validade reduz-se para $E_{50}/E'_t \cdot \left(\frac{e}{D}\right)^3 > 0,17$.

Também, segundo Molin, o caso mais crítico no tocante à deformação verifica-se quando o tubo está enterrado profundamente num solo cujo nível freático é elevado. Nestas circunstâncias a pressão total exercida sobre o tubo é igual à pressão das terras mais a pressão exterior da água.

O valor atribuído ao módulo tangente deve ser o que resulta de se considerar a pressão efectiva, isto é, por segurança, somente a pressão do solo.

A forma ovalada tomada pelo tubo reduz a pressão crítica de rotura. Segundo Molin, cálculos aproximados mostram que a máxima redução é da ordem de 20% no caso de tubos deflectidos normalmente (5 a 10%).

A pressão crítica pode ser calculada também pela seguinte fórmula:

$$q_{cr} = 2,81 \sqrt{\frac{E'_t \cdot E_{50} \cdot I}{R^3}} \text{ (kgf.cm}^{-2}\text{)}$$

em que:

$$R = D/2$$

$$I = \frac{e^3}{12} \text{ cm}^4 \cdot \text{cm}^{-1}$$

O Quadro 1 apresenta valores correspondentes à relação mínima entre a espessura do tubo e o diâmetro (e/D), recomendado pela "SWEDISH PLASTIC ASSOCIATION". Esta relação foi adoptada tendo em vista o risco de rotura durante os trabalhos de colocação dos tubos. No mesmo quadro são também apresentadas, em percentagem, as máximas relações entre a deflexão (δ) e o diâmetro original, para vários tipos de tubos, após ser efectuado o aterro das valas.

Quadro 1

Valores mínimos de espessura-dia-metro (e/D) e máxima de formação em percentagem do original diâmetro (δ/D) depois de aterradas as valas

Cargas rolantes	PVC		PEH		PEL		GAP	
	e/D	δ/D	e/D	δ/D	e/D	δ/D	e/D	δ/D
com	0,02	5%	0,03	8%	0,05	10%	1)	1)
sem	0,03	5%	0,04	8%	0,06	10%	1)	1)

1) Características do GAP variam dentro de largos limites de acordo com o tipo de material.

2.4 - DEFLEXÃO

A deflexão é avaliada pela seguinte fórmula experimental devida a Spangler e modificada por Molin

$$\frac{\delta_V}{D} = \frac{q}{E'_s} \cdot \frac{0,083}{S+0,122}$$

em que:

$q = q_\gamma + q_t =$ pressão total sobre o tubo (kgf.cm^{-2})

$\delta_V =$ encurtamento do diâmetro vertical (cm)
(Figura 2)

$D =$ diâmetro médio original (cm)

$S =$ factor de rigidez = $\frac{EI}{E'_s \cdot R^3} = \frac{2}{3} \cdot \frac{E}{E'_s} \cdot \left(\frac{e}{D}\right)^3$

$E =$ módulo de elasticidade a curto prazo do material do tubo (kgf.cm^{-2})

$E'_s =$ módulo secante do aterro (kgf.cm^{-2})

$e =$ espessura da parede do tubo (cm)

$R = D/2$ (cm)

Nesta fórmula E corresponde ao módulo de elasticidade a curto prazo. Valores deste parâmetro para diversos tipos de tubos de plástico e referidos à temperatura de 20 são apresentados no Quadro 2. Valores de E'_s são obtidos da Figura 6.

Quadro 2

Material	Módulo de elasticidade (kgf.cm ⁻²)	
	<u>Após 3 min.</u>	<u>Após 50 Anos</u>
	E _{3 min.}	E _{50 anos}
PVC ¹⁾	30 000	10 000
PEH ²⁾	10 000	2 000
PEL ³⁾	2 000	500
GAP ⁴⁾	50 000-250 000 ⁵⁾	20 000-100 000 ⁵⁾

1) PVC sem plastificante

2) Polietileno de alta densidade

3) Polietileno de baixa densidade

4) Polyester reforçado com fibra de vidro

5) Depende do tipo de reforço, conteúdo de vidro, método de fabrico, etc.

Segundo Molin, sob o ponto de vista de deflexão, a pressão mais severa corresponde à situação de nível freático baixo.

2.5 - EXTENSÃO PERIMETRAL

Devido às pressões externas, os momentos máximos dependem da rigidez do tubo. Para casos práticos, as fórmulas a seguir indicadas referem os valores desses momentos:

$$M = \frac{0,25S+0,003}{S+0,122} \cdot q R^2 \text{ para } S > 0,012 \text{ (kgf.cm.cm}^{-1}\text{)}$$

$$M = \frac{0,50S}{S+0,122} \cdot q R^2 \text{ para } S \leq 0,012 \text{ (kgf.cm.cm}^{-1}\text{)}$$

A extensão relativa devido aos momentos é dada por:

$$\varepsilon = \frac{\sigma M}{E \cdot e^2}$$

e os esforços por, $\nabla = \varepsilon \cdot E$.

Para um tubo de paredes ($S \leq 0,012$) a extensão relativa pode ser avaliada pela expressão seguinte que a relaciona com a deflexão:

$$\varepsilon = \sigma \left(\frac{e}{D}\right) \left(\frac{\delta V}{D}\right)$$

Para tubos de paredes mais espessas poderá considerar-se:

$$\varepsilon = 18. \left(\frac{\delta V}{D} \right) \left(\frac{E'_s}{E} \right) \left(\frac{D}{e} \right)^2 \cdot (0,25+0,003)$$

O Quadro 3 mostra os valores de extensão inicial permitida para vários tipos de material de plástico.

Quadro 3

Material	Módulo a curto prazo e extensão inicial permitida	
	Módulo a curto prazo (kgf/cm ²)	Extensão inicial permitida (%)
PVC	30.000	0,5
PEH	10 000	1,5
PEL	2 000	3,0
GAP	50 000 - 250 000	1)

1) Varia para diferentes tipos de GAP.

A extensão total, nas paredes do tubo, considerando pressões simultâneas internas e externas pode ser calculada a partir da expressão seguinte:

$$\varepsilon = \frac{(P_1 - q_0) \cdot D}{2 \cdot E \cdot e} + \frac{\sqrt{M}}{E \cdot e^2}$$

em que:

P_1 = pressão interna

M = momento calculado pelas expressões indicadas no precedente

A tensão é dada por $\sqrt{V} = \varepsilon E$.

Investigações levadas a efeito permitem que se assumam extensões relativas, no caso de combinação de acções, 1,5 vezes as extensões relativas permitidas para tubos submetidos unicamente à pressão interna.

2.6 - OBSERVAÇÕES FINAIS

Dado que a informação sobre as características mecânicas do poliéster reforçado a fibra de vidro é escassa, convirá que esses parâmetros sejam estabelecidos, através de ensaios laboratoriais, para os tubos fabricados em Portugal.

A metodologia de cálculo dos tubos pode ser conduzida do modo seguinte:

- Primeira definição da espessura das paredes do tubo através da pressão interna.
- Comparação com as relações fixadas no Quadro 2.
- Determinação da carga admissível.
- Verificação da grandeza de deflexão (ovalização).
- Comparação com as relações fixadas no Quadro 2.
- Determinação das extensões relativas e comparação com as máximas permitidas e cálculo das tensões.

O cálculo será levado a efeito por tentativas até que a espessura conduza à ovalização, factor de segurança e extensão permitidos.

3 - ASPECTOS CONSTRUTIVOS. COLAÇÃO DOS TUBOS

A Figura 8 mostra a secção tipo adoptada normalmente na instalação dos tubos. Na camada de assentamento e nas zonas laterais, com a espessura mínima de $0,7 \cdot D$, é aconselhável utilizar material granular compactado a um grau de 85 a 90% do Proctor Modificado. Quando a fundação varia substancialmente, as zonas de solos de pior qualidade devem ser sobreescavadas até a uma profundidade que poderá atingir metade do diâmetro do tubo para evitar assentamentos diferenciais. Esses solos serão substituídos por solos granulares bem compactados.

As camadas podem ser colocadas com uma espessura da ordem dos 0,20 m, quando se utilize material granular, embora nas zonas inferiores ao diâmetro do tubo essas camadas devam atingir espessuras mais reduzidas.

O aterro deve ser compactado simultaneamente de ambos os lados do tubo.

Podem ser utilizados, acima do aterro granular com a espessura de $0,70$ de diâmetro contada a partir da geratriz superior, solos locais. Estes solos cobrindo a geratriz do tubo devem ser bem compactados para assegurar uma boa contenção do material granular subjacente. Esta solução constitui uma alternativa mais económica à representada na Figura 8 na qual se considera o recobrimento do tubo com material granular.

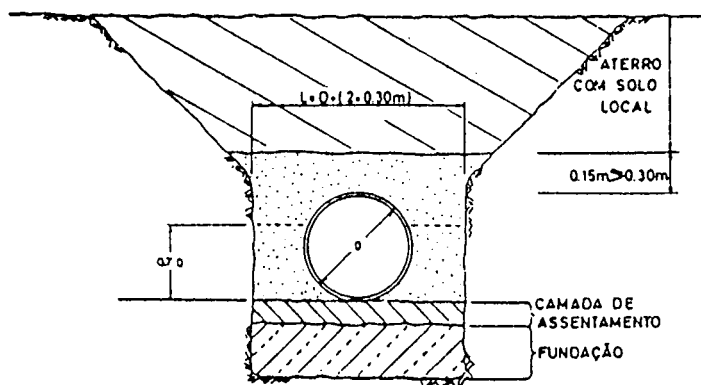


Figura 8 - Instalação tipo do tubo

Nos troços constituídos por solos húmidos de fraca capacidade resistente a disposição esquemática apresentada na Figura 9 poderá ser adoptada

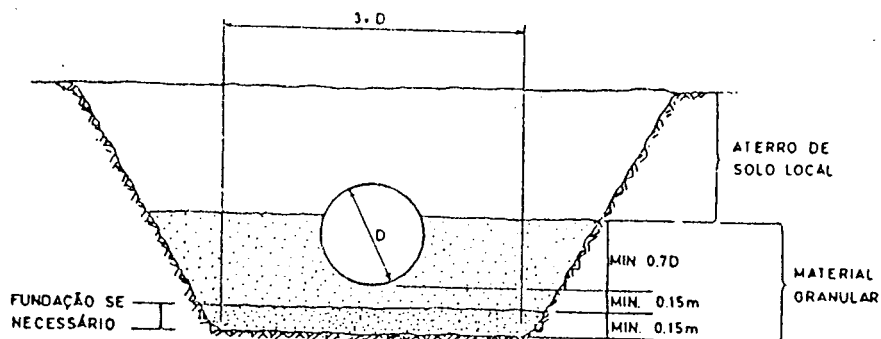


Figura 9 - Esquema de instalação para más condições de fundação

Para a ligação entre os diferentes tubos é usual utilizar-se a soldadura entre tubos, as juntas flexíveis, tipo Gibault e ligação com boca e cordão. Estas ligações, que têm custo bastante diferenciado, dão origem a variações sensíveis da perda de carga de tubagem e permitem velocidades de colocação e adaptação às irregularidades do terreno diferentes.

A soldadura entre tubos para ser executada de forma correcta deve ser feita sem a presença de humidade e de sugidade. Este fac

to impede em geral que esta operação se processe após colocação do tubo. Assim é necessário depois de esta operação ser executada proceder à colocação em simultâneo de vários tubos, operação que é de realização melindrosa.

As diferentes fontes de informação existentes sobre os valores dos coeficientes de fórmulas de perda de carga a adoptar no seu dimensionamento hidráulico, não são coincidentes nos números que apresentam. Julga-se que grande dispersão dos valores apresentados se deve essencialmente à heterogeneidade dos tubos ensaiados, cujas características variam significativamente de fabricante para fabricante, e aos diferentes tipos de ligação utilizada. Para se avaliar da dispersão dos valores que é comum encontrar para o coeficiente n da fórmula de Manning-Strickler estes variam entre 0,008 a 0,014.

Uma vantagem assinalável deste tipo de tubos é o seu pouco peso, vantagem esta que mais sensível em traçados em zonas declivadas e de difícil traficabilidade. Este facto permite a utilização de material de colocação bastante mais ligeiro e um ritmo de avanço dificilmente atingível com outro tipo de material.

A ligação entre este tipo de tubo e as obras de betão reveste-se de aspectos muito particulares, em virtude de não ser conveniente a existência de um contacto directo entre os dois tipos de materiais.

Na Figura 10 exemplifica-se uma das possíveis soluções construtivas para um maciço de amarração de um ângulo em planta.

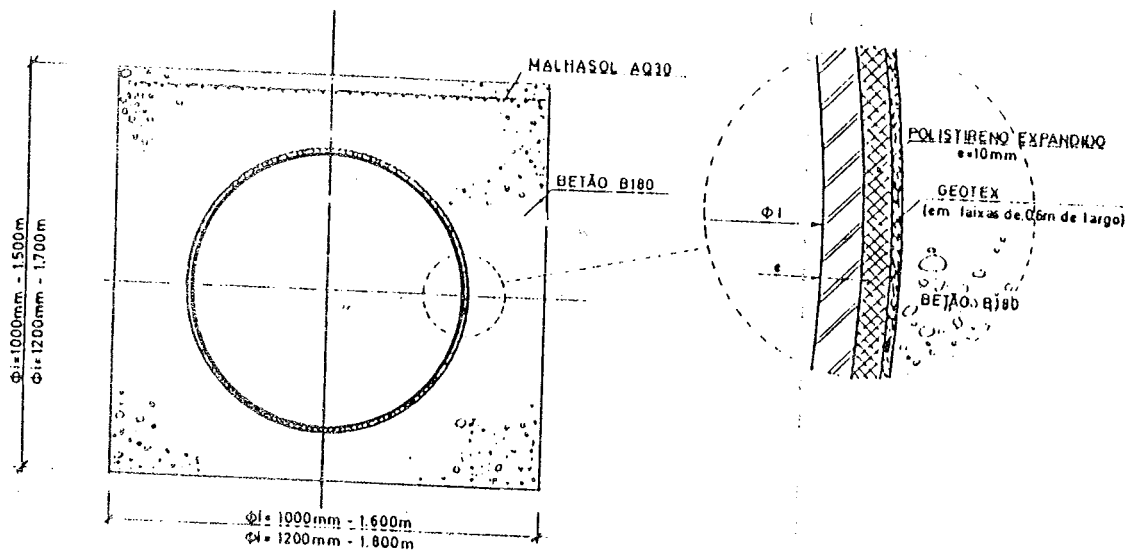


Figura 10 - Pormenor de um maciço de amarração

Na travessia de paredes ou em outras situações em que pontualmente a tubagem tenha de suportar solicitações localizadas, julga-se conveniente a sua substituição por peças metálicas ou o envolvimento com um maciço de betão.

BIBLIOGRAFIA

- ALLGOOD, J. R. - "Structures in soil Under High Loads" Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Março 1971
- ALLGOOD, J. R., CIANI, J. B. e LEW, T. K - "Influence of Soil Modulus on the Behavior of Cylinders Buried in Sand", Naval Civil Engineering Laboratory. Report nº R 582, Port Huenenu
- GREENWOOD, M. E. - "Buried Fiberglass - Reinforced Plastic (FRP) Pipe. Performance Through. Proper Installation". Technical Report
- LUSCHER, V. - "Buckling of Soil - Surrounded Tubes" Journal of Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE. Novembro 1966
- MATTSSON, A. - "Horizontal Deformation in Flexible Pipes Buried in Normal Consolidated Cohesion Materials" Malmö, Suécia. Março 1973
- MOLIN, J. - "Principles of Calculation for Underground Plastic Pipes-Loads, Deflection, Strain". British Standard Institution. Doc. nº ISO/TC 136. WG.6. Outubro 1971
- "Flexible underground Piper". CTH. Institute of Geotechnology and Foundation. Suécia 1970
- NIELSON, F. D. - "Experimental Studies in Soil - Structures Interaction". 51 st Annual Meeting, Highway Research Board, Rep nº 413, 1972
- ROCLA - Technical Journal nº 67, Janeiro 1978
- SPANGLER, M. G. - "The Structural Design of Flexible Piper Cuverts". Iowa State College Bulletin nº 153. Ames, Iowa 1941
- SPANGLER, M.G., WALKINS, R. P. - "Some Characterization of the Modulus of Passive Resistance of Soil". Proceedings of Highway Research Board, Vol. 37, 1958
- SPANGLER, M. G., HANDY, R. L. - Soil Engineering - 3rd Edition. Intext Educational Publishers, New York, 1973