

III SIMPÓSIO LUSO-BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL  
(SILUBESA)

TEMA

SUBSÍDIOS AO ESTUDO AO COMPORTAMENTO GEOMECÂNICO DOS REVESTIMENTOS  
FLEXÍVEIS DE POÇOS TUBULARES

Prof. Lezíria Marques Silva\*  
São Paulo, Brasil

RESUMO

O presente trabalho complementa o anteriormente apresentado no II SILUBESA, aduzindo os novos conhecimentos e refinamento da metodologia de cálculo desenvolvida especificamente para a previsão do desempenho geomecânico das tubulações flexíveis enterradas no sentido vertical (interação com o meio geológico, contenção de ovalizações, pressões de colapso, profundidades críticas de instalação, etc).

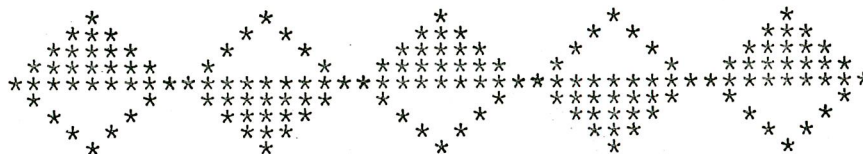
São enfocados os aspectos paralelos do papel desempenhado pelos envoltórios granulares (pré-filtro) e cimentações e dos próprios materiais constituintes dos tubos, de per si (incluindo-se os materiais homogêneos com estruturas especiais de reforço mecânico e dos modernos compósitos plásticos = termo-plásticos com reforço de fibras de carbono e flocos de mica, Kevlar, etc). Enfoque especial foi dado à simulação em microcomputadores e o desenvolvimento dos "softwares" capazes de prever a performance estrutural dos tubos enterrados, predição de parâmetros geomecânicos e projectos, pela primeira vez divulgados para a utilização ampla, com reprodução na íntegra da listagem de programas (BASIC).

São dados vários exemplos reais de cálculo, com materiais variegados (aço, PVC, nylon, polipropileno, "fiberglass", ABS, etc), com anexos para aplicações práticas (tabelas, ábacos, desenhos, etc).

## Í N D I C E

0 - Resumo .....	00
1 - Introdução .....	01
2 - Considerações gerais .....	01
3 - Cargas atuantes sôbre os revestimentos de poços .....	03
3.1 - Generalidades .....	03
3.2 - Esforços atuantes durante a instalação de tubulações .....	04
3.3 - Esforços atuantes após a instalação dos - revestimentos e a completação dos poços .....	11
3.3.1 - Pressão externa resultante de condições especiais do subsolo .....	12
3.3.2 - Pressão externa exercida pelo meio geológico .....	12
3.3.3 - Tensões atuantes durante a utilização de fluidos de perfuração .....	14
3.3.4 - Pressão exercida pelo pré-filtro .....	16
3.3.5 - Tensões induzidas pela exploração dos poços .....	18
3.4 - Cálculo da pressão externa crítica .....	19
3.5 - Cálculo da profundidade máxima de instalação .....	24
3.6 - Cálculo da resistência mecânica dos tubos .....	25
3.6.1 - Tubos não suportados .....	25
3.6.2 - Tubos suportados .....	26
3.7 - Cálculo do esforço de amolgamento e da resistência ao amassamento das tubulações .....	27
3.7.1 - Resistência ao amassamento devido a pressão lateral .....	27
3.7.2 - Resistência ao amassamento devido a pressão longitudinal .....	28
3.7.3 - Resistência de tubos metálicos - mais rígidos .....	28
4 - Exemplos de cálculos em casos reais .....	30
4.1 - Revestimentos metálicos .....	30
4.2 - Revestimentos plásticos .....	32
4.2.1 - Tubos de PVC .....	32
4.2.2 - Tubos de FRM .....	34
4.2.3 - Tubos de PP .....	35

4.2.4 - Tubos de PA-66 .....	37
4.2.5 - Tubos de ABS .....	39
4.2.6 - Tubos de PVCG .....	40
4.3 - Revestimentos mistos .....	42
5 - Programas para microcomputador .....	43
6 - Bibliografia de referênciã .....	43
7 - Anexos .....	46



## 1 - INTRODUÇÃO

Complementando nossos trabalhos anteriores no assunto, abordamos aqui os novos conhecimentos e dados sôbre a performance estrutural - das tubulações flexíveis enterradas verticalmente, estendendo o enfoque para os revestimentos metálicos.

As tubulações flexíveis aqui estudadas têm a alma e o exterior - lisos. Em pesquisa paralela que estamos desenvolvendo, apresentaremos os dados relativos ao desempenho geomecânico de tubos com corruções e nervuras externas de reforço (aço e termoplásticos).

Nesse trabalho, além dos revestimentos em si, enfocamos o papel preponderante dos envoltórios pré-filtrantes granulares e as cimentações, em suas facetas conspícuas e sua influência sôbre a aptidão dos revestimentos flexíveis resistirem aos esforços ou tensões desencadeadas no seio do meio geológico circundante aos poços tubulares.

Enfoque especial é dedicado aos filtros, os quais constituem verdadeiramente o "coração dos poços" e a sua parte mais delicada, não que tange a resistência estrutural, em especial na prevenção dos amolgamentos e/ou colapsos.

Os novos conceitos e dados aqui divulgados foram incluídos nos procedimentos construtivos e operacionais, em vias de publicação.

## 2 - CONSIDERAÇÕES GERAIS

As tensões atuantes sôbre as tubulações enterradas no sentido vertical no meio geológico, foram suficientemente descritas em trabalho anterior constante da bibliografia anexada, motivo pelo qual não nos deteremos aqui em considerações repetitivas.

Como é sabido, os condutos enterrados derivam sua capacidade de suportar as cargas superimpostas, de sua resistência intrínseca às pressões externas, em especial a lateral aplicada pelo meio sôbre as paredes dos tubos, causando tensões nos anéis estruturais na direção oposta às produzidas pelas cargas verticais. Esta aptidão, em termos de rigidez mecânica, permite classificar os tubos em rígidos, semi-rígidos/semi-flexíveis e flexíveis.

Tubos rígidos são aqueles nos quais aparecem sinais de ruptura ou trincas, tão logo a deformação de um dos diâmetros de sua secção transversal circular, seja superior a 0,10%. exemplo: tubos de concreto e de cerâmica.

Tubos semi-rígidos/semi-flexíveis são aqueles nos quais aparecem rupturas ou trincas, logo que a deformação de um dos diâmetros de sua secção, seja superior a 3%. Exemplo: tubos de ferro fundido.

Tubos flexíveis são aqueles cuja deformação de um dos diâmetros da secção transversal, pode atingir valores superiores a 3%, antes do aparecimento de trincas ou rupturas. Exemplo: tubos de ferro dúctil, de aço, de "fiberglass" e de termoplásticos (PVC,ABS,PP,etc).

Como se depreende, os tubos rígidos têm a sua capacidade de suportar cargas intimamente relacionada com a sua resistência mecânica intrínseca, ou seja, diretamente proporcional ao seu fator de rigidez.

Já os tubos flexíveis, apesar de possuírem resistência relativamente pequena ao carregamento, quando enterrados mobilizam as pressões passivas do meio, à medida que as suas paredes se deslocam contra o terreno, ao serem os tubos solicitados, no sentido de conter as deformações ("ovalização"). Dessa maneira, tubos flexíveis com paredes finas serão capazes de suportar cargas relativamente elevadas, dependendo do coeficiente de deformação máxima permissível (no caso, até 10%).

No âmbito dos tubos flexíveis, o fator de rigidez do meio circundante ( $0,061.E' = \text{Spangler}$ ), é muito mais importante e significativo que o fator de rigidez dos próprios tubos ( $EI$ ), sendo sempre válido que este é muito menor que aquele. Reside aqui a razão pela qual, por exemplo, uma tubulação de PVC no revestimento de um poço, resiste a instalação em profundidades implicando na geração de cargas bem superiores àquelas suportadas pelos mesmos tubos quando não enterrados (por exemplo, num teste de placas paralelas/compressão). O efeito suporte propiciado pelo meio envoltório é o "segredo" do sucesso, sendo traduzido pelo chamado "módulo de Spangler" ou "módulo de resistência passiva" ( $E'$ ).

De acordo com a teoria de Spangler, o fator do tubo ( $EI/R^3$ ) nunca deve ser menor que 10-15% do fator de rigidez do meio ( $0,061.E'$ ) onde os tubos forem enterrados.

O valor do módulo de resistência passiva do meio é bastante influenciado pelo grau de compactação do material. Os ensaios realizados durante a nossa pesquisa dirigida, demonstraram que nos materiais fôfos (não compactados) ocorre uma variação de +2% entre as ovalizações calculada e a medida (secção transversal dos tubos), portanto, significando que se considerarmos deflexão de 3% ela poderá oscilar entre 1 e 5%.

Para os materiais moderadamente compactados ou com assentamento natural ( $\leq 85\%MP$ ), ela variou de +1% e com os materiais bem compactados ( $\geq 95\%MP$ ), de +0,50% .

Para o caso dos pré-filtros em poços tubulares, não é bem conhecida ainda a variação de  $E'$  com a profundidade, no âmbito confina do de formato anular, especialmente por que aqui as partículas do material granular têm seu ajustamento e compacidade diretamente afetadas pelas pressões laterais da formação geológica e de percolação e afluxo de água na captação. Isto pode resultar num empuxo capaz de ali-

viar significativamente, a ação do peso-morto do material e impedindo a compactação mais pronunciada, o que sob o enfoque do seu desempenho hidrodinâmico e funcional, é até desejável.

Deverá ser desenvolvida pesquisa direcionada visando estabelecer a variação de  $E'$ , em condições do aumento gradual da profundidade e do grau de compactação resultante, tanto para o pré-filtro como para o meio geológico circundante aos poços.

No momento, para o caso dos pré-filtros granulares convencionais, podem-se utilizar com segurança os seguintes valores práticos:

- Areias selecionadas, com arredondamento médio a excelente.....  $50,00 \text{ kgf/cm}^2 = 5.000 \text{ kN/m}^2$
- Seixos rolados e cascalhos selecionados, arredondamento médio a bom .....  $70,00 \text{ kgf/cm}^2 = 7.000 \text{ kN/m}^2$

Para os outros materiais, podem ser utilizados os valores contidos na tabela seguinte (apud Spangler), desenvolvida em princípio para a previsão do desempenho estrutural das tubulações assentadas no sentido horizontal a sub-horizontal, em maciços de solos classificados segundo a tabela anexada, onde a nomenclatura das siglas original inglesa, derivou de:

- C = Clay (argilas)
- G = Gravel (cascalhos, seixos)
- M = "Mo" (siltes)
- P = Poorly graded (mal selecionado)
- S = Sand (areias)
- W = Well graded (bem selecionado)

### 3 - CARGAS ATUANTES SOBRE OS REVESTIMENTOS DE POÇOS

#### 3.1 - GENERALIDADES

Os revestimentos de poços profundos sofrem, basicamente, a ação de carregamentos uniformes ou com variação linear, de curta ou longa duração. Adicionalmente, dependendo da formação geológica ou detalhes construtivos, podem sofrer cargas advindas do meio envoltório pré-filtrante, pressões de confinamento dos aquíferos ("pressão artesianas"), trepidação ou impactos ritmados originados pela operação de equipamentos no interior da tubulação, influência do calor liberado pela cura de cimentações externas, etc.

As cargas de curta duração são as aplicadas aos revestimentos durante a fase de sua instalação nas perfurações e durante a fase do desenvolvimento dos poços (tração, compressões e suas

combinações). As cargas de longa duração são as devidas ao peso-morto das tubulações, as devidas ao meio geológico e as devidas pelo assentamento e acomodação do material granular do pré-filtro (Fig.1).

Temos a considerar duas modalidades distintas de carregamento: a primeira consiste em pressão externa uniforme e radial, cujo incremento gradual tenderá a colapsar a tubulação ( $P_0$ ) e a segunda, consistindo numa pressão externa variando linearmente com um máximo da pressão anterior.

Em ambas as condições, considera-se uma pressão axial atuando no fundo dos poços ( $P_n$ ). Esta pressão, dependendo do peso unitário dos tubos constituintes dos revestimentos, terá maior ou menor efeito. Por exemplo, no caso de tubos plásticos cujo peso unitário é aproximadamente 1/7 do dos tubos de aço, haverá tendência acentuada em "flutuar" dentro da perfuração cheia de água ou lama, pela ação direta do empuxo, a qual poderá ser anulada facilmente simplesmente mantendo o fundo aberto. Quando se descem as tubulações com o fundo fechado, a flutuação manifestar-se poderá dificultar a operação e a pressão axial poderá igualar-se a pressão  $P_0$ , demandando lastreamento basal, preenchimento com lama densa, etc.

O processo ou técnica de perfuração, em si, não carrega esforços relevantes ao carregamento dos revestimentos. A ressalva que se pode fazer aqui prende-se a não percutir com vigor a extremidade superior da coluna, no ato de cravar ou engastar os revestimentos. Se necessário, esta operação deverá ser conduzida criteriosamente, utilizando-se bloco de madeira ou outro material amortecedor como cepo-de-bater.

### 3.2 - ESFORÇOS ATUANTES SOBRE A INSTALAÇÃO DAS TUBULAÇÕES

Durante a operação de descida e instalação das secções de tubos lisos e filtros constituintes das colunas de revestimento dos poços, todo o peso crescente da tubulação suspensa é sustentado pela junta superior, desconsiderando-se o aparato de suspensão da perfuratriz.

Em termos estruturais, portanto, a secção transversal mais vulnerável da coluna, é aquela onde a razão de carga suspensa abaixo é maior e sofre a ação direta do tracionamento. O ponto de maior fraqueza situa-se, em determinados casos, na transição de um diâmetro maior para um menor, apesar do peso suspenso abaixo ser menor, uma vez que a redução da área da secção transversal redonda numa tensão de tração maior.

Evidentemente, quando as perfurações encontram-se preenchidas com água ou lama, a atuação do empuxo anula boa parte dessa tensão (perda de peso aparente). Esta compensação variará diretamente com a altura de preenchimento das perfurações, o caso ideal ocorrendo com o nível de fluidos coincidente com o nível -

CLASSIFICAÇÃO UNIFICADA DOS SOLOS

CLASSE		TIPO	SÍMBOLO	NOMES TÍPICOS
SOLOS GROSSOS (menos que 50% passando na #200)	PEDREGULHOS (mais que 50% da fração grossa não passa #4)	Pedregulho Limpo	GW	Pedregulho, bem graduado, contendo alguma areia com poucas partículas finas
	AREIAS (mais que 50% da fração grossa #4)		GP	Pedregulho, mal graduado, contendo areia e poucas partículas finas
SOLOS FINOS (mais que 50% passando na #200)	AREIAS (mais que 50% da fração grossa #4)	Areia Limpa	GM	Pedregulho silteoso - mistura de pedregulho, areia e silte
			GC	Pedregulho argiloso - mistura de pedregulho, areia e argila
		Areia contendo partículas finas	SW	Areia bem graduada - areia pedregulhosa
			SP	Areia mal graduada - areia pedregulhosa
	SILTE E ARGILA (LL < 50)	SILTE (LL < 50)	SM	Areia silteosa - mistura de areia e silte
			SC	Areia argilosa - mistura de areia e argila
		ARGILA (LL > 50)	ML	Silte 8 - Areia fina - areia fina argilosa ou silteosa ou silte argiloso com plasticidade pouco acentuada
			CL	Argila magra; argila arenosa; argila silteosa de plasticidade baixa ou média
			OL	Siltes orgânicos; argila silteosa orgânica de baixa plasticidade
			MH	Silte; solo arenoso fino ou silteoso de alta plasticidade
Solos altamente orgânicos	Madeiras CONCHAS	CH	Argila gorda; argila inorgânica de alta plasticidade	
		OH	Argilas orgânicas de plasticidade média ou alta siltes orgânicos	
		Pt	Turfa ou outros solos orgânicos	
			Wa	Madeiras
			SL	Conchas



VALORES MÉDIOS DO MÓDULO DE SPANGLER (E'),  
PARA VÁRIOS MATERIAIS E GRAUS DE COMPACTAÇÃO (M.P.)

TIPOS DE MATERIAL GEOLÓGICO	Fôfo, des- pejado - sem com- pactação ( E'=0 )	Compacta- ção leve com Proc- tor Mod. ≤85 %MP	Compacta- ção modē- rada, com Proctor- 85-95%MP	Compacta- ção ele- vada, com Proctor- ≥ 95%MP
<u>COESIVOS (LL 50)</u> Com alta plasticidade, tipo: CH, MH, CH-MH .....	0	0	0	3,50
<u>COESIVOS (LL 50)</u> Plasticidade média ou nenhu- ma, tipo: CL, ML, ML-CL, CL- -CH, ML-MH, com menos do que 25% de partículas granulares de permeio .....	3,50	14,00	28,00	70,00
<u>GRANULARES COESIVOS</u> Tipo: GM, GC, SM, SC ou ou- tro tipo qualquer, com mais que 25% de partículas granu- lares classificadas como : CL,ML,ML-CL,CL-CN ou ML-MH.	7,00	28,00	70,00	140,00
<u>NÃO COESIVOS</u> GW, GP, SW, SP .....	7,00	70,00	140,00	210,00
Pedras britadas .....	70,00	210,00		
Concreto .....	69,00	138,00		
Precisão em termos de por- centagem de deflexão .....	±2%	±2%	± 1%	

da superfície do solo (profundidade zero).

O peso-morto do revestimento é dado pela seguinte relação:

$$P = \gamma_r \cdot A \cdot L \longrightarrow \sigma_p = \gamma_r \cdot L \quad (1)$$

onde: P = tensão axial no revestimento  
 $\sigma_p$  = tensão devida ao peso-morto dos tubos  
 A = área da secção transversal da coluna  
 L = comprimento da tubulação  
 $\gamma_r$  = peso específico do material dos tubos

Se as perfurações estiverem total ou parcialmente preenchidas com água ou lama, as tensões atuantes serão atenuadas da seguinte maneira:

$$P' = (\gamma_r \cdot L - \gamma_a \cdot L') \cdot A \quad (\text{fundo aberto}) \quad (2)$$

onde: P' = carga efetiva máxima  
 $\gamma_a$  = peso específico do fluido empregado  
 L' = comprimento da porção submersa do revestimento

Se a lama tiver densidade elevada, a carga P' torna-se negativa, passando a atuar como carga de compressão. Em consequência, o revestimento tenderá a flutuar e sair para fora da perfuração, requerendo sua contenção apropriada.

No caso do fundo do revestimento estar tamponado, a carga axial máxima originada pela lama, será:

$$P = \gamma_r \cdot L \cdot A - \gamma_a \cdot L' \cdot A' + P_i \quad (3)$$

onde: P<sub>i</sub> = peso da coluna de fluido dentro do revestimento  
 $A = \pi/4 \cdot (D_e)^2 = 0,786 \cdot D_e^2$   
 D<sub>e</sub> = diâmetro externa da tubulação

Portanto, o carregamento tracional será dado pela soma do peso total da tubulação menos as perdas devidas ao empuxo dos fluidos.

No caso dos filtros, a área da secção transversal (F) será calculada com o diâmetro médio (d<sub>m</sub>), a espessura da parede (e), o número de ranhuras presentes na secção (n) e a abertura das ranhuras (a):

$$F = (d_m \cdot \pi - n \cdot a) \cdot e \quad (4)$$

e a tensão de carregamento poderá ser, no máximo, igual à capacidade de suporte ao carregamento ( $P_z$ ):

$$P_z = F \cdot \sigma_z = (d_m \cdot \pi - n \cdot a) \cdot e \cdot \sigma_z \quad (5)$$

Se a coluna de revestimento for longa e a lama muito densa, poderá ocorrer seu arqueamento ou flambagem. Quando o revestimento é instalado numa perfuração cujo diâmetro é pouco maior que o da tubulação, as deflexões laterais serão limitadas. Entretanto, quando a diferença de diâmetros é maior, a flambagem poderá ser mais pronunciada e a sua prevenção deverá ser feita mediante a utilização de guias centralizadoras.

Em condições de desalinhamento, o arqueamento da coluna acarretará o seguinte esforço adicional:

$$\sigma_f = \frac{E \cdot D_e}{2 \cdot R} \quad (6)$$

onde:  $\sigma_f$  = esforço de flexão  
 $E$  = módulo de elasticidade do material (Young)  
 $R$  = raio de curvatura do trecho desalinhado

(Figura 2)

De acordo com a teoria de Euler, a resistência a flambagem poderá ser expressa da seguinte maneira:

$$P_k = \frac{1}{C} \cdot \frac{E \cdot J \cdot \pi^2}{L_1^2} \quad (7)$$

onde:  $P_k$  = resistência ao arqueamento da coluna  
 $C$  = coeficiente de segurança  
 $E$  = módulo de elasticidade do material  
 $J$  = momento de inércia dos tubos  
 $L_1$  = comprimento não suportado da coluna

No caso, o momento de inércia é calculado pelas expressões:

Tubos lisos  $\longrightarrow$   $J = \frac{\pi \cdot d_m^3 \cdot e}{8} \quad (8)$

Tubos ranhurados  $\longrightarrow J = \frac{\pi \cdot d_m^3}{8} \cdot e \cdot \left(1 - \frac{n \cdot a}{d_m \cdot \pi}\right)$  (9)

Podem ocorrer dois tipos de arqueamento:

- 1º) A coluna inteira sofre a flambagem (Fig. ).
- 2º) No caso de filtros, curvamento da chapa lisa existente entre duas ranhuras adjacentes (Fig. ).

No primeiro caso, considerando-se o momento de inércia dos filtros, a resistência à flambagem será expressa por:

$$P_{k1} = \frac{1}{C} \cdot \frac{E \cdot \pi^2}{H^2} \cdot \left[ \frac{\pi \cdot d_m^3}{8} \cdot e \cdot \left(1 - \frac{n \cdot a}{d_m \cdot \pi}\right) \right] \quad (10)$$

cujo valor deverá permanecer tão alto quanto o peso total da tubulação, mantendo-se o coeficiente de segurança entre 1,50 a 2,0

Este cálculo é aproximativo, uma vez que:

- 1º) O peso da tubulação, em si, é considerado como carga concentrada no topo da coluna.
- 2º) Presume-se que toda a extensão dos tubos seja ranhurada, portanto, com o momento de inércia menor que o dos tubos lisos.
- 3º) O comprimento total da coluna é considerado como não apoiado ou suportado, sem considerar a possibilidade da extremidade superior e inferior sofrerem deslocamento horizontal.

Em geral, não é relevante considerar a flambagem da coluna quando esta acha-se suportada por guias centralizadoras dentro das perfurações, antes de ser envolvida pelo pré-filtro.

A diferença de pressões externa e interna presente na tubulação imersa nos fluidos, dentro da perfuração, pode tender a amolgar e colapsar a coluna. Esta pressão de colapso é calculada pela equação clássica da Hidrostática:

$$P_h = \gamma \cdot h \quad (11)$$

onde:  $P_h$  = pressão hidrostática  
 $\gamma$  = peso específico do fluido  
 $h$  = altura da coluna de fluido

Quando o revestimento assenta e se apoia no fundo da perfuração, a coluna fica sujeita a carga de compressão axial resul-

tante do seu próprio peso-morto, capaz de causar três tipos de de formações:

- 1º) Como no caso da tração, os tubos e as juntas ficam sob tensão, porém, o eixo permanece retilíneo.
- 2º) A coluna curva-se fora do eixo da tubulação, arqueando-se. Todavia, as secções transversais da coluna permanecem, em geral, circulares.
- 3º) A coluna sofre entumescimentos localizados: o eixo permanece essencialmente reto, mas as secções transversais alongam-se num formato elíptico ou lateralmente comprimido. Nesse caso, acham-se envolvidas forças horizontais. As secções de filtros são as mais suscetíveis a tal fenômeno, em especial aquelas com ranhuras longitudinais (coaxiais).

(FIGURA 5)

O carregamento compressivo axial equivale ao peso da coluna acima da secção transversal considerada, menos um determinado empuxo. O esforço de compressão axial permissível é  $P_D$  e a resistência à compressão deverá, no máximo, ser igual à capacidade  $P_D$ :

$$P_D = F \cdot \sigma_D = (d_m \cdot \pi - n \cdot a) \cdot e \cdot \sigma_D \quad (12)$$

A compressão e a tração axiais são anuladas e desaparecem, após a completação dos poços, principalmente devido ao atrito propiciado pelo envoltório granular do pré-filtro e as cimentações executadas (basal, selo sanitário, etc).

A carga de compressão longitudinal máxima que um revestimento pode suportar, antes de sofrer deformações e danos, é calculada pela equação:

$$P_C = P_D \cdot \frac{\pi}{4} \cdot (D_e^2 - D_i^2) = \frac{P_D \cdot \pi \cdot e^2}{4} \quad (\text{kN}) \quad (13)$$

onde:  $P_D$  = resistência à compressão do material constituinte dos tubos ( $\text{kN/m}^2$ ).  
 $D_e$  = diâmetro externo dos tubos (m).  
 $D_i$  = diâmetro interno dos tubos (m).  
 $e$  = espessura da parede dos tubos (m).

sendo aconselhável a utilização do coeficiente de segurança variando de 2,00 a 2,50:

$$P'_C = (2,00 \text{ a } 2,50) \cdot P_C \quad (\text{kN}) \quad (14)$$

### 3.3 - ESFÓRÇOS ATUANTES APÓS A INSTALAÇÃO DOS REVESTIMENTOS E A COMPLETAÇÃO DOS POÇOS

Nessa fase, as tubulações de revestimento acham-se sujeitas aos seguintes carregamentos:

- 19) Compressão radial e deformações horizontais: decorrentes da atuação de forças laterais de diversas origens, tais como:
  - a - Condições especiais do subsolo, geologicamente determináveis.
  - b - Pressão da formação (confinamento ou artesianas).
  - c - Pressão exercida pelo assentamento e acomodação do envoltório granular do pré-filtro anular.
  - d - Diferença relevante entre os níveis de água externo e interno aos revestimentos.
  - e - Amolgamento e deformações colapsantes dos tubos termoplásticos nos horizontes onde são procedidas cimentações anulares espessas e/ou extensas, devido a liberação de calor na cura das massas de cimento.
  
- 20) Esforços variegados, resultantes da:
  - a - Operação de compressores (golpes e contra-golpes - de ar comprimido, no interior dos poços), resultando em sucção de curso inverso, na desarenação da captação ("turbilhonamento ou fervilhamento dos poços").
  - b - Desenvolvimento dos poços pela operação de pistões no seu interior, causando sucção intensa capaz de forçar o assentamento do pré-filtro, rebaixando-o no espaço anular externo, com formação de vazios - que ao aluir desencadeiam forças repentinas, bruscas e de ação imprevisível sobre as tubulações.
  - c - Deformações das aberturas dos filtros, resultantes dos diferenciais de pressões superimpostos (arqueamento em ranhuras longitudinais, abertura forçada das ranhuras pelo carregamento tracional, fechamento das ranhuras pela compressão axial, etc).
  - d - Tensões de entumescimento das mais variadas espécies.
  - e - Pressão de percolação nas aberturas, exercida pelo fluxo de água ao penetrar nos filtros, a partir dos aquíferos.

### 3.3.1 - PRESSÃO EXTERNA RESULTANTE DE CONDIÇÕES ESPECIAIS DO SUBSOLO

As tensões mecânicas desencadeadas por estruturas - especiais do subsolo, podem ocasionar pressões muito elevadas, como por exemplo, no caso de desabamentos de cavidades de dissolução em terrenos kársticos, acomodação de cama das sedimentares (adensamento, compactação e subsidência), entumescimento e/ou fluência de rochas plásticas (argilitos, margas argilosas, folhelhos, etc), reflexos atenuados de fenômenos tectônicos profundos em horizontes argilosos, etc.

As forças postas em jogo por estes fenômenos geológicos, não podem ser calculadas matematicamente. Elas podem ser muito elevadas e impossíveis de previsão, prevenção e contrabalanceamento por revestimentos especiais.

### 3.3.2 - PRESSÃO EXTERNA EXERCIDA PELO MEIO GEOLÓGICO

A pressão horizontal e radial exercida pelo meio geológico sobre as paredes das tubulações de revestimento - dos poços, aumenta linearmente com a profundidade, a partir da superfície do solo, à semelhança da pressão hidrostática exercida sobre uma superfície imersa na água.

(FIGURA 6)

Evidentemente e, no caso de tubulações cilíndricas - enterradas, o meio não é suportado por superfície plana, dado o formato cilíndrico das paredes das perfurações, contra as quais o meio geológico atua de modo compressivo radial, acunhando-o. Em consequência desse efeito de arqueamento, a pressão efetiva exercida é menor, em comparação com aquela atuante e sobre as paredes planas.

Este carregamento no padrão hidrostático, no caso - de revestimentos flexíveis, mostrou-se verdadeiro ao longo dos ensaios e pesquisas desenvolvidas ao longo dos últimos vinte anos, em mais de 60.000 metros de tubos instalados em poços, dos quais cerca de 32.000 metros de natureza plástica (FRP, FRM, PVC, etc).

A teoria baseada na pressão de silos, considerada - pela escola alemã como a mais confiável, não se aplica na - determinação das pressões laterais exercidas sobre os revestimentos. Os ensaios conduzidos revelaram discrepâncias por si só eloquentes, a favor da "teoria da pressão hidrostática", conforme ilustram as figuras 7, 8 e 9.

No caso de poços tubulares, a "teoria do silo" é aplicável para calcular os esforços desenvolvidos pelo pré-filtro granular, com resultados mais próximos da prática - que os dados pela aplicação da "teoria de Beresantsev", como veremos mais adiante.

Conforme foi exposto em nossos trabalhos anteriores, relacionados na bibliografia de referência, os esforços laterais externos aplicados pelo meio geológico, são calculáveis pela equação de Beresantsev (1958), a saber:

$$\sigma_r = R \cdot \gamma_s \cdot \frac{(k_a)^{1/2}}{\lambda - 1} \left[ 1 - \left( \frac{R}{R_B} \right)^{\lambda - 1} \right] + C \cdot \cotg \varnothing \left[ \left( \frac{R}{R_B} \right)^{\lambda} \cdot k_a - 1 \right] \quad (15)$$

onde:  $\sigma_r$  = tensão lateral radial

R = raio da tubulação

$\gamma_s$  = peso específico do material geológico

$k_a = \text{tg}^2(45^\circ - \varnothing/2)$  = coeficiente de pressão ativa (Rankine)

$\varnothing$  = ângulo de atrito interno do material (Mohr-Coulomb)

$\lambda = 2 \cdot \text{tg} \varnothing \cdot \text{tg}(45^\circ + \varnothing/2)$

$R_b = R + z \cdot K_a$

z = profundidade considerada

C = coeficiente de coesão (Mohr-Coulomb)

TABELA 3 - MATERIAIS COESIVOS

Material geológico	$\varnothing$	$\gamma_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	C (g/cm <sup>3</sup> )
Argilas.....	0 a 10 <sup>0</sup>	1,60	244,00
Areias .....	30 <sup>0</sup> a 35 <sup>0</sup>	1,92	(*)
Cascalhos .....	40 <sup>0</sup>	2,08	(*)

(\*) Consultar o gráfico constante da Figura



Para os materiais não coesivos, utiliza-se o gráfico contido na Figura 10.

TABELA 4 - MATERIAIS INCONSOLIDADOS

Material geológico	$\phi$	$\text{sen } \phi$	OBS.
Areia arredondada, uniforme, muito sôlta.....	$28^{\circ}$	0,4695	Mínimo
Areia arredondada, uniforme, sôlta .....	$28^{\circ}$ a $30^{\circ}$	0,4695-0,500	----
Areia compacta, média, compacta .....	$30^{\circ}$ a $36^{\circ}$	0,500-0,5878	----
Areia angulosa, classificada, compacta .....	$36^{\circ}$ a $41^{\circ}$	0,5878-0,656	----
Areia angulosa, classificada, muito densa ...	$41^{\circ}$ a $45^{\circ}$	0,656-0,7071	Máximo

### 3.3.3 - TENSÕES ATUANTES DURANTE A UTILIZAÇÃO DOS FLUIDOS DE PERFURAÇÃO

Conforme já foi citado anteriormente, a utilização de fluidos de perfuração implica no desenvolvimento de tensões adicionais no carregamento dos revestimentos de poços. Dependendo da altura da coluna de fluidos de perfuração nos poços, sua densidade, variação de viscosidade, espessura do espaço anular, tempo de permanência na perfuração, diferenciais de pressão, etc, sua determinação e controle será vital à manutenção da integridade estrutural da coluna de tubos, haja visto o cuidado e controle de que é alvo na perfuração de poços profundos para petróleo, por exemplo.

#### 3.3.3.1 - COM LAMA ESPÉSSA

Por lama de perfuração entende-se as soluções aquosas coloidais de argilas e outros minerais expansivos ou de aditivos orgânicos ou químicos apropriados, com peso específico na faixa de 1,05 a 1,35 g/cm<sup>3</sup>.

Os problemas de carregamento geomecânico-se tornam mais relevantes quando nesse fluido é in-

roduzido o cascalho selecionado do prē-filtro, para sua instalaçāo no espaço anular existente entre as paredes da perfuraçāo e a tubulaçāo do revestimento-interno. Nessas circunstāncias, o pēso especīfico do fluido externo serā maior que o do fluido contido no interior do revestimento, originando a atuaçāo de fôrça radial decorrente do diferencial de pressāo es-tabelecido.

A pressāo diferencial ē exercida integralmente sōbre as secçōes de tubos lisos e parcialmente sōbre os filtros, dada ās condiçōes de intercomunicaçāo hidrāulica aqui presentes (vide figura anexada).

As fôrças exercidas dependem, portanto, das propriedades da lama usada e da tēcnica adotada para instalar o prē-filtro. O cascalho deverā ser mantido em suspensāo, nāo ensejando seu assentamento prematuro e/ou a formaçāo de estruturas "ōcas" no maciço (falhas no encascalhamento), suscetīveis a desmoronar durante a fase de acomodaçāo e liberar tensōes incontrolāveis repentinas.

A magnitude da pressāo externa exercida sōbre os revestimentos, depende do pēso do prē-filtro e da lama envolvente, calculada da seguinte forma:

- Pēso līquido do cascalho..... 1,70 t/m<sup>3</sup>
- Preenchimento dos espaços intergranulares pela lama (porosidade de 35%).....  $1,2 \times 0,35 = 0,42$  t/m<sup>3</sup>
- 2,12 t/m<sup>3</sup>

portanto, necessitamos considerar o pēso prático do prē-filtro enlameado como sendo, no mīnimo, de ..... 2,00 t/m<sup>3</sup>.

Apōs a sedimentaçāo do cascalho pelo "afinamento" controlado da lama, resultam os seguintes pēsos no poço:

- Coluna de fluido no interior do poço ..... 1,00 a 1,20 t/m<sup>3</sup>
- Prē-filtro com lama ..... ~2.00 t/m<sup>3</sup>

Se a diferença de pressāo ē equalizada, atē certo grau, pela açāo hidrodināmica dos filtros, a āgua subterrānea poderā fluir atravēs dos filtros, desde a secçāo mais superficial.



### 3.3.3.2 - COM ÁGUA PURA

As condições fundamentais, nesse caso, são totalmente diferentes do caso anterior. Para u'a mes ma profundidade considerada, a pressão hidrostática é menor que no caso da lama, uma vez que pês o específico da água é menor.

Conseqüentemente, as paredes da perfuração não sofrem a ação estabilizadora do fluido à base de argilas, crescendo-se a ausência do recobrimento impermeabilizante ("rebôco") que impede a filtração de água para o meio. A absorção de água envolve perda de volume considerável, a qual deverá ser compensada permanentemente, a fim de evitar o rebaixamento da coluna de fluido para níveis por vêzes perigosamente baixos, em termos da estabilidade geomecânica, e a ocorrência de desmoronamentos e assoreamento das perfurações.

Para evitar tais transtornos, frequentemente se adiciona certa porcentagem de argila a água pura, com o intuito de promover a impermeabilização temporária das paredes dos furos e incrementar o efeito suporte. Evidentemente, esta adição não é tal a caracterizar o fluido como "lama". Em alguns casos, a adição se torna desnecessária, pois o seccionamento de camadas argilosas carrega material capaz de aumentar a viscosidade original da água pura.

A grande vantagem de se utilizar esta "água suja" em lugar da lama espessa, é a minimização dos trabalhos de remoção do filtrado nas paredes das perfurações ("mud cake"), abreviando a operação de desenvolvimento químico e físico, com reflexos positivos para o cronograma e o custo de construção dos poços.

Em ambos os fluidos de perfuração, o "afinamento" para propiciar o assentamento do pré-filtro e a própria eliminação do fluido dos poços, deverá constituir-se numa operação criteriosamente conduzida, em termos da redução gradual e lenta da viscosidade do fluido circulante, a fim de não ensejar o estabelecimento de gradientes piezométricos acentuados, ou seja, diferença de nível pronunciada entre as colunas externa e interna aos revestimentos, capaz de colocar em jôgo, no sistema, tensões adicionais perigosas (amolgamentos e colapsos).

### 3.3.4 - PRESSÃO EXERCIDA PELO PRÉ-FILTRO

Conforme dito anteriormente, esta pressão é calculada aplicando-se a "teoria do silo", com resulta dos razoáveis para os nossos propósitos.

De acordo com esta teoria (vide figura anexada), a pressão lateral do material confinado no espaço anular, considerada como pressão de silo passiva, é dada pela seguinte relação:

$$P_B = \frac{F \cdot \gamma_m}{D \cdot K_0} \cdot \text{tg}(45^\circ - \frac{\phi}{2}) (1 - e^{- (D \cdot K_0) / F \cdot z}) \quad (16)$$

- onde:  $P_B$  = pressão do pré-filtro ( $t/m^2$ )  
 $F$  = secção transversal da perfuração cilíndrica ( $m^2$ )  
 $\gamma_m$  = peso específico do material granular ( $t/m^3$ )  
 $D$  = diâmetro da tubulação (m)  
 $K_0 = \text{tg}^2(45^\circ - \frac{\phi}{2}) \cdot \text{tg} \phi'$   
 $\phi$  = ângulo de atrito interno do material granular  
 $\phi' \cong \frac{1}{3}\phi$  = ângulo de atrito entre o revestimento e o meio.  
 $z$  = profundidade considerada (m)  
 $e$  = 2,7183 (base dos logaritmos neperianos)

TABELA 5

$\phi$	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°
$\text{tg}^2(45^\circ - \phi/2)$	0,490	0,406	0,333	0,271	0,217	0,171	0,132
$K_0$	0,139	0,139	0,138	0,134	0,126	0,155	0,102

Em condições normais, o valor de  $e^{- (4 \cdot k_0 \cdot z) / d}$  (onde  $d$  = diâmetro da perfuração) para profundidades a partir de  $z \cong 5 \cdot d$ , com relação a unidade, é desprezível. Logo, para profundidades rasas a pressão do pré-filtro é dada por:

$$P_B = \frac{d \cdot \gamma_m}{4 \cdot K_0} \cdot \text{tg}^2(45^\circ - \frac{\phi}{2}) \quad (17)$$

ou seja, constante e independente da profundidade.

No caso de aquíferos confinados, cuja pressão artesiana induz fluxo vertical ascendente pelo pré-filtro anular, esta pressão anula-se, pelo menos durante a fase de instalação do envoltório granular. Após a completação do poço, a pressão artesiana passa a atuar no sentido horizontal, tornando-se parcela do total de pressão lateral aplicada.

### 3.3.5 - TENSÕES INDUZIDAS PELA EXPLOTAÇÃO DOS POÇOS

Estas tensões surgem quando os poços passam a ser bombeados, originadas principalmente pela sucção da água contida no interior dos poços, redundando em rebaixamento do nível piezométrico, formação do cone de depressão ao redor da captação e acentuamento das pressões atuantes.

Com o rebaixamento, caso o material granular não tenha sido bem assentado, pode ocorrer a sua acomodação forçada e a geração de tensões decorrentes, com rebaixamento do nível do pré-filtro no espaço anular.

O acionamento das bombas pode induzir vibrações e impactos ritmados, capazes de liberar tensões adicionais (em especial, no caso de bombas de eixo prolongado). Em alguns casos especiais, estas bombas podem sofrer super-aquecimento e liberar calor, o qual afetará de maneira localizada o revestimento plástico eventualmente utilizado (redução do módulo de elasticidade do material).

A colmatção ou bloqueio externo de secções de filtros, no caso do desenvolvimento ter sido deficiente, poderá introduzir incremento dos esforços atuantes, de maneira localizada (pressão do meio, pressão do pré-filtro, etc). Isto é facilmente sanado, na maioria dos casos, executando-se a limpeza dos filtros com soluções químicas ativas apropriadas e desenvolvimento físico ("reativação").

O succionamento de água dos aquíferos através dos filtros, gera o aparecimento da chamada pressão de percolação, a qual atua diretamente sobre os filtros. A resistência dos filtros ranhurados ao afluxo de água, pode ser calculado de maneira aproximada, pela seguinte relação (Petersen & Rohwer & Albertson):

$$P_W = \frac{V^2}{200} \quad (\text{kgf/cm}^2) \quad (18)$$

onde:  $V = Q/F$  = velocidade de entrada de água (m/s)  
 $Q$  = volume de água extraída (m<sup>3</sup>/s)  
 $F$  = área da secção transversal dos filtros (m<sup>2</sup>)

Este valor representa um mínimo para a resistência que os filtros deverão apresentar. Deve ser buscado através do dimensionamento adequado do diâmetro, comprimento e área aberta.

O fator crítico para calcular a pressão de percolação (lateral), é a velocidade do fluxo nas ranhuras, condicionada principalmente pela área aberta e potência das bombas. Deve-se evitar, obviamente, a instalação de bombas na altura das secções dos filtros, quando então o succionamento

seria direto e maximizado proibitivamente, no mínimo promovendo o bloqueio/colmatação, arraste de finos e desgaste acentuado das ranhuras (abrasão) e geralmente conduzindo ao colapso estrutural.

### 3.4 - CÁLCULO DA PRESSÃO EXTERNA CRÍTICA

A equação derivada da clássica de Meyerhoff, a qual apresentamos no trabalho demonstrado no 3º Simpósio Internacional de Hidrogeologia (Madrid, Espanha, 1983), considerando-se o caso dos revestimentos enterrados e, portanto, devidamente suportados pelo meio geológico:

$$P_o = \sqrt{32 \cdot E' \cdot \frac{E \cdot I}{D_e^3}} \cdot \left[ \frac{1 - \Delta x/D}{(1 + \Delta x/D)^2} \right]^3 \quad (19)$$

À luz dos novos conhecimentos e dados emanados dos últimos ensaios com modelos reduzidos e simulação computacional, sofreu as necessárias transformações, expostas a seguir.

#### 3.4.1 - COEFICIENTE DE DEFORMAÇÃO OU ELIPTICIDADE ( $C_d$ )

O coeficiente inicialmente utilizado, com a derivação de Tartaglia efetuada, transmutou-se para:

$$C_d = (1,00 - 4,50 \cdot \frac{\Delta x}{D}) \quad (20)$$

onde  $\Delta x/D$  representa a deformação sofrida pela secção transversal circular ("ovalização").

Os últimos estudos demonstraram que o máximo recomendável para a ovalização, está por volta dos 10%, a partir da qual acentua-se a deformação dos revestimentos, até valores proibitivos e irreversíveis. A partir dos 20%, desencadeia-se francamente o processo de colapso estrutural, mesmo que não haja incremento da pressão externa atuante, em função da relação flexibilidade/amolgamento e condições de escoamento dos materiais constituintes dos tubos, crescendo o valor do parâmetro estrutural "n" (número de lóbulos ou ondulações significativas internas).

(FIGURAS 11 e 12)

TABELA 6 - VARIAÇÃO DO COEFICIENTE DE DEFORMAÇÃO

$\Delta x/D$	$C_d$	$\Delta x/D$	$C_d$
0%	1,000	13%	0,415
1%	0,955	14%	0,370
2%	0,910	15%	0,325
3%	0,865	16%	0,280
4%	0,820	17%	0,235
5%	0,775	18%	0,190
6%	0,730	19%	0,145
7%	0,685	20%	0,100
8%	0,640	21%	0,055
9%	0,595	22%	0,010
10%	0,550	23%	-0,035
11%	0,505	24%	---
12%	0,460	25%	---

(FIGURA 13)

### 3.4.2 - FATOR DE FLUTUAÇÃO ( $F_f$ )

Introduzido na equação para representar a influência da altura da coluna de água no interior dos revestimentos ( $h_a$ ), com relação a profundidade considerada para o poço ( $p$ ):

$$F_f = \left[ 1,00 - 0,33 \cdot \left( \frac{h_a}{p} \right) \right] \quad (21)$$

### 3.4.3 - COEFICIENTE DE SUPORTE ELÁSTICO DO MEIO (C<sub>e</sub>)

Destinado a compensar eventuais sub-estimativas do módulo de resistência passiva do meio (E'), devido ao pouco conhecimento atual disponível acêrca de sua variação em profundidade, conforme assinalado anteriormente:

$$C_e = \left( \frac{e^{0,020 \cdot p}}{e^{0,020 \cdot p} + 4} \right) \quad (22)$$

onde: e = 2,7183 (base dos logarítmos neperianos)

### 3.4.4 - EQUAÇÃO PARA CÁLCULO DA PRESSÃO EXTERNA

$$P_o = \sqrt{32 \cdot E' \cdot \frac{E \cdot I}{D_e^3} \cdot C_e \cdot F_f \cdot C_d} \quad (23)$$

A pressão crítica de colapso pode ser avaliada pela seguinte expressão:

$$P_{cri} \approx (1,05 \text{ a } 1,12) \cdot P_o \quad (24)$$

devendo escolher-se o valor 1,05 para os filtros e 1,12 para os tubos lisos.

O cálculo teórico clássico da pressão externa crítica dos tubos metálicos, pressupõe que as secções transversais sejam perfeitamente circulares, o que raramente ocorre na prática.

Preocupado com o desempenho estrutural real dos filtros - tipo Nold de aço, os mais utilizados pela indústria de poços na Alemanha (DIN-4922), o Instituto Federal de Ensaio de Materiais, do Technische Hochschule de Darmstadt, realizou uma série de ensaios para investigar a pressão externa crítica, cujos resultados acham-se condensados na tabela abaixo, correspondentes aos tubos de uso mais disseminado.

(FIGURA 14)



TABELA 7 - RESISTÊNCIA À PRESSÃO EXTERNA DOS FILTROS TIPO NOLD

DN (mm)	$D_i$ médio (mm)	$e_{nominal}$ (mm)	$e_{medida}$ (mm)	$P_{cri}$ (bars)
200	197	3,00	3,20	12,30
	196	4,00	4,10	24,10
	194	5,00	5,70	61,40
300	303	3,00	3,10	5,30
	304	4,00	4,20	10,10
	306	6,00	6,10	21,60
	308	8,00	8,50	43,90
400	396	3,50	3,60	3,00
	396	4,00	4,10	5,60
	395	5,00	5,50	11,20
	394	6,00	6,30	15,80
	392	8,00	8,40	25,90

Os resultados foram lançados no gráfico contido na figura 15 seguinte, onde pode-se avaliar comparativamente a resistência à pressão externa versus a espessura da parede dos filtros.

(FIGURA 15)

Os filtros não devem ser expostos a pressão externa crítica em nenhuma circunstância. Como a resistência dos tubos lisos é maior que a dos filtros, sua colocação intercalada é recomendável para equalizar os esforços e minimizar o carregamento da coluna, além de reduzirem as perdas de carga, sob o ponto-de-vista hidráulico.

A figura mostra esta situação de instalação dos filtros e tubos lisos, em condições desfavoráveis onde a lama de perfuração permaneceu no exterior e a água limpa preencheu o interior do revestimento, resultando em pressões externas excessivas.

Nos tubos de aço, o aumento da resistência à pressão externa é igual ao quadrado do incremento da espessura de parede do tubo, ou seja, duplicando-se esta quadruplicar-se-á aquela. A triplicação da espessura de parede conduzirá a incremento de nove vezes na resistência à pressão externa.

Este fato acha-se bem ilustrado no gráfico contido na figura 16, obtido pela Roscoe Moss em seus ensaios:

(FIGURA 16)

Ensaio congêneres conduzidos na Universidade Federal de Sta. Catarina, em 1985, para tubos de polipropileno nacional, apresentaram os seguintes resultados:

TABELA 8 - TUBOS DE PP

Diâmetro Nominal(in)	6,00	8,00	10,00	12,00
Diâmetro externo medido .....	168,30	219,20	273,20	324,70
Espessura média de parede .....	10,10	10,10	12,60	12,60
Resistência ao colapso (MN/m <sup>2</sup> .....	220,00	100,00	100,00	60,00
Resistência ao esmagamento (t/m <sup>2</sup> ) .....	4,50	4,50	3,70	3,50

Os tubos de PP têm o seguinte comportamento geomecânico, no revestimento de poços tubulares:

(FIGURA 17)

Para os tubos de "fiberglass" (FRP,FRM), temos:

(FIGURA 18)

Com relação aos tubos de PVC rígido, temos:

(FIGURAS 19, 20 e 21)

### 3.5 - CÁLCULO DA PROFUNDIDADE MÁXIMA DE INSTALAÇÃO

Este cálculo é o mais crítico na especificação de um revestimento, não apenas pelo pouco conhecimento ainda disponível, como também pelo fato dos tubos necessitarem de especificações robustas o suficiente para resistir aos esforços atuantes no subsolo, sem perder a viabilidade técnico-econômica, ou seja, a espessura de parede e as demais características estruturais devem ser maximizadas a favor da segurança, sem torná-los anti-econômicos.

Nos tubos de aço, por exemplo, é sabido que a resistência à pressão externa varia com o quadrado da espessura de parede, ou seja, duplicando a parede quadruplicar-se-á a resistência ao colapso; a triplicação conduzirá a um aumento da ordem de nove vezes na resistência! Todavia, com estes espessamentos de parede, os tubos tornam-se muito pesados e proibitivamente onerosos...

À luz dos dados e conhecimentos ad vindos principalmente dos ensaios de laboratório e das experiências de campo monitoradas, a avaliação da profundidade máxima de instalação dos revestimentos flexíveis pode ser executada aplicando-se a seguinte relação estatística:

$$p_c \cong 10,065 \cdot P_0 \quad (m) \quad (25)$$

Substituindo-se  $P_0$  pela equação (23), resulta:

$$p_c \cong 56,938 \cdot C_d \cdot (E' \cdot C_e \cdot F_r \cdot F_f)^{0,50} \quad (26)$$

onde:  $F_r = \frac{E \cdot I}{D_e^3} =$  fator de rigidez dos tubos

Analogamente, a profundidade crítica de instalação é dada - por:

$$p_{cri} \cong 10,065 \cdot P_{cri} \quad (27)$$

ou considerando a equação (24):

$$p_{cri} \cong (59,782a63,770) C_d \cdot (E' \cdot C_e \cdot F_r \cdot F_f)^{0,50} \quad (28)$$

Nos valores dados pelas equações (26) e (28) acha-se embutido um coeficiente de segurança algo exagerado ou mesmo conservador, porém, face à natureza empírica das equações (25) e (27), isto é "salutar".

Tão logo sejam realizadas as pesquisas relacionadas com a variação do módulo reativo ( $E'$ ) em função da profundidade e grau

de consolidação do meio geológico considerado, será possível o estabelecimento de equações mais condizentes e acuradas, facilitando inclusive o desenvolvimento de programas geomatemáticos em computadores.

### 3.6- CÁLCULO DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DOS TUBOS

Os tubos constituintes dos revestimentos dos poços, tanto os lisos como os filtros, devem estar aptos a resistir aos esforços - solicitantes, com boa margem de segurança.

O cálculo da resistência às pressões externas deve ser conduzido considerando-se o efeito de suporte proporcionado pelo meio geológico às tubulações instaladas verticalmente, em resposta a assimilação primária dos tubos ao carregamento e sua resposta em termos de flexibilidade.

O cálculo tradicional efetuado com a aplicação das equações e métodos bem conhecidos pela Engenharia Mecânica, não traduzem o desempenho estrutural real desejado para os revestimentos de poços, por não considerarem a influência positiva carregada pelo meio geológico.

Com a finalidade de ressaltar esta discrepância, serão expostos a seguir ambos os tipos de cálculo para tubos flexíveis, de maneira sucinta e objetiva. O cálculo para tubos flexíveis enterrados já foi objeto de trabalho anterior citado na bibliografia de referência, em detalhes.

#### 3.6.1 - TUBOS NÃO SUPORTADOS

As tubulações submetidas ao carregamento lateral radial, sem o efeito de suporte oferecido pelo meio onde são instaladas (por exemplo, um revestimento descido numa perfuração e circundada pela lama, com nível de água ou de lama mais baixo que o externo ou sem coluna de fluidos interna), defletem rapidamente e podem sofrer amolgamentos irreversíveis e colapsos.

Este comportamento estrutural é análogo àquele observado em tubos não enterrados submetidos a compressão, por exemplo, num ensaio de placas paralelas ou numa pilha de tubos armazenados e com altura exagerada.

A pressão crítica pode ser avaliada pela equação de M. Levy (1884), modificada por W.O. Clinedinst (1939):

$$P_{cr} = \frac{2.E}{1-\mu^2} \cdot \frac{1}{\frac{D_e}{e} \left( \frac{D_e}{e} - 1 \right)^2} = \frac{1}{(1-\mu^2) SDR (SDR-1)^2} \quad (29)$$

onde:  $\nu$  = coeficiente de Poisson  
 $SDR = D_e/e$

Em 1980, conjugando as equações diferenciais de Morley - com o método analítico de Galerkin, pesquisadores da Auburn University, USA, modificaram a equação (29), a qual assumiu a seguinte forma:

$$P_{cr} = P_o = \frac{C.E}{1 - \nu^2} \cdot \frac{1}{(SDR - 1)^3} \quad (30)$$

onde o coeficiente de deformação (C) é dado pelos gráficos contidos na figura 22.

Paralelamente, no Brasil, chegamos a uma outra equação - modificada, englobando um coeficiente de correção para a ovalização:

$$P_{cr} = P_o = \frac{2.E}{1 - \nu^2} \cdot \frac{1}{(SDR - 1)^3} \cdot \left(1 - 2,5 \frac{\Delta x}{D}\right) \quad (31)$$

a qual apresenta resultados algo mais precisos que a equação (30), reduzindo suas subestimativas (12% para as cargas radiais uniformes e 25% para as cargas radiais - com variação linear). A equação (31) conduz a resultados da ordem de 10% a 18%.

### 3.6.2 - TUBOS SUPORTADOS

A equação básica de Meyerhoff, modificada pela introdução dos coeficientes de deformação ( $C_d$ , equação 20) e de suporte elástico do meio ( $C_e$ , equação 22) e do fator de flutuação ( $F_f$ , equação 21), tem demonstrado ser bastante eficiente e fornecido a previsão da pressão externa "P" e da pressão crítica "P<sub>cri</sub>", com boa precisão (equações 23 e 24), a qual poderá ser melhorada tão logo estejam melhor investigadas as variações do módulo de Spangler.

Dependendo das condições geológicas e de algumas características conspícuas, o valor da pressão externa sobre os revestimentos dos poços, será estimado considerando-se como parcelas a pressão da formação, a pressão do fluido de perfuração, a pressão do envoltório granular do pré-filtro, a pressão de percolação de água subterrânea, a pressão de flambagem, etc:

$$P_o^* = P_o + P_F + P_D + P_B + P_W + P_K + \dots \quad (32)$$

### 3.7 - CÁLCULO DO ESFORÇO DE AMOLGAMENTO E DA RESISTÊNCIA AO AMASSAMENTO DAS TUBULAÇÕES.

O efeito da pressão externa radial, simples ou combinado com outro esforço (por exemplo, o carregamento longitudinal), pode ocasionar o amolgamento dos tubos, em especial dos filtros, por serem menos resistentes que os tubos lisos.

Em se tratando de tubos flexíveis, é importante o conhecimento das resistências ao amassamento devido a pressão lateral externa e devido a pressão exercida no sentido longitudinal, como demonstrou W.Flügge, na Alemanha.

#### 3.7.1 - RESISTÊNCIA AO AMASSAMENTO DEVIDO A PRESSÃO LATERAL

Esta resistência é facilmente calculada utilizando-se o gráfico de Flügge, contido na figura 23.

Calculam-se os valores dos parâmetros " $\alpha$ " e " $k$ " e obtêm-se " ":

$$\alpha = \frac{2.l}{d} \quad (33)$$

$$k = \frac{e^2}{3.d^2} \quad (34)$$

onde:  $l$  = comprimento do tubo (cm)  
 $d$  = diâmetro do tubo (cm)  
 $e$  = espessura de parede do tubo (cm)

A capacidade de carga pode ser então calculada aplicando-se a seguinte expressão:

$$P_k = 4,32.10^6 . \beta . \frac{e}{d} \quad (\text{kgf/cm}^2) \quad (35)$$

Segundo alguns pesquisadores, na fase atual de pouco conhecimento específico, é conveniente adotar um coeficiente de segurança da ordem de 1,50. Nessas circunstâncias, a equação (35) assume a seguinte forma:

$$P_k = 6,48.10^6 . \beta . \frac{e}{d} \quad (\text{kgf/cm}^2) \quad (36)$$

Considerando-se a relação "SDR", resulta:

$$P_k = 6,48.10^6 . \frac{\beta}{\text{SDR}} \quad (\text{kgf/cm}^2) \quad (37)$$

### 3.7.2 - RESISTÊNCIA AO AMASSAMENTO DEVIDO A PRESSÃO LONGITUDINAL.

Calculada pela aplicação da seguinte equação:

$$P_k = 2,16 \cdot 10^6 \cdot \beta \cdot e \quad (\text{kgf/cm de circunferência}) \quad (38)$$

onde o parâmetro " $\beta$ " obtido no gráfico da figura 24.

Na curva correspondente ao valor de "k", o menor valor de " $\beta$ " é obtido nos pontos  $\alpha$ ,  $\alpha/2$ ,  $\alpha/3$ , ...,  $\alpha/n$ .

Pelas mesmas razões aventadas anteriormente, é conveniente adotar um coeficiente de segurança da ordem de 1,5 resultando:

$$P_k = 3,24 \cdot 10^6 \cdot \beta \cdot e \quad (\text{kgf/cm}^2) \quad (39)$$

Em alguns casos, os estudiosos ingleses preferem utilizar a equação (14) para avaliar esta resistência intrínseca dos tubos lisos e filtros, em especial no caso de tubulações plásticas.

### 3.7.3 - RESISTÊNCIA DE TUBOS METÁLICOS MAIS RÍGIDOS

Para os tubos de aço ou ferro fundido com comportamento mais rígido, ou seja, com resistência aos esforços de colapso praticamente independentes da mobilização do efeito suporte do meio e função direta do fator de rigidez inerente a estrutura, as pressões de colapso são avaliadas pelas seguintes equações:

$$P_o^2 - \left\{ \frac{2 \cdot P_z}{\frac{D_e}{e} - 1} + \left[ 1 + 3 \left( \frac{D_e}{e} - 1 \right) \cdot \frac{\Delta x}{D} \right] P_{cri} \right\} P_o + \left( \frac{2 \cdot P_z \cdot P_{cri}}{\frac{D_e}{e} - 1} \right) = 0 \quad (40)$$

onde:  $P_{cri}$  = resistência ao colapso teórica de um tubo perfeitamente circular.

$P_z$  = carga limite 2 35.000psi  $\approx$  2.460,80 kgf/cm<sup>2</sup>

$P_o$  = pressão de colapso (c/elipticidade)

$\Delta x/D = 1\% =$  elipticidade

sendo:

$$P_{cri} = \frac{2 \cdot E}{1 - \mu^2} \cdot \left( \frac{1}{\frac{D}{e} - 1} \right)^3 \quad (41)$$

onde:  $E$  = módulo de Young =  $30 \cdot 10^6$  psi  $\cong$   $2.109.240$  kgf/cm<sup>2</sup>  
 $\mu$  = módulo de Poisson = 0,30

Os valores para calcular a resistência à tração dos revestimentos, são determinados pela equação:

$$P_T = \sigma_t \cdot \left( \frac{D - e}{2.000} \right) \cdot \pi \cdot e \quad (\text{ton}) \quad (42)$$

onde:  $\sigma_t$  = resistência à tração =  $60.000$  psi  $\cong$   
 $= 4.218,50$  kgf/cm<sup>2</sup>

Os valores para calcular a resistência à compressão axial dos revestimentos, são determinados pela equação:

$$P_D = \frac{P_z \cdot (D - e) \cdot \pi \cdot e}{2.000} \quad (\text{ton}) \quad (43)$$

Para os tubos encamisados ("two-ply steel well casing"), as pressões de colapso são determinadas pela fórmula seguinte

$$P_o = \frac{0,65 \times 62.600.000}{\left( \frac{D}{e_t} \right) \left( \frac{D}{e_t} - 1 \right)^2} \quad (\text{psi}) \quad (44)$$

onde:  $D$  = diâmetro nominal (in)  
 $e_t$  = espessura total do tubo =  $\sqrt{e_1^2 + e_2^2}$  (in)  
 $e_1$  = espessura da parede interna (in)  
 $e_2$  = espessura da parede externa (in)

Os esforços de compressão axial são calculados por:

$$P_D = \frac{(D_i + e) \cdot e \cdot e_t \cdot P_{z_m}}{2.000} \quad (\text{ton}) \quad (45)$$

onde:  $e$  = espessura individual de parede (in)  
 $P_{z_m}$  = carga limite mínima =  $55.000$  psi =  $3.867$  kgf/cm<sup>2</sup>



#### 4 - EXEMPLOS DE CÁLCULOS EM CASOS REAIS

Com o objetivo de permitir a melhor visualização da metodologia de cálculo estrutural aqui apresentada, seguem-se alguns casos reais de dimensionamento de tubos de aço e de plásticos, utilizados no revestimento interno de poços profundos por nós projetados e assistidos, no Brasil e no Exterior.

##### 4.1 - REVESTIMENTOS METÁLICOS

Na região de Tacuarembó, Uruguai, em 1980 projetamos e assistimos a construção de um poço tubular completado na Formação Tacuarembó (equivalente a brasileira Botucatu), com profundidade de 320,00 metros, aquífero confinado.

A perfuração foi conduzida com diâmetro de 14" (350mm), sistema rotativo com utilização de lama à base de argilas não bentoníticas. O revestimento constituiu-se por tubos lisos de aço galvanizado (ASTM-A.120/A.53-API-5L.B) e filtros de aço galvanizados Nold (DIN-4922), diâmetro nominal de 8" (200mm), junta luva e rêsca.

No espaço anular existente entre as paredes da perfuração e o revestimento interno, na profundidade de 50,00 a .... 320,00 metros, injetou-se pré-filtro de cascalho selecionado, com bom grau de arredondamento e compactação menor que 85%MP. O trecho de 0 a 50,00 metros de profundidade foi cimentado com pasta adequada (selo sanitário e tampão obturador).

As características dos tubos utilizados são as seguintes:

##### Tubos lisos (Schedule 20, americanos)

- Diâmetro externo .....	8-5/8" (219,08 mm)
- Diâmetro interno .....	8" (200,00 mm)
- Espessura de parede .....	0.250" (6,35 mm)
- Pêso unitário .....	33,31 kg/m
- Pêso total .....	4.230,37 kg (ã sêco)
- SDR .....	35,00
- Extensão total .....	127,00 metros

##### Filtros Nold (padrão API, alemães)

- Diâmetro interno .....	8" (200,00 mm)
- Diâmetro externo .....	8-5/8" (219,08 mm)
- Espessura de parede .....	0.240" (6,00 mm)
- Pêso unitário .....	22,78 kg/m
- Pêso total (ã sêco) .....	4.396,54 kg
- SDR .....	44,00
- Extensão total .....	193,00 m
- Abertura das ranhuras ....	1,00 mm
- Área aberta unitária .....	8.10%

Como a seção mais vulnerável da coluna de revestimento do poço correspondia aos filtros, colocados na profundidade de 280,00 a 319,00 metros, o dimensionamento estrutural foi baseado nela.

### 19) Esforços durante a instalação

O revestimento foi descido na perfuração cheia de lama e com o fundo tamponado. À seco, a tubulação completa pesaria - 8.626,91 kg; no caso, este peso foi em boa parte compensado - pelo empuxo da coluna de fluido de perfuração.

Aplicando-se a equação (3), resulta:

$$P_i = 1,20 \times 320,00 = 384,00 \text{ t/m}^2 = 38,40 \text{ kgf/cm}^2$$

$$P = (7,85 \times 320,00 \times 0,031416) - (1,20 \times 320,00 \times 0,03144) + 38,40 = 78,92 - 50,47 = 28,45 \text{ t/m}^2 = 2,85 \text{ kgf/cm}^2$$

Como o revestimento foi provido de guias centralizadoras, não atuaram tensões devidas a flambagem da coluna.

A resistência à compressão longitudinal da coluna, calculada com auxílio da equação (14), é da ordem de:

$$P_D = 370 \text{ N/mm}^2 = 0,37 \text{ kN/m}^2$$

$$P_C = \frac{0,37 \times 3,1416 \times 0,006}{4} \times 2,50 = 0,00436 \text{ kN/m}^2 = 0,0000436 \text{ kgf/cm}^2$$

portanto, desprezível.

### 20) Esforços após a instalação

A pressão da formação (artesianas) não atuou nessa fase, devido ao efeito-tampão da coluna de lama mantida na perfuração e interior do revestimento.

O pré-filtro granular envolto ainda por lama, preenchem o espaço anular dos 50,00 aos 320,00 metros de profundidade, pesou:

$$3,1416 \times 270,00 \times 0,020625 \times 2,00 \cong 35,00 \text{ ton}$$

A tensão gerada pelo pré-filtro, calculada pela equação 16 é da ordem de:

$$P_B = \frac{0,031416 \times 1,70}{0,20 \times 0,111} \times 0,4663 \times (1,00 - 2,7183^{-226,13}) = 1,122 \text{ t/m}^2 = 0,1122 \text{ kgf/cm}^2$$

Com relação a pressão externa, aplicando-se a equação (23) resulta:

$$C_e = \left( \frac{2,7183^{6,40}}{2,7183^{6,40} + 4} \right) = 0,9934$$

$$C_d = (1,00 - 0,225) = 0,775 \quad (x/D = 5\%)$$

$$P_o = 32 \times 70,00 \times 1,35 \times 0,9934 \times 0,775 = 42,48 \text{ kgf/cm}^2$$

portanto, a pressão crítica é da ordem de:

$$P_{cr} \cong 1,05 \times 42,48 \cong 44,60 \text{ kgf/cm}^2$$

bem abaixo da pressão crítica ensaiada em Darmstadt (61,40 - kgf/cm<sup>2</sup>), implicando num coeficiente de segurança do redor - de 1,38.

A profundidade máxima de instalação, dada pela equação (28), é de aproximadamente:

$$P_{cri} \cong 10,065 \times 61,40 \cong 618,00 \text{ metros}$$

cêrca de 1,93 vêzes a profundidade de instalação.

Se a secção considerada fosse constituida por tubos lisos, teríamos:

$$P_o = \sqrt{32 \times 70,00 \times \frac{2.000.000 \times 0,02134}{10.514,97}} \times 0,775 = 73,65 \text{ kgf/cm}^2$$

$$P_{cr} \cong 1,12 \times 73,65 = 82,49 \text{ kgf/cm}^2$$

$$P_{cr} \cong 10,065 \times 82,49 \cong 830,00 \text{ m}$$

O poço foi concluido com sucesso e produz água subterrânea - de excelente qualidade, utilizada na fabricação de cerveja e refrigerantes. Sua vazão é de 38.000 litros/hora com surgência natural e 265.000 litros/hora bombeado, sem carreamento de finos.

## 4.2- REVESTIMENTOS PLÁSTICOS

### 4.2.1 - Com tubos de PVC rígido

No município catarinense de Curitibanos, construiu-se um poço tubular misto, seccionando-se os basaltos toleíticos da Formação Serra Geral e os arenitos subjacentes das Formações Botucatu e Pirambôia, perfazendo a profundidade total de 308,00 metros.

A perfuração foi conduzida com diâmetro de 10" (250mm) nos basaltos e 15" (375mm) nos arenitos. Foi executado um furo-guia preliminar com diâmetro de 8" (200mm), a fim de ensaiar as condições hidrogeológicas locais, com o objetivo de confirmar as previsões da prospecção prévia e verificar as condições de viabilidade de utilização dos tubos de PVC rígido no revestimento, para redução dos custos de construção, julgados muito elevados pelo Interessado.

No revestimento, foram utilizados tubos de PVC rígido cõr marrom (EB.183, classe 20), juntas roscáveis, de fa--

bricação nacional. Os tubos lisos e os ranhurados (tipo Hidrosan LP-3CX, ranhuras transversais), com comprimento padrão de 6,00 metros, foram ensaiados na UFSC-Depto. Engenharia Mecânica, onde determinou-se seu módulo de elasticidade original - com precisão, visto a necessidade de calcular sua variação de corrente das condições de temperatura constatadas no aquífero, para previsão de sua performance geomecânica.

As características principais desses tubos termoplásticos, são as seguintes:

- Diâmetro externo ..... 200,00 mm
- Diâmetro interno ..... 171,40 mm
- Espessura de parede ..... 14,30 mm
- Pêso unitário ..... 12,10 kg/m
- Relação SDR ..... 14,00
- Módulo de elasticidade original... 28.100 kgf/cm<sup>2</sup>
- Pêso específico ..... 1,46 g/cm<sup>3</sup>

O dimensionamento dos tubos foi executado considerando-se a secção basal, o ponto de carregamento mais crítico do revestimento, em especial por ser ranhurada (290,00 a 308,000 metros).

A coluna do revestimento foi descida com o fundo aberto, na perfuração preenchida com lama de viscosidade adequada para a estabilização da formação geológica e o controle da pressão artesiana. As tensões atuantes foram calculadas pela equação (2):

$$P' = (1,46 \times 308,00 - 1,20 \times 308,00) \times 0,031416 = 2,52 \text{ t/m}^2 = 0,252 \text{ kgf/cm}^2$$

A Formação Botucatu foi seccionada na profundidade de... 188,00 a 308,00 metros, sendo a perfuração alargada nesse trecho para receber o pré-filtro. O cascalho foi injetado no espaço anular, perfazendo volume de 3,35 metros cúbicos, correspondente a um pêso de 5,70 toneladas.

A pressão exercida pelo pré-filtro sobre o revestimento, calculada com auxílio da equação (16), foi da ordem de:

$$P_B = \frac{0,1105 \times 1,70}{0,20 \times 0,1110} \times 0,4663 \times (1,00 - 2,7183^{-61,88}) = 3,950 \text{ t/m}^2 = 0,395 \text{ kgf/cm}^2$$

A pressão externa calculada pela equação (23), foi de:

$$C_e = \left( \frac{2,7183^{6,16}}{2,7183^{6,16} + 4} \right) = 0,992$$

$$C_d = (1,00 - 4,50 \times 0,05) = 0,775$$

$$P_o = \sqrt{32 \times 70,00 \times \frac{28.100 \times 0,2437}{8.000} \times 0,992} \times 0,775 = 33,80 \text{ kgf/cm}^2$$

A pressão crítica, dada pela equação (24), é da ordem de:

$$P_{cr} \cong 1,05 \times 33,80 = 35,50 \text{ kgf/cm}^2$$

e a profundidade máxima de instalação de:

$$p_{cr} \cong 10,065 \times 35,50 \cong 357,00 \text{ metros}$$

Portanto, dada a profundidade de instalação da secção basal de filtros, temos o seguinte coeficiente de segurança:

$$C_s = \frac{357,00}{308,00} \cong 1,16$$

O poço foi concluído com sucesso, produzindo água potável de excelente qualidade, com vazão extraída de 122.000 litros/hora (33,89 l/s), sem carreamento de finos, com nível dinâmico de 75,00 metros (nível estático de 10,00 metros), condicionando capacidade específica de 1,88 m<sup>3</sup>/h/m e rebaixamento específico de 0,533 m/m<sup>3</sup>/h.

#### 4.2.2 - Com tubos de FRM ("fiberglass")

No Suriname, construímos um poço tubular experimental para o Governo, num complexo militar, com tubos lisos e filtros de FRM (ASTM-D.3517), fabricação americana, com profundidade de 180,00 metros, com excelentes resultados.

Os tubos lisos, em secções de 3,00 e 6,00 metros de comprimento, junta travada ("locking key joint"), foram fabricados pela Amoco (USA), marca Techite, modelo 156, com as seguintes características principais:

- Diâmetro externo .....	222,75 mm
- Diâmetro interno .....	209,75 mm
- Espessura de parede .....	13,00 mm
- Pêso unitário .....	9,23 kg/m
- Módulo de elasticidade .....	120.000 kgf/cm <sup>2</sup>
- Relação SDR .....	17,00

Os filtros ("Kwikey"), em secções de 3,00 metros de comprimento e com junta travada, foram fabricados pela Fiberglass Resources Corporation (USA), com as seguintes características principais:

- Diâmetro externo .....	225,25 mm
- Diâmetro interno .....	209,75 mm
- Espessura de parede .....	15,50 mm
- Pêso unitário .....	9,97 kg/m
- Relação SDR .....	15,00
- Módulo de elasticidade .....	120.000 kgf/cm <sup>2</sup>
- Área aberta .....	10%

A perfuração foi conduzida com máquina roto-pneumática Ingersoll-Rand, com diâmetro de 15-3/16" (385,76mm), utilizando um fluido de perfuração à base de lama sintética biodegradável ("Revert").

O pré-filtro constituiu-se de cascalho quartzoso bem selecionado, com arredondamento e esfericidade excelentes, perfazendo o volume total da ordem de 13,00 metros cúbicos ( $\cong$  26,00 ton), preenchendo o espaço anular na profundidade de 30,00 a 180,00 metros, com acomodação natural (85%MP).

A pressão lateral devida ao pré-filtro, calculada pela equação (16), é de aproximadamente:

$$P_B = \frac{1168,76 \times 0,002}{22,525 \times 0,051535} \times 0,46631 \cong 0,940 \text{ kgf/cm}^2$$

A pressão externa crítica, calculada pelas equações (23) e ... (24), para as secções de filtros mais profundas (157/178m), é da ordem de:

$$P_o = \sqrt{32 \times 70,00 \times \frac{120.000 \times 0,0610}{11.428,64} \times 0,9015} \times 0,775 = 28,12 \text{ kgf/cm}^2$$

$$P_{cr} = 1,07 \times 28,12 \cong 30,00 \text{ kgf/cm}^2$$

A profundidade máxima de instalação, calculada pelas equações (25) e (26), é de aproximadamente:

$$p_c \cong 10,065 \times 28,12 \cong 283,00 \text{ m}$$

$$p_{cr} \cong 10,065 \times 30,00 \cong 302,00 \text{ m}$$

Nas condições de instalação do poço, o coeficiente de segurança para a secção basal de filtros, é de cerca de:

$$C_s = \frac{302,00}{178,00} \cong 1,70$$

O poço-pilôto foi concluído com pleno sucesso, produzindo água potável de primeira qualidade, com vazão explotada de 80.000 l/h, servindo de base para projeto governamental de abastecimento público de agro-vilas.

#### 4.2.3 - Com tubos de PP

Em 1984, para um projeto de abastecimento de água potável num complexo de mineração de Tarija, Bolívia, construímos quatro poços tubulares utilizando revestimentos de polipropileno de alto impacto, fabricados na Inglaterra pela Hydroline, sob a marca Hydroline-Plus.

Estes tubos são fabricados com PP azul aditivado com cargas minerais especiais, incrementadoras do fator de rigidez, possuindo módulo de elasticidade  $E = 15.050 \text{ kgf/cm}^2$ , com as seguintes características principais:

- Diâmetro externo ..... 273,20 mm
- Diâmetro interno ..... 248,00 mm
- Espessura de parede ..... 12,60 mm
- Pêso unitário ..... 9,60 kg/m

- Relação SDR ..... 22,00

Os tubos foram acoplados, entre si, através de juntas do tipo rêsca interna (filetes quadrados), cuja resistênçia à ruptura é da ordem de 11,60 toneladas. A resistênçia ao torque é de 1.525 Nm(mãxima).

As perfurações foram conduzidas com diâmetro de 400mm, até a profundidade de 80,00 metros. Os poços foram providos de pré-filtro granular constituído por esferas de vidro ocupando o espaço anular na profundidade de 20,00 a 80,00 metros, perfazendo o volume de 4,50 metros cúbicos (7,70 ton/poço).

O revestimento foi provido de guias centralizadoras espaçadas de 6,00 metros. Foram intercaladas secções de filtros com ranhuramento longitudinal, ao longo do trecho do revestimento compreendido entre 20,00 e 80,00 metros de profundidade, com secção basal de extensão 9,00 metros (70/79m).

A pressão lateral atuante, considerando-se a secção mais vulnerável ao colapso (filtros no trecho 70/79m), calculada pela equação (23), foi de:

$$C_e = \left( \frac{2,7183^{1,60}}{2,7183^{1,60} + 4} \right) = 0,553$$

$$F_f = 1,00 - 0,33 \left( \frac{70,00}{80,00} \right) = 0,711$$

$$C_d = (1,00 - 4,50 \times 0,050) = 0,775$$

$$P_o = \sqrt{32 \times 95,00 \times \frac{15.050 \times 0,1667}{20.391,17} \times 0,553 \times 0,711} \times 0,775 \cong 9,40 \text{ kgf/cm}^2$$

A pressão crítica e máxima de instalação, calculada pela equação (24), é de:

$$P_{cr} \cong 1,05 \times 9,40 \cong 9,90 \text{ kgf/cm}^2$$

correspondente a profundidade de:

$$p_c = 10,065 \times 9,90 \cong 100,00 \text{ m}$$

portanto, considerando a profundidade de instalação e a máxima, temos o seguinte coeficiente de segurança:

$$C_s = 100,00/80,00 \cong 1,25$$

Os poços apresentaram vazão individual de 35.000 l/h, conforme as previsões de projeto, sendo imediatamente ativados para suprir a usina de beneficiamento de minérios.

#### 4.2.4 - Com tubos de PA-66 ("Nylon")

Na região de Wankie, Zimbabwe, África, na área do Victoria Falls National Park, em 1978, tivemos oportunidade de projetar e acompanhar a completação de dois poços construídos por uma companhia de perfuração italiana, para o Governo local, utilizando revestimentos de nylon aditivado com fibra de vidro

Estes tubos de nylon, fabricados na Alemanha Ocidental pela Jung Werke, sob a marca Julon, têm as seguintes características principais:

- Diâmetro externo ..... 215,00mm
- Diâmetro interno ..... 195,00mm
- Espessura de parede ..... 10,00mm
- Peso unitário ..... 1,15 g/cm<sup>3</sup>
- Peso específico ..... 8,10 kg/m
- Relação SDR ..... 21,00
- Módulo de elasticidade ..... 14.275 kgf/cm<sup>2</sup>

Os poços foram abertos com perfuratriz rotativa, no diâmetro de 325mm (13"), até a profundidade de 98,00 metros. Foram preparados filtros com ranhuramento transversal, no padrão Hidrosan LP-3CX, a partir dos tubos lisos, com área aberta de 12%. Estes filtros foram intercalados com os tubos lisos, a partir da profundidade de 23,00 metros, provendo-se guias centralizadoras a cada 8,00 metros, ao longo de todo o revestimento.

No espaço anular (23,00 a 98,00m), instalou-se pré-filtro granular composto por seixos rolados de rio, selecionados, com bom arredondamento, quartzosos, perfazendo volume de ..... 4,00 m<sup>3</sup>/poço (7,00 ton).

Na época, havia localmente um certo temor na utilização de tal tipo de tubos termoplásticos, devido a ausência de experiência local. Dessa maneira, a Administração do parque resolveu construir um poço-pioneiro no local mais crítico, sob o ponto-de-vista geológico, onde a partir dos 50,00 metros de profundidade ocorre tendência acentuada das perfurações aluírem e onde, portanto, haveria carregamento mais acentuado dos tubos do revestimento, pela formação circundante.

O poço foi concluído com êxito, produzindo a vazão de 43.000 litros horários, com água potável de primeira qualidade, isenta de areia, com nível dinâmico de 12,00 metros. Para contornar o problema do desmoronamento localizado e reduzir os problemas de incrustação das paredes da perfuração com lama, logo após a descida dos tubos e seu posicionamento definitivo, procedeu-se a uma cimentação basal (79/80m) e foi injetado o pré-filtro com lama de viscosidade adequada, mantendo-se os níveis interno e externo ao revestimento nivelados e na boca-do-poço.

A seguir, lentamente, foi sendo reduzida a viscosidade do fluido de perfuração ("afinamento da lama"), até o assentamento do cascalho. Eliminou-se então a lama do poço, completou-se o nível do pré-filtro e passou-se ao desenvolvimento químico e físico do poço.



Nessa fase crítica de carregamento do revestimento, atuaram os seguintes esforços:

Pressão radial exercida pelo meio geológico

$$P_r = 10,75 \times 0,00145 \times \frac{(0,217443)^{0,50}}{0,389186} \times \left[ 1,00 - \left( \frac{10,75}{32,06} \right)^{0,39} \right] \\ \cong 0,65 \text{ kgf/cm}^2$$

Pressão exercida pela lama

$$P_l = (0,00115 \times 9800 - 0,0020 \times 9800) \times (3,1416 \times 16,25) = \\ = 6,91 \text{ kgf/cm}^2$$

Pressão exercida pelo pré-filtro

$$P_B = \frac{829,58 \times 0,0020}{21,50 \times 0,051535} \times 0,46631 \cong 0,70 \text{ kgf/cm}^2$$

Após a completação, a pressão lateral externa atuante, foi a seguinte:

$$P_o = \sqrt{32 \times 70,00 \times \frac{14.275 \times 0,0834}{9938,38} \times 0,6396} \times \\ \times 0,820 \cong 10,74 \text{ kgf/cm}^2$$

com ovalização de 4% ( $x/D = 0,040$ ).

A pressão crítica é da ordem de:

$$P_{cr} = 1,085 \times 10,74 = 11,653 \text{ kgf/cm}^2$$

correspondendo a uma profundidade máxima de instalação de cerca de:

$$p_{cr} = 10,065 \times 11,653 \cong 117,00 \text{ m}$$

o que confere, nas condições de instalação do revestimento, o seguinte coeficiente de segurança:

$$C_s = 117,00/98,00 \cong 1,20$$

O outro poço foi construído nos mesmos moldes, com sucesso, em locação geológica mais favorável, em termos de estabilidade geomecânica. Ambos suprem as necessidades de água potável do Parque e do pequeno hotel recentemente instalado.

Vários outros poços têm sido construídos na região, utilizando revestimentos de nylon, sem nenhuma notícia de amolgamentos proibitivos ou colapsos estruturais. Frise-se que os dois poços do Parque são considerados profundos, pois as condições hidrogeológicas regionais condicionam, em geral, profundidades de 60,00 a 80,00 metros para os poços.

#### 4.2.5 - Com tubos de ABS

Em 1980, no Campus da Arizona State University, na cidade de Tempe, Arizona, USA, dentro da programação de Mestrado, tive a oportunidade de locar, projetar e construir um poço tubular revestido com tubos e filtros de acrílico-nitrilo-butadieno-estireno (ABS), um dos termoplásticos mais utilizados naquele País.

A perfuração e completação do poço foi conduzida pelo U. S. Geological Survey - Department of Arizona, com acompanhamento integral da ASU, na nossa pessoa. Os arenitos mesozóicos foram seccionados até a profundidade de 105,00 metros, detendo-se no topo de um derrame de basalto toleítico, com o diâmetro de 8-5/8" (219,08mm). O nível estático equilibrou-se na profundidade de 11,00 metros e os arenitos, dada sua litificação boa, não desmoronaram mantendo-se estáveis na perfuração, tornando desnecessária a utilização de fluidos de perfuração.

A completação do poço foi com filtros posicionados diretamente no aquífero, sem pré-filtro granular. As secções de filtros foram envelopadas com manta não-tecida de poliéster, a fim de verificar sua eficiência hidráulica, dado o interesse suscitado com esta nova tecnologia que havíamos desenvolvido no Brasil, a partir de 1974.

Os tubos de ABS utilizados, foram manufaturados pela Durapipe, sob a marca Duraplus, com as seguintes características principais:

- Diâmetro externo .....	180,34 mm
- Diâmetro interno .....	159,46 mm
- Espessura de parede .....	10,44 mm
- Peso unitário .....	5,88 kg/m <sup>3</sup>
- Peso específico .....	1,06 g/cm <sup>3</sup>
- Relação SDR .....	17,00
- Módulo de elasticidade .....	17.500 kgf/cm <sup>2</sup>

Os filtros foram preparados, a partir dos tubos lisos, pelo ranhuramento transversal no padrão Hidrosan LP-3C, com área aberta de 12%, mais do que suficiente para a vazão de projeto (25.000 l/h). Todas as juntas foram do tipo luva e rêsca (API).

A secção de filtros mais profunda, com extensão de 24,00 m, foi posicionada na base do revestimento (80/104m), constituindo-se na porção mais carregada externamente, daí o dimensionamento ter sido conduzido baseado nela.

Os esforços atuantes foram os seguintes:

Pressão radial exercida pelo aquífero livre

$$P_r = 9,017 \times 0,0016 \times (0,47/2,60) \times 1,00 \cong 0,0030 \text{ kgf/cm}^2$$

Pressão exercida pela coluna de água

$$P' = (0,00106 \times 10,500 - 0,0010 \times 9,400) \times 376,961 \cong 6,52 \text{ kgf/cm}^2$$

### Pressão lateral externa

$$P_o = \sqrt{32 \times 50,00 \times \frac{17.500 \times 0,09482}{5.865,11} \times 0,671} \times 0,775 \cong 13,51 \text{ kgf/cm}^2$$

considerando-se o poço em condições estáticas e com ovalização dos tubos estimada ao redor dos 5%. Para condições dinâmicas (ND=37m) e ovalização real de 3,25% (verificada pela inspeção com TV em circuito fechado, após a completação e ensaios do poço), temos:

$$P_o = 32 \times 50,00 \times 0,283 \times 0,671 \times 0,787 \times 0,955 \cong 14,77 \text{ kgf/cm}^2$$

### Pressão crítica de colapso

$$P_{cr} \cong 1,07 \times 14,77 \cong 15,80 \text{ kgf/cm}^2$$

### Profundidade máxima de instalação

$$p_c \cong 10,065 \times 15,80 \cong 160,00 \text{ m}$$

dada às condições de instalação do revestimento, temos o seguinte coeficiente de segurança:

$$C_s = (160,00/105,00) \cong 1,52$$

Após concluído e estudado, o poço foi incorporado ao sistema de abastecimento de água da ASU, estando em exploração normal até a presente data (18h/dia). O USGS aplicou a tecnologia de filtros ranhurados envelopados com manta não-tecida filtrante em vários poços da região sudoeste americana, todos com sucesso.

#### 4.2.6 - Com tubos de PVC

Estes tubos termoplásticos experimentais, extrudados com resina PVC aditivada com fibra de vidro moída e flocos de mica HAR e micro-esferas de vidro, com fator de rigidez sensivelmente incrementados, foram indicados para o revestimento de um poço experimental construído pela Universidade da Sicília, Itália, num projeto do qual tomávamos parte em 1983.

Os tubos foram extrudados segundo a técnica experimental que desenvolvemos no Brasil (1980), em seções de 3,00 metros, providas de juntas estanques com rósca interna (filetes quadrados), reforçadas por adesivo, com elevada resistência à tração (maior que 8.000kgf). O composto foi preparado no Brasil e a extrusão dos tubos executada numa importante indústria de Milão, segundo a norma italiana Brev.Nº 24977A/82, com caneluramento longitudinal, com as seguintes características principais:

- Diâmetro externo ..... 224,00 mm
- Diâmetro interno ..... 200,00 mm
- Espessura de parede ..... 12,00 mm
- Pêso unitário ..... 7,85 kg/m<sup>3</sup>
- Pêso específico ..... 1,56 g/cm<sup>3</sup>
- Relação SDR ..... 19,00

Os filtros foram preparados segundo as especificações Hidrosan LP-3C, com ranhuramento transversal e área aberta de 12,50% .

A perfuração foi conduzida até a profundidade de 401,00 metros no diâmetro de 16-15/16" (430,00 mm), seccionando vários níveis desmoronantes, utilizando lama não bentonítica. As secções de filtros foram escalonadas ao longo da extensão do revestimento, com a mais profunda (basal) no trecho 340/400 metros.

Dadas as excelentes condições de alinhamento e de verticalidade da perfuração e as características semi-rígidas da tubulação, as guias centralizadoras foram espaçadas de 18,00 metros, mantendo o revestimento centralizado e favorecendo o encascalhamento do poço.

O pré-filtro granular, composto por seixos rolados arredondados e selecionados, foi instalado apenas nos trechos onde foram posicionadas as secções de filtros, sendo o restante do espaço anular preenchido por cimentação adequada. Dessa maneira, segundo a teoria do silo, os esforços carreados pelo pré-filtro sobre os filtros, são desprezíveis, da ordem de:

$$P_B = \frac{1452,20 \times 0,0017}{22,40 \times 0,051534} \times 0,00080 \cong 0,00171 \text{ kgf/cm}^2$$

O esforço de curta duração aduzido pela presença do fluido preenchendo a perfuração, atuando sobre a secção basal de filtros, durante a instalação do cascalho do pré-filtro, foi de:

$$P = \left[ (1,56 \times 401,00 \times 0,1452) - (2,00 \times 401,00 \times 0,0394) \right] + \left( \frac{401,00 \times 1,20}{0,040} \right) \cong 7,12 \text{ kgf/cm}^2$$

A pressão lateral externa, apos a completação do poço, atuando radialmente, foi da ordem de:

$$P_o = \sqrt{32 \times 95,00 \times \frac{45.000 \times 0,1440}{11.239,42}} \times 0,775 \cong 41,87 \text{ kgf/cm}^2$$

A pressão crítica de colapso, é de aproximadamente:

$$P_{cr} = 1,12 \times 41,87 \cong 46,90 \text{ kgf/cm}^2$$

correspondendo a profundidade máxima de instalação de:

$$p_c = 10,065 \times 46,90 \cong 472,00 \text{ metros}$$

portanto, nas condições de instalação no poço, com o seguinte coeficiente de segurança:

$$C_s = \frac{472,00}{401,00} \cong 1,18$$

Todavia, dado o grau de litificação elevado dos calcários seccionados, mesmo considerando os fraturamentos com material desmoronante e os canais de dissolução kársticos, a pressão real atuante no fundo do revestimento, medida cuidadosamente durante o período de monitoramento do poço, foi de  $P_m \cong 37,52 \text{ kgf/cm}^2$ , elevando o coeficiente de segurança para cerca de  $C_s \cong 1,50$ .

A vazão de exploração foi fixada em 98.000 litros/hora, suficiente para abastecer com folga a pequena comunidade local, operando a bomba submersa durante 16 horas por dia, mantendo o reservatório público com nível constante.

#### 4.3 - REVESTIMENTOS MISTOS

No presente trabalho, entende-se por revestimentos mistos os constituídos pela combinação de tubos termoplásticos de materiais diferentes (PVC & ABS, FRP & PVC, etc) e/ou tubos plásticos lisos e filtros metálicos (PVC & aço, etc).

Dentre as várias experiências conduzidas, ressaltam aquelas efetuadas no biênio 1981-1982 no Estado de Santa Catarina, onde tubos lisos de PVC rígido (EB.183 e DEFoFo-EB.1208) foram combinados com filtros tipo Nold (aço galvanizado), Johnson (aço inoxidável) e Hidrosolo (aço inoxidável): Laguna, Araranguá, Maracajá, Lages, Treze de Maio, Sombrio, Garopaba, Araquari, Joinville, Mafra, Rio do Sul, Imbituba, etc.

No Uruguai, conduzimos a construção de poços utilizando revestimentos constituídos por tubos lisos de ABS e filtros tipo Hidrosan em PVC rígido, na Província de Treinta-y-Tres, com juntas rosqueadas.

Na Fazenda Chapadão, Santa Vitória, MG, em 1975, construímos um poço tubular pioneiro utilizando tubos de FRP lisos (Polyarm) e filtros de aço inoxidável (Johnson), com juntas luva e rêsca.

No caso de plásticos combinados, faz-se o dimensionamento da espessura de parede em função daquele com módulo de elasticidade menor, a favor do fator de rigidez. No exemplo dado para o Uruguai, o dimensionamento deu-se com base nos tubos de ABS, dada a relação da ordem de 1,71 para os módulos de elasticidade (ABS = 17.500 kgf/cm<sup>2</sup> PVC = 30.000 kgf/cm<sup>2</sup>).

No caso de tubos lisos plásticos e filtros metálicos, o dimensionamento é feito com base nos tubos plásticos, dada a grande diferença dos módulos de elasticidade. No exemplo do poço da Fazenda Chapadão (FRP = 100.000 kgf/cm<sup>2</sup>, Aço = 2.000.000 kgf/cm<sup>2</sup>), a relação é da ordem de 20,00!

No exemplo dos poços de Santa Catarina ( $PVC = 30.000 \text{ kgf/cm}^2$ ,  $Aço = 2.000.000 \text{ kgf/cm}^2$ ), a relação é de aproximadamente 3,06! Com relação ao peso unitário, a relação dos tubos de aço e os plásticos, está por volta de 1/7.

## 5 - PROGRAMAS PARA MICROCOMPUTADORES

Elaboramos vários programas ("softwares") abordando a performance estrutural dos revestimentos flexíveis em poços tubulares, à luz da metodologia analítica desenvolvida, alguns contando com respostas gráficas.

Estes "softwares" acham-se disponíveis em linguagem BASIC. A título ilustrativo, reproduzimos a listagem do mais simples, em anexo.

## 6 - BIBLIOGRAFIA DE REFERÊNCIA

- Allgood, J.R, 1972 - "Summary of Soil-Structure Interaction", U.S. Naval Civil Engineering Laboratory, Tech. Rep. R771, USA.
- Allman, W.B, 1977 - "Design Approach Buried Flexible Pipes", E. I. DuPont de Nemours Co. Inc, Delaware, USA.
- Andronicou, A. & Walker, A.C - "Buckling of Ring Stiffened Shells Subjected to Pressure and Axial Loading", inédito.
- A.S.T.M, 1978 - "Standard Specification for Thermoplastic Water Well Casing Pipe and Couplings Made in Standard Dimension Ratios (SDR)", ASTM-F.480, USA.
- A.W.W.A, 1984 - "Standard for Water Wells", AWWA-A.100-84, Denver, Colorado, USA.
- Beer, F.P. & Johnston, E.R, 1982 - "Resistência dos Materiais", Editora McGraw-Hill do Brasil, São Paulo, Brasil.
- Bikis, E.A, 1978 - "A Laboratory and Field Study of Fiberglass and Continuous-Slot Screens", Thesis, Ohio University, Ohio, USA.
- Birley, A.W, 1974 - "Thermoplastic Properties and Design", John Wiley and Sons, USA.
- Bushnell, D, 1985 - "Computerized Buckling Analysis of Shells" M. Nijhoff Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
- Campbell, M.D. & J.H. Lehr - "Water Well Technology", McGraw-Hill Company, USA.
- Carvalho Filho, A, 1977 - "Tubulações Flexíveis Enterradas", Ocfibras Ltda, São Paulo, Brasil.
- Carvalho Filho, A, 1978 - "Procedimento para Cálculo Estrutural de Tubulações Flexíveis Enterradas", Ocfibras Ltda, São Paulo, Brasil.
- Chaplain, J, 1970 - "Pression des Terres sur Tubes P.V.C. Minces", La Technique de L'Eau, Paris, France.



PROGRAMA 1 - REV/PT

```
0001 REM DEFINIÇÃO DAS CONSTANTES
0015 T$(1) = "PEAD": REM NOME DO TUBO 1
0020 T$(2) = "PP": REM NOME DO TUBO 2
0025 M$(1) = "AREIA": REM NOME DO MEIO 1
0030 M$(2) = "CASCALHO": REM NOME DO MEIO 2
0050 TE(1) = 30:REM ÂNGULO DE ATRITO DO MEIO 1 (GRAUS)
0060 EL(1) = 50:REM MÓDULO DE SPANGLER DO MEIO 1 (KGF/CM2)
0070 TE(2) = 40:REM ÂNGULO DE ATRITO DO MEIO 2 (GRAUS)
0080 EL(2) = 70:REM MÓDULO DE SPANGLER DO MEIO 2 (KGF/CM2)
0085 PI = 3.1416
0090 TE(1) = TE(1)*PI/180
0100 TE(2) = TE(2)*PI/180
0105 GAMA = 2.67 = REM PÊSO ESPECÍFICO DO MEIO
0107 K0 = 0.45:REM CONSTANTE (MEIOS GRANULARES)
0110 E(1) = 9000:REM MÓDULO DE YOUNG DO TUBO 1
0120 E(2) = 10000:REM MÓDULO DE YOUNG DO TUBO 2
0200 CLS
0240 I = ES^3/12
0250 EI(1) = E(1)*I
0260 EI(2) = E(2)*I
0270 PO(1) = SQR(18.7*EI(1)*EI(1)/D^3)
0280 PO(2) = SQR(18.7*EI(1)*EI(2)/D^3)
0290 PO(3) = SQR(18.7*EI(2)*EI(1)/D^3)
0300 PO(4) = SQR(18.7*EI(2)*EI(2)/D^3)
0305 PC(1) = REM PROFUNDIDADE CRÍTICA DE INSTALAÇÃO DO TUBO 1
0306 PC(2) = REM PROFUNDIDADE CRÍTICA DE INSTALAÇÃO DO TUBO 2
0310 PC(1) = INT(PO(1)*10.065)
0320 PC(2) = INT(PO(2)*10.065)
0330 PC(3) = INT(PO(3)*10.065)
0340 PC(4) = INT(PO(4)*10.065)
0350 FOR N=1 TO 2
0360 FOR M=1 TO 2
0490 CLS
0495 GOTO 0572
0550 PRINT @ 35,"PRESSÃO"
0560 PRINT @ 45,"PROFUNDIDADE"
0570 PRINT @ 53,"OVALIZAÇÃO";
0572 PRINT @ 0,"TUBO ";T$(M):
0573 PRINT @ 64,"MEIO ";M$(N)
0580 PRINT @ 0128,"FATOR DE RIGIDEZ ";EI(M);"KGF/CM2"
0590 PRINT @ 0192,"DIÂMETRO ";D;"CM"
0600 PRINT @ 0256,"ESPESSURA ";ES;"CM"
0610 PRINT @ 0320,"SDR ";D/ES
0620 PRINT "PROFUNDIDADE MÁXIMA ";PC(M+2*(N-1));"METROS"
0622 GOTO 1055
0625 D1=0:OV=0:GOSUB 9000
0630 OV=0.03:D1=1:GOSUB 9000
0640 OV=0.05:D1=2:GOSUB 9000
0650 OV=0.08:D1=3:GOSUB 9000
0660 OV=0.10:D1=4:GOSUB 9000
0670 OV=0.15:D1=5:GOSUB 9000
0680 OV=0.20:D1=6:GOSUB 9000
1010 FOR X=64 TO 67
1020 FOR Y=4 TO 47
1030 SET(X,Y)
1040 NEXT Y
1050 NEXT X
1055 A$=INKEY$:IF A$=" " THEN 1055
1060 NEXT M:NEXT N
1065 A$=INKEY$:IF A$=" " THEN 1065
1070 GOTO 0200
9000 AUX=SQR(32*EI(M)*EL(N)/D^3)*((1-OV)/(1+OV)^2)^3)
9010 PR = 10.065*AUX
9020 PRINT @ D1*64+483,AUX; @ D1*64+493,PR; @ D1*64+0504,OV
9030 RETURN
```

- Chelepati, C.V, 1966 - "Critical Pressures for Radially Supported Cylinders", Naval Civil Engineering Laboratory, Tech. Note W-773, USA.
- Cheney, J.A, 1971 - "Buckling of Soil Surrounded Tubes", JAWWA Vol.56, No.4, pp.423-431, USA.
- Clinedienst, W.O, 1939 - "A Rational Expression for the Critical Collapsing Pressure of Pipe under External Pressure", A.P.I, Drilling & Production Practice, pp.839-891, USA.
- Compston, D.G, 1978 - "Design and Construction of Buried Thin Walled Pipes", CIRIA Report No.78, London, England.
- Ellinas, C.P. & Croll, J.G.A, 1982 - "Elastic-Plastic General-Buckling of Ring Stiffened Cylinders", Cambridge University Press, London, England.
- Ferreira, P, 1982 - "Critérios de Dimensionamento de Tubulações Flexíveis - Caso dos Conduitos de Adução", Tese, EPUSP, publicada na Revista DAE, pp.19-44, São Paulo, Brasil.
- Greenwood, M.E, 1979 - "Buried Fiberglass-Reinforced Plastic (FRP) Pipes", Owens-Corning, USA.
- Hardling, J, 1978 - "The Elasto-Plastic Analysis of Imperfect Cylinders", Proc.Instn.Civ.Engrs, London, England.
- Holmquist, J.L. & A.Nadai, 1939 - "A Theoretical and Experimental Approach to the Problem of Collapse of Deep-Well Casing", A.P.I. Drilling & Production Practice, pp.392-420, USA.
- Howard, A.K, 1968 - "Laboratory Load Tests on Buried Flexible Pipes", U.S.Bureau of Reclamation, Rep.EM-763, USA.
- Indreland, J.B, 1978 - "Failure and Aging of Water Well Casing and Screens by Compressive Rupture, Encrustation Corrosion", Roscoe Moss Company, USA.
- Johnson, R.C. & C.E.Kurt & G.F.Dunham, 1980 - "Well Grouting and Casing Temperature Increases", Ground Water Journal, N.W.W.A. Vol.18, No.1, pp.7-13, USA.
- Juvinal, R.C, 1967 - "Stress, Strain and Strength", McGraw-Hill Book Company, New York, USA.
- Kanninen, M.F. & C.H.Popelar, 1985 - "Advanced Fracture Mechanics", Oxford University Press, New York, USA.
- J.F.Nold & Company, 1980 - "The Nold Well Screen Book", Stokstadt Am Rhein, West Germany.
- N.W.W.A, 1980 - "Using Nonmetallic Casing for Geothermal ... Wells", Water Well Journal, April, pp.90-91, USA.
- N.W.W.A, 1981 - "Manual of Installation Practices for Thermoplastic Water Well Casings", USA.
- Popov, E.P, 1978 - "Introdução à Mecânica dos Sólidos", Editora Edgard Blücher Ltda, São Paulo, Brasil.
- Quелlette, H, 1978 - "The Design and Application of Large-Diameter Reinforced Plastic Mortar Well Casing", S.P.I. Proceedings, Section 11-B, pp.1-6, USA.



- Rhodes, J. & Spence, J, 1984 - "Behaviour of Thin-Walled Structures", Elsevier Publishers, London, England.
- Roscoe Moss Company, 1982 - "A Guide to Water Well Casing and Screen Selection", Los Angeles, California, USA.
- Sih, G.C. & D. Francois, 1983 - "Progress in Fracture Mechanics Pergamon Press, USA.
- Sih, G.C. & L. Faria Martinus, 1984 - "Fracture Mechanics Methodology", Nijhoff Publishers, The Netherlands.
- Silva, L.M, 1973 - "Contribuição ao Estudo de Filtros e Prê---  
-Filtros em Poços Tubulares", VII Congresso ABES, Salvador, Bahia, Brasil.
- Silva, L.M. & Carvalho Filho, A, 1977 - "Revestimento de Poços com Tubos e Filtros de Fiberglass", IX Congresso ABES, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.
- Silva, L.M, 1980 - "Pressão de Colapso em Revestimentos Plásticos de Poços Tubulares", Cia. Hansen Industrial, Joinville, Sta. Catarina, Brasil.
- Silva, L.M, 1980 - "Tuberías Plásticas en Pozos de Agua", O.S. E, Montevideo, Uruguay.
- Silva, L.M, 1981 - "Desenvolvimento de Poços com Revestimentos de PVC", Cia. Hansen Industrial, Joinville, Sta. Catarina, Brasil.
- Silva, L.M, 1981 - "Considerações sobre os Revestimentos Plásticos para Poços Tubulares", Cia. Hansen Industrial, Joinville, Sta. Catarina, Brasil.
- Silva, L.M, 1981 - "Comportamento Mecânico de Revestimentos Plásticos de Poços Tubulares", Centro de Engenheiros e Arquitetos, Joinville, Sta. Catarina, Brasil.
- Silva, L.M, 1981 - "Tabelas e Abacos para a Determinação de Pressões de Colapso e Profundidades Máximas de Instalação de Revestimentos Plásticos em Poços: Tubos de PVC, ABS, FRP e FRM inédito.
- Silva, L.M, 1982 - "Tubos Plásticos no Revestimento de Poços", Revista A Construção Pesada, Julho 1982, São Paulo, Brasil.
- Silva, L.M, 1982 - "Análise Técnico-Econômica do Abastecimento de Água Potável", Univ. Fed. Sta. Catarina, Florianópolis, Brasil.
- Silva, L.M, 1982 - "Avaliação da Performance do Revestimento de Poços Através da Análise da Emissão de Som", XVIII Congresso AIDIS, Panamá.
- Silva, L.M, 1983 - "Construção de Poços Tubulares com Revestimentos Plásticos", III Simpósio Internacional de Hidrogeologia, Madrid, Espanha.
- Silva, L.M, 1986 - "Subsídios ao Estudo do Comportamento Estrutural dos Revestimentos Plásticos de Poços Tubulares, Congresso ABES, São Paulo, Brasil.
- Smith, R.C, 1963 - "Relation of Screen Design to Mechanically Efficient Wells", JAWWA, Vol. 55, pp. 609-614, USA.

- Spangler, M.G. & H. Weidner, 1980 - "Predicting the Ageing Behaviour of Plastics - Evaluating the Ageing Conditions", Kunststoffe 70 (1980)11, pp.16-19, Germany.
- Ugural, A.C. & S.K. Feuster, 1987 - "Advanced Strength and Applied Elasticity", Elsevier Publishing Co. Inc, New York, USA
- Vargas, M, 1977 - "Introdução à Mecânica dos Solos", EDUSP, São Paulo, Brasil.
- Watkins, R.K, 1967 - "The Development of Structural Design Concepts for Buried Pipes Externally Loaded", Utah State University, Logan, USA.
- Weingarten, V.J, 1962 - "The Buckling of Cylindrical Shells Under Longitudinal Varying Loads", Journal of Applied Mechanics, ASME, Vol.29, pp.81-85, USA.
- Williams, W.W. & D.H. Dao, 1976 - "The Analysis and Design of Flexible Well Casing", ASTM-F.17, Section Meeting, USA.
- Windenburg, D.G. & C. Trilling, 1934 - "Collapse by Instability of Thin Cylindrical Shells Under External Pressure", Transaction, ASME, Vol.56, pp.819-85, USA.

## 7 - A N E X O S

- 7.1 - Tipos de esforços atuantes nos revestimentos (lisos e costurados).
- 7.2 - Tipos de "falhas" no encascalhamento de poços e sua evolução.
- 7.3 - Variação do módulo de elasticidade dos tubos de PVC rígido, com a temperatura.
- 7.4 - Evolução da temperatura das cimentações de poços.
- 7.5 - Evolução do fenômeno exotérmico na cimentação dos poços.
- 7.6 - Processo evolutivo do fenômeno de colapso em revestimentos de poços (tubos flexíveis).
- 7.7 - Gráfico comparativo  $p_c \times E$ , para os vários tubos plásticos utilizados no revestimento de poços.
- 7.8 - Fotografias referentes a construção de poços tubulares com revestimentos flexíveis (Brasil e Exterior).



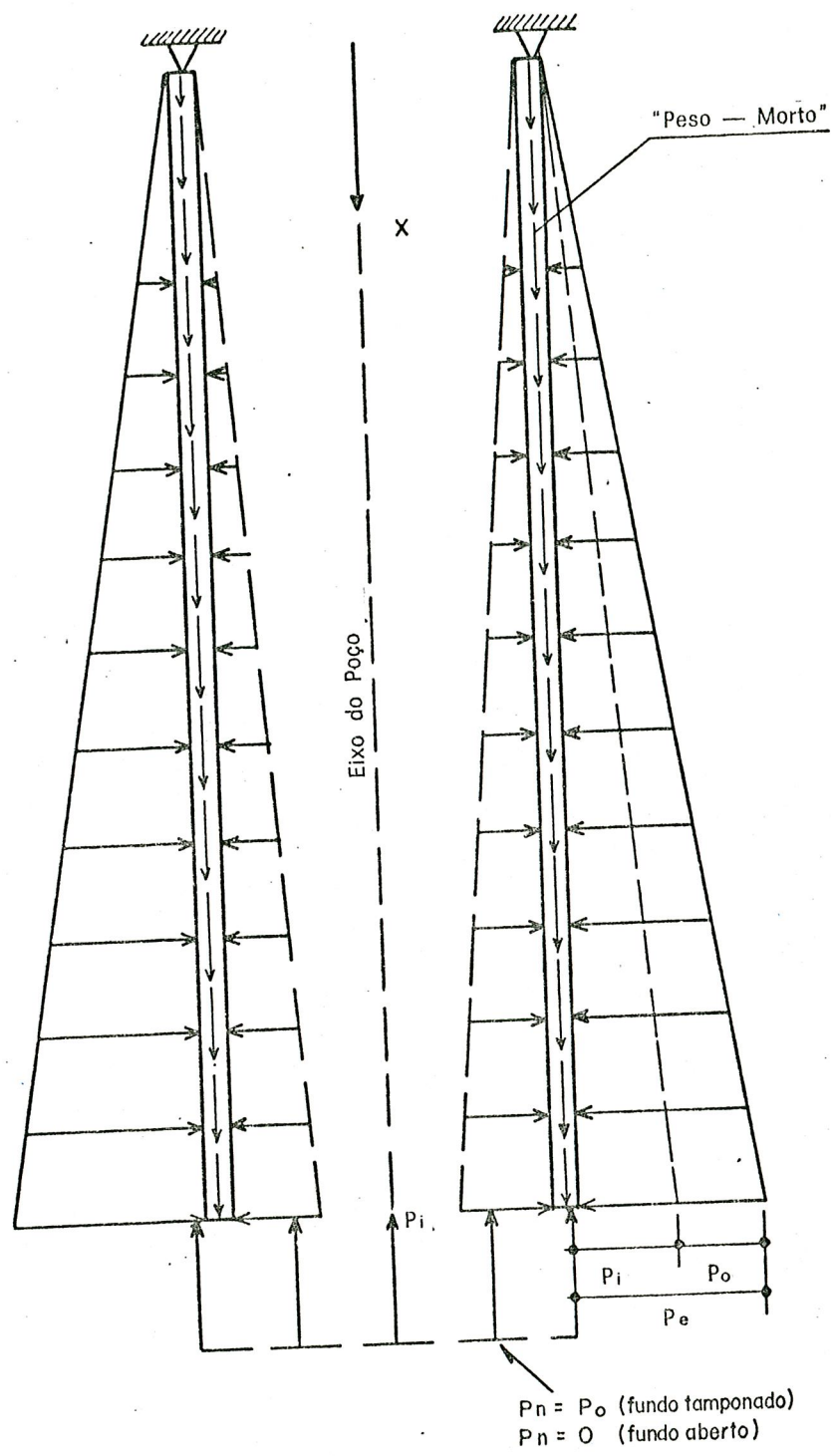


FIG. 1 - CONDIÇÕES DE CARREGAMENTO OBSERVADAS NOS REVESTIMENTOS DE POÇOS CUJA PERFURAÇÃO NÃO ATINGIU O EMBASAMENTO LOCAL (TUBULAÇÃO NÃO APOIADA), PERFURADO COM LAMA ESPÉSSA.

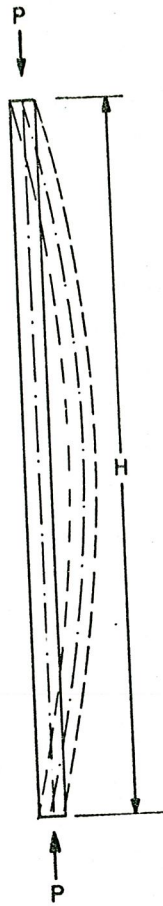


FIG. 2 - DEFORMAÇÃO CAUSADA PELO ARQUEAMENTO DA TUBULAÇÃO



FIG. 5 - ABAULAMENTO DE FILTROS COM RANHURAS LONGITUDINAIS (NOLD)

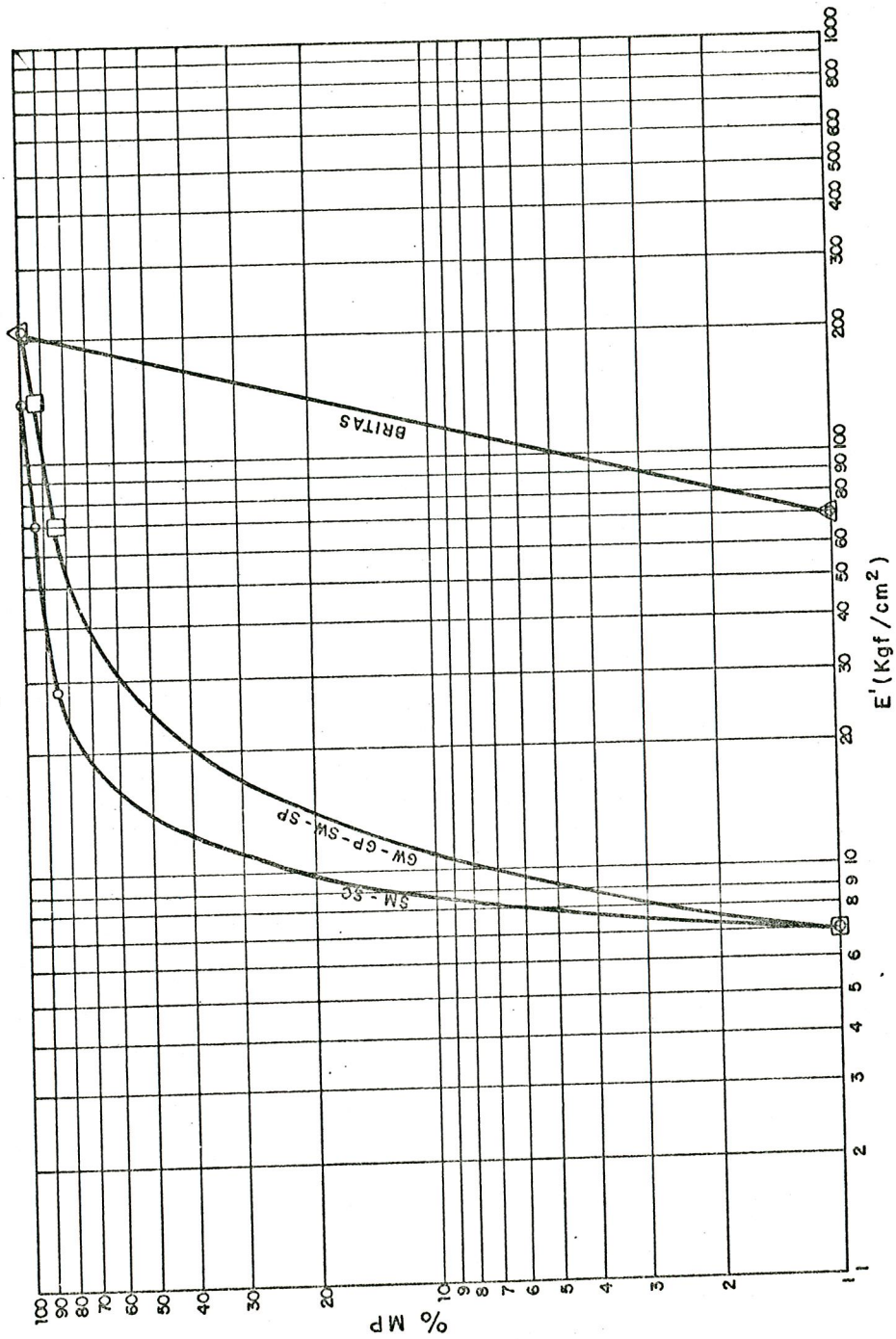
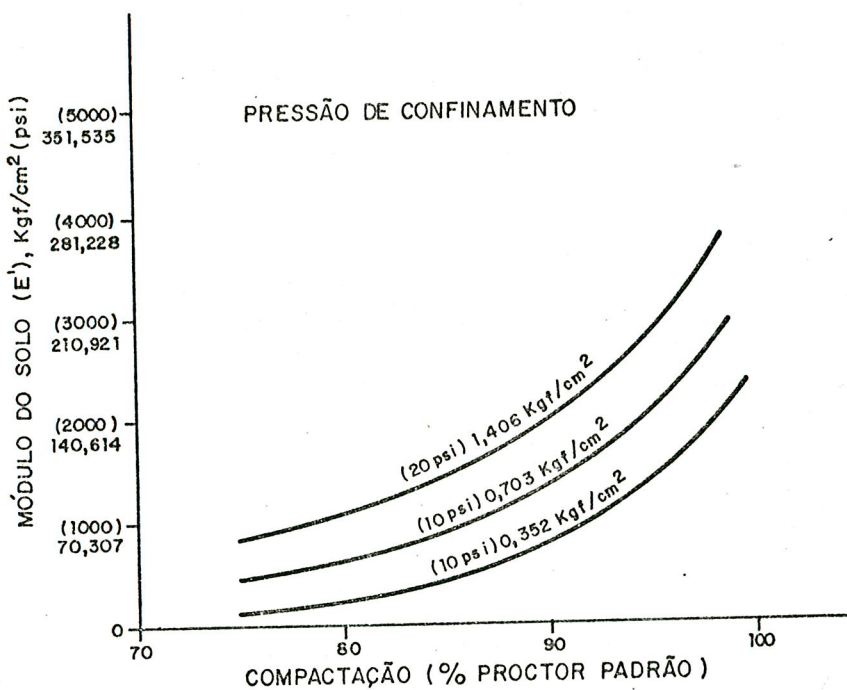
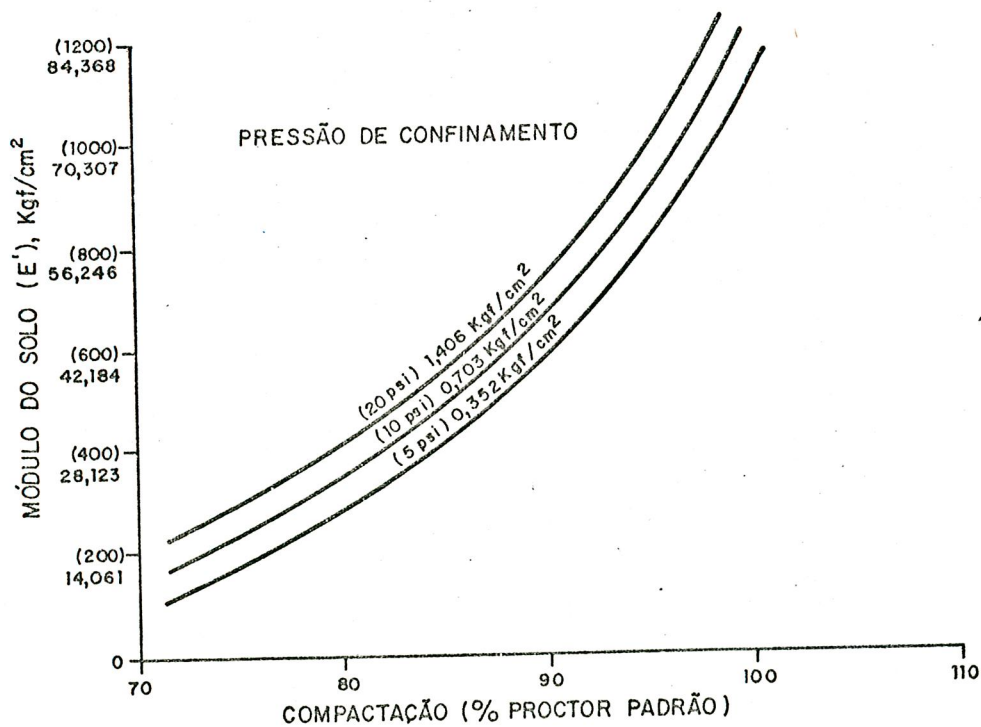
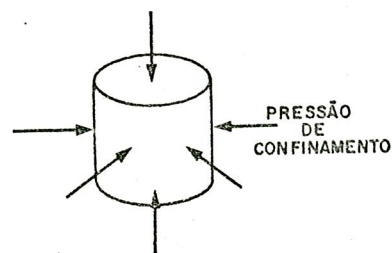


FIG. 3 - MÓDULO DE SPANGLER EM FUNÇÃO DO GRAU DE COMPACTAÇÃO

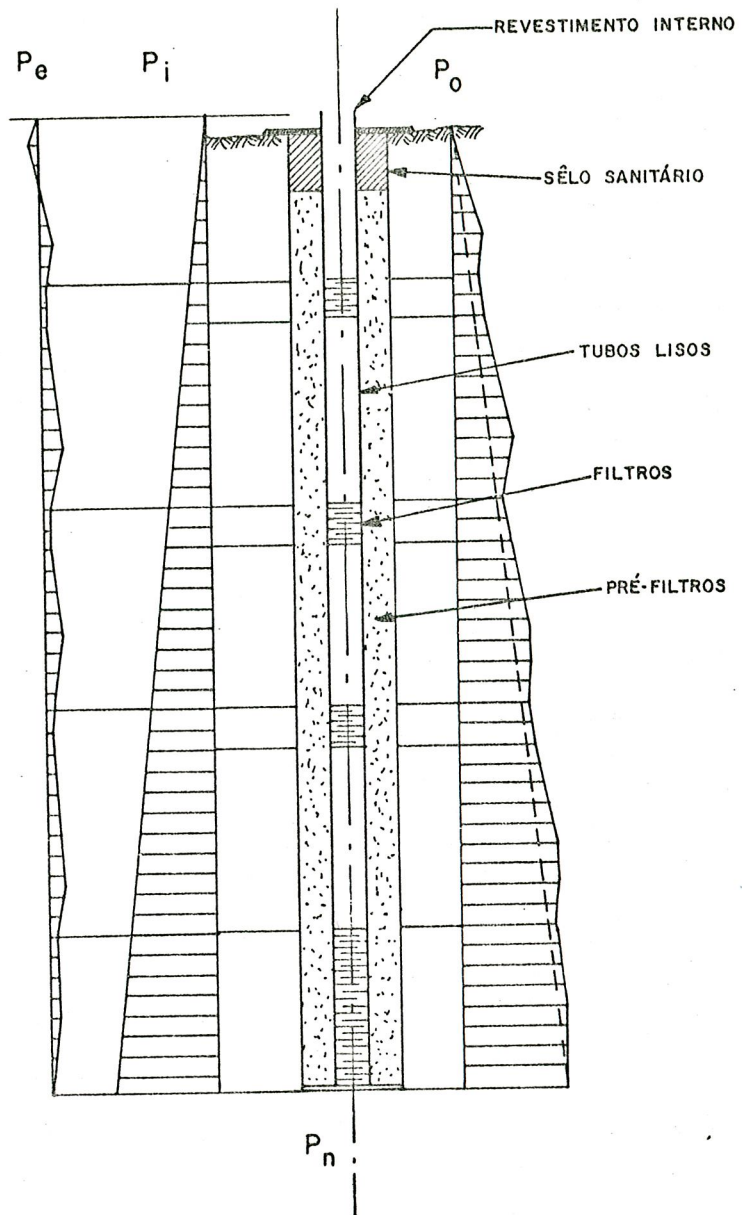


A - AREIAS



B - ARGILAS

FIG. 4 - EVOLUÇÃO DO MÓDULO DE SPANGLER EM FUNÇÃO DA COMPACTAÇÃO, EM MEIOS CONFINADOS (seg. GREENWOOD, 1979)



ONDE :  $P_e$  = PRESSÃO EXTERNA RESULTANTE  
 $P_i$  = PRESSÃO INTERNA  
 $P_o$  = PRESSÃO EXTERNA (Colapso)  
 $P_n$  = PRESSÃO AXIAL ( Fundo )

FIG. 6 - CONDIÇÕES DE CARREGAMENTO EXTERNO NUM POÇO TUBULAR, PERFURADO COM LAMA ESPÉSSA

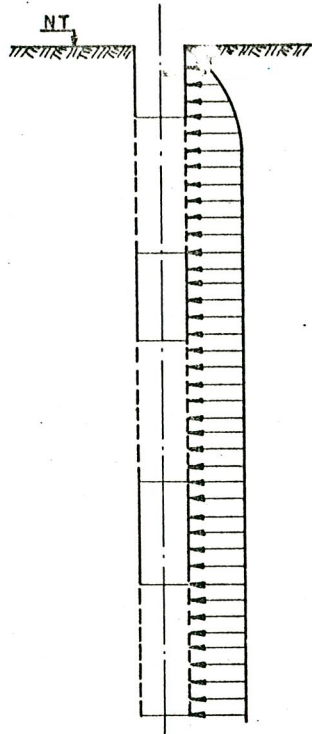


FIG. 7 - AUMENTO DA PRESSÃO DO MEIO GEOLÓGICO NUMA PER FURAÇÃO, SEGUNDO A "TEORIA DO SILO"

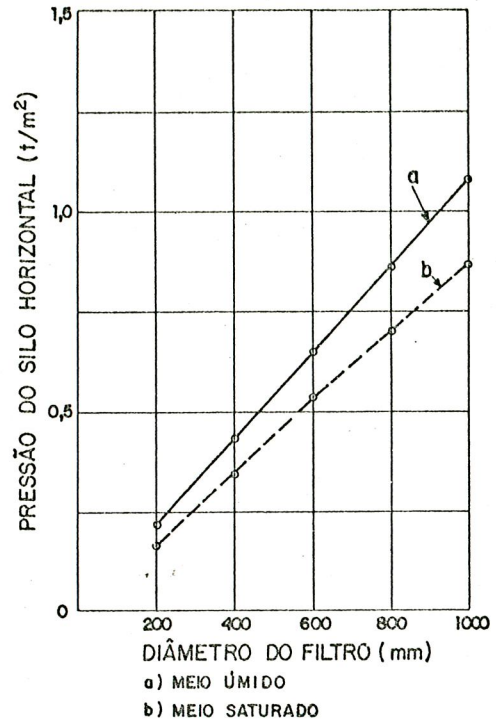


FIG. 8 - PRESSÃO DO MEIO GEOLÓGICO, CALCULADA DE ACÔRDO COM A "TEORIA DO SILO"

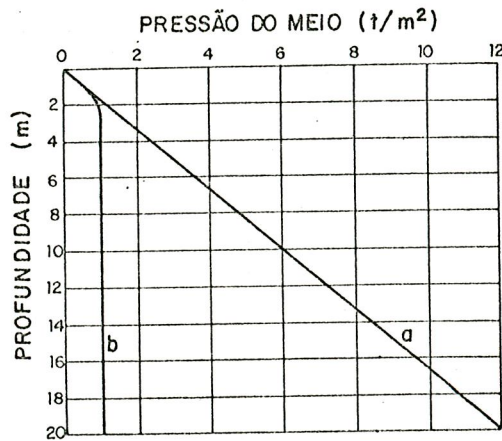


FIG. 9 - EXEMPLO DE CÁLCULO DA PRESSÃO DO MEIO, CALCULADA COM (a) TEORIA USUAL E (b) TEORIA DO SILO



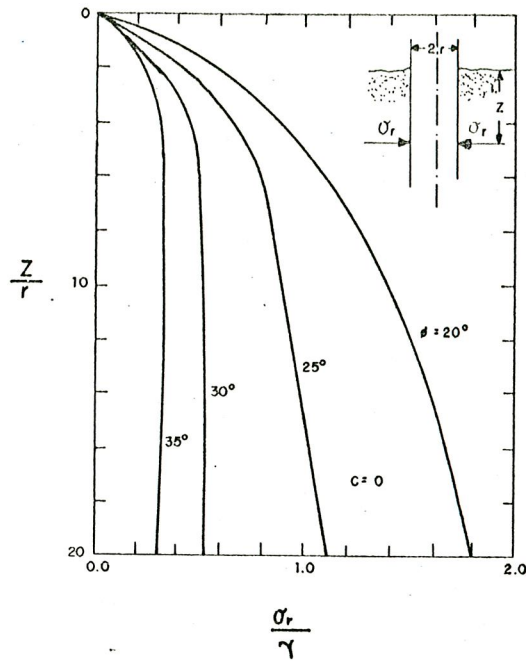


FIG. 10 - MATERIAIS DE REATERRO NÃO-COESIVOS

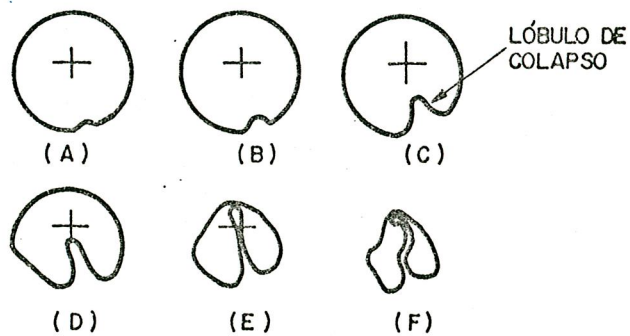


FIG. 11 - EVOLUÇÃO DO PROCESSO DE COLAPSO ESTRUTURAL NOS TUBOS FLEXÍVEIS DE PAREDES FINAS, ENTERRADOS E SUBMETIDOS A CARREGAMENTO COMPRESSIVO RADIAL

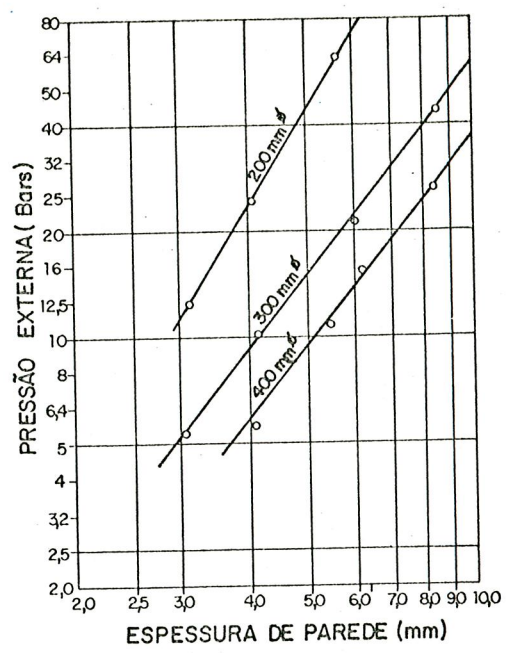


FIG. 15 - PRESSÃO EXTERNA CRÍTICA x ESPESSURA DE PAREDE DAS TUBULAÇÕES DE REVESTIMENTO DOS POÇOS

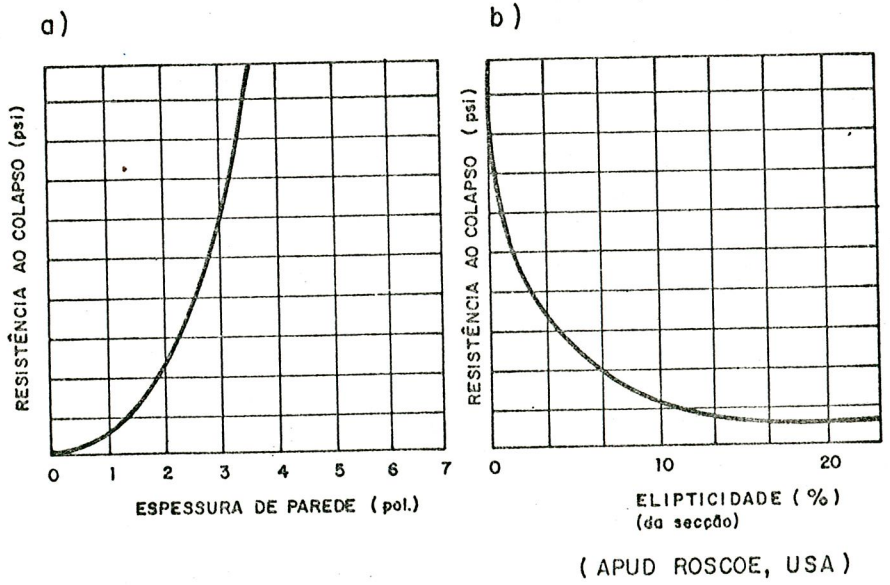


FIG. 16 - GRÁFICOS DA EVOLUÇÃO DA RESISTÊNCIA AO COLAPSO DOS REVESTIMENTOS DE AÇO (P<sub>o</sub>), EM FUNÇÃO DA ESPESSURA DE PAREDE (e).

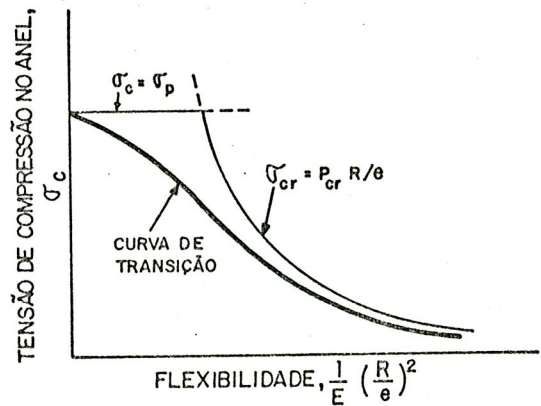


FIG. 12 - CURVA DE AMOLGAMENTO PARA CILINDROS SUJEITOS A COMPRESSÃO RADIAL

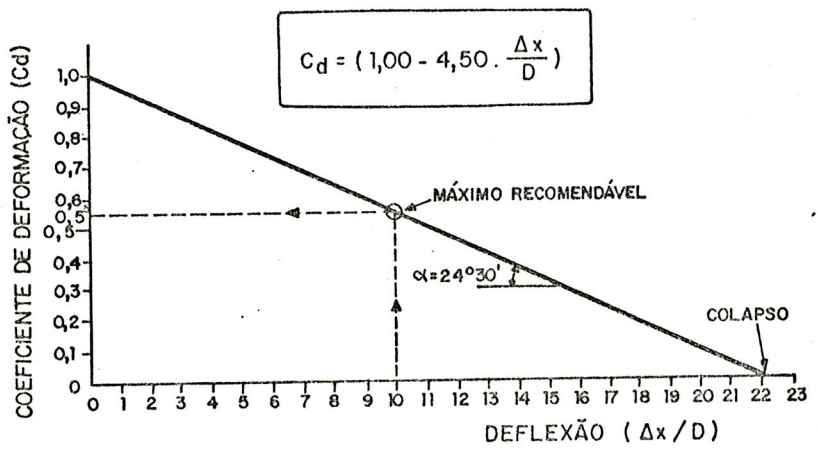


FIG. 13 - VARIAÇÃO DO COEFICIENTE DE DEFORMAÇÃO, EM FUNÇÃO DA OVALIZAÇÃO DA SECÇÃO CIRCULAR DOS REVESTIMENTOS FLEXÍVEIS

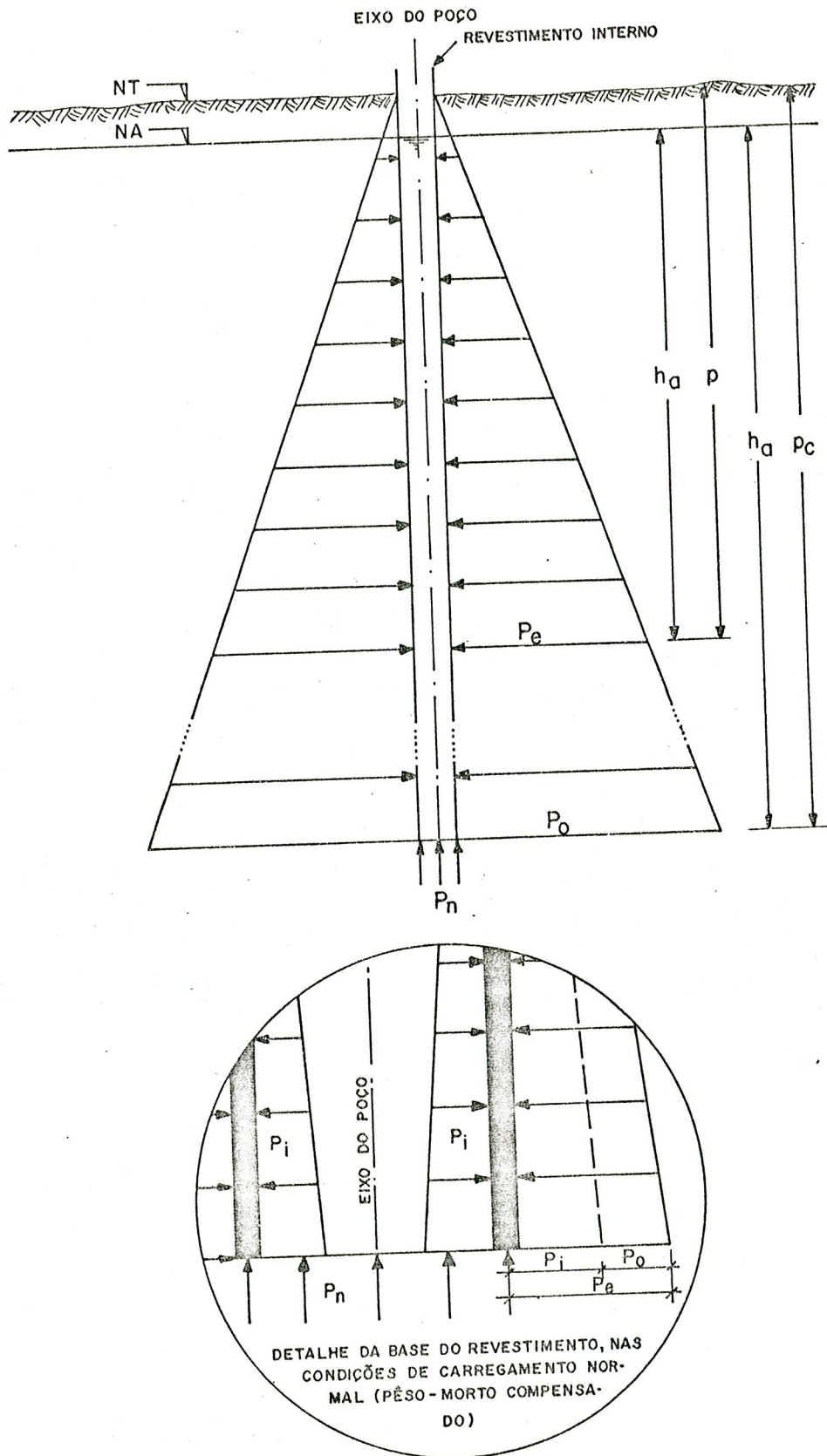


FIG. 14 - CONDIÇÕES DE CARREGAMENTO NOS REVESTIMENTOS INSTALADOS NAS PERFURAÇÕES

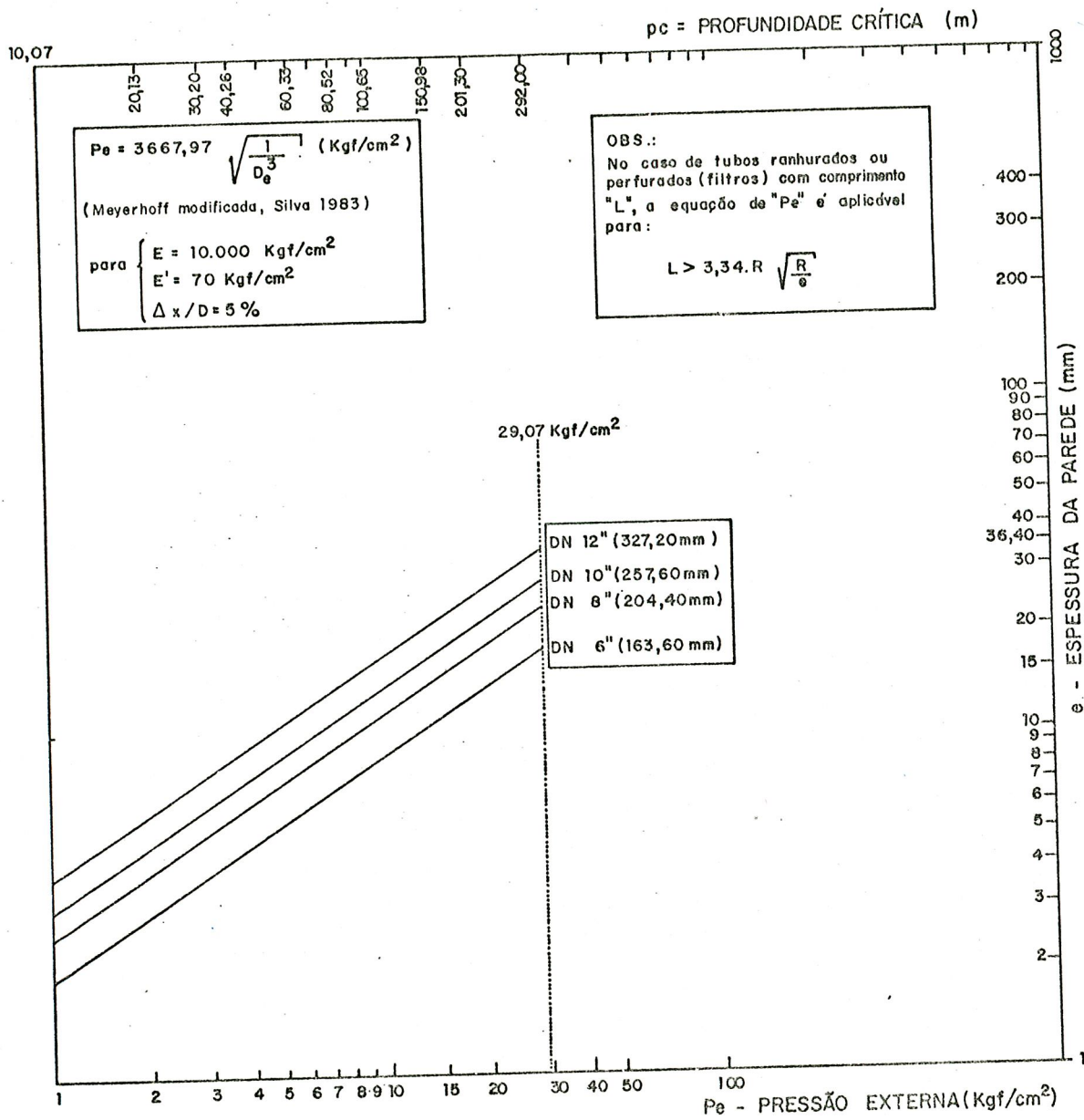


FIG. 17 - COMPORTAMENTO GEOMECÂNICO DOS TUBOS DE PP NACIONAIS, CLASSE PN - 10

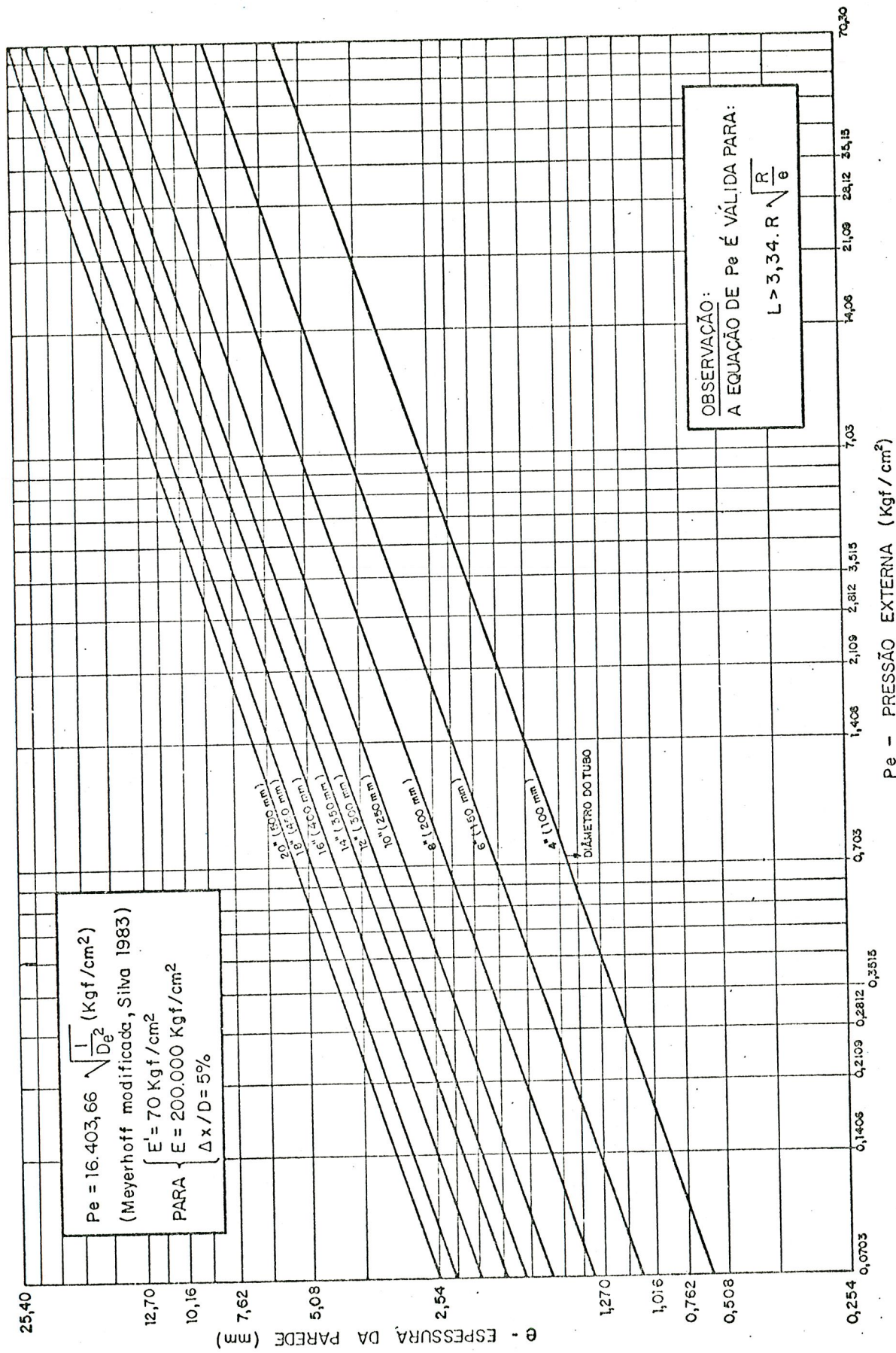
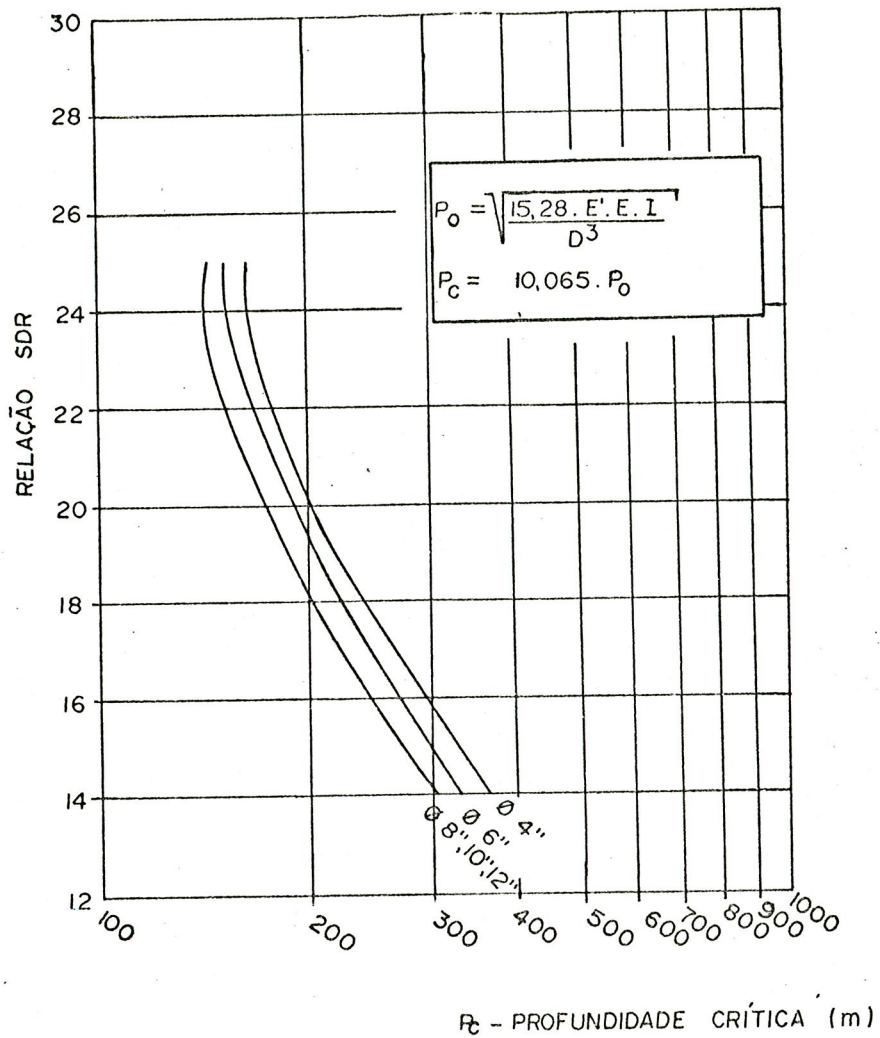


FIG. 18 - GRÁFICO PRESSÃO EXTERNA x ESPESSURA MÍNIMA DE PAREDE - TUBOS DE FRP/FRM



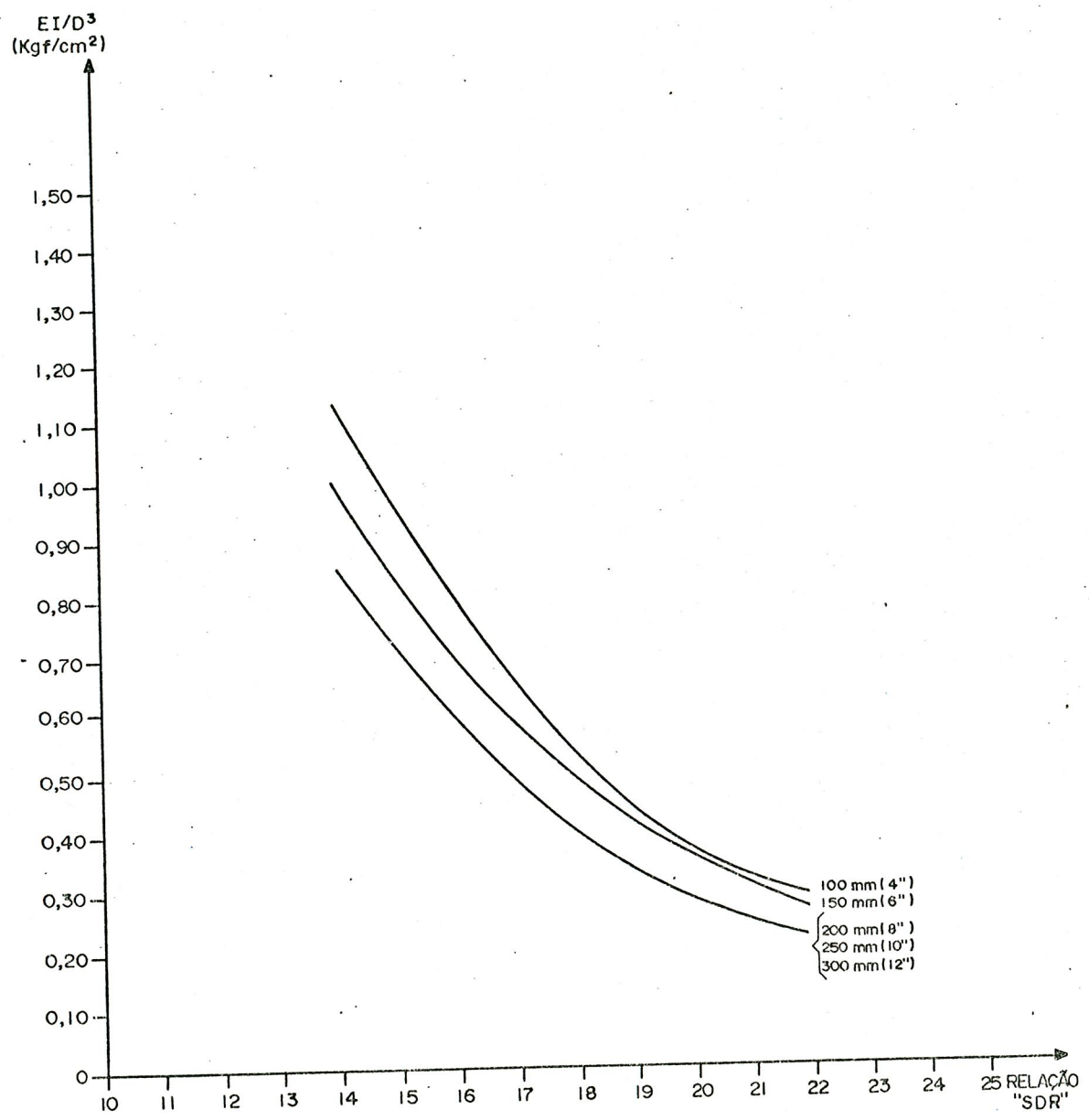
OBS

$$\Delta x/D = 0,030 = 3\%$$

$$E = 28,000 \text{ kgf/cm}^2$$

$$E' = 70 \text{ kgf/cm}^2$$

FIG. 19 - TUBOS DE PVC RÍGIDO PARA POÇOS



OBS.: "SDR" =  $\frac{\text{diâmetro externo do tubo}}{\text{espessura da parede}}$

FIG. 20 - REVESTIMENTO DE POÇOS COM TUBOS DE PVC RÍGIDO, ESPECIFICAÇÃO BRASILEIRA ABNT - EB. 183



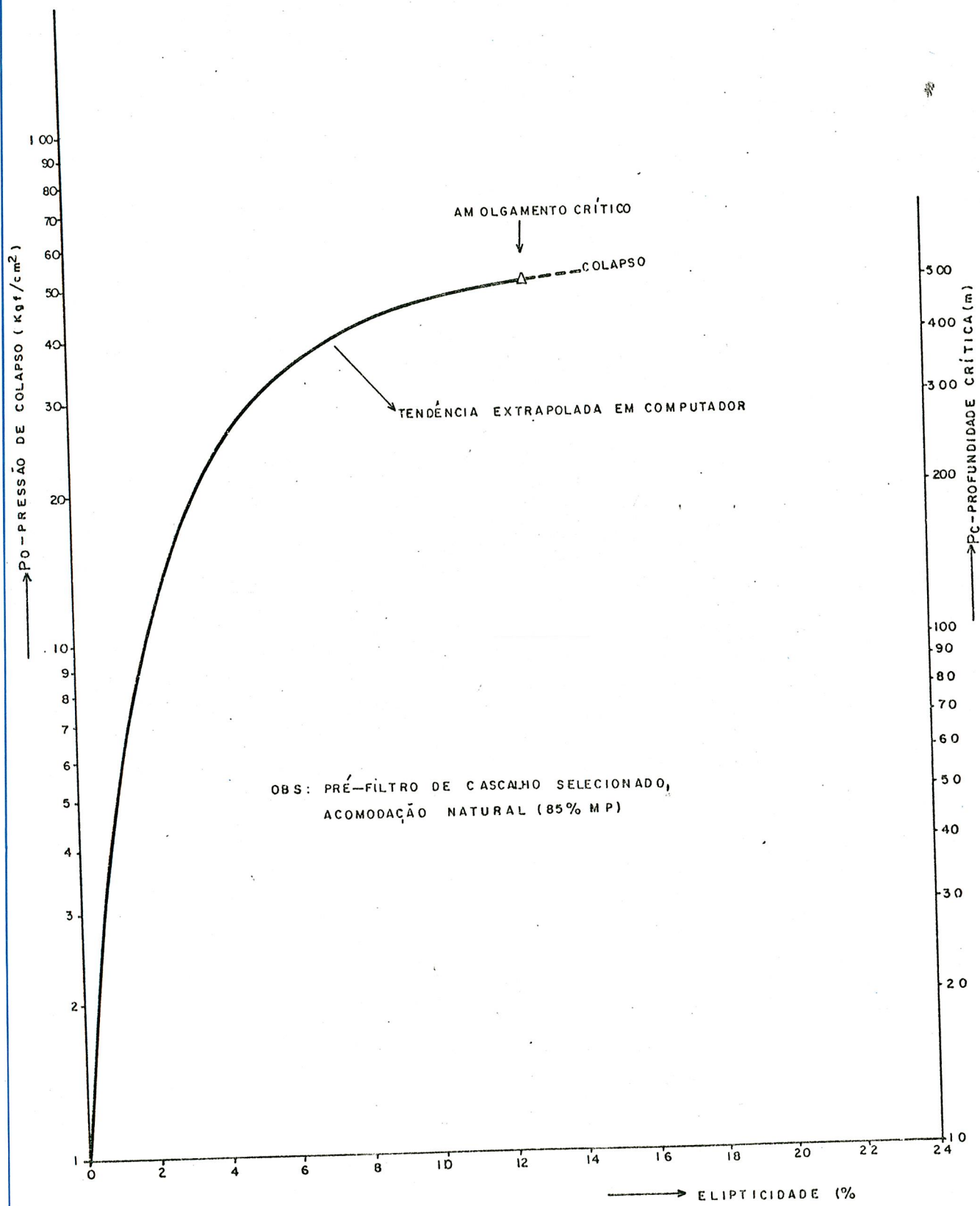
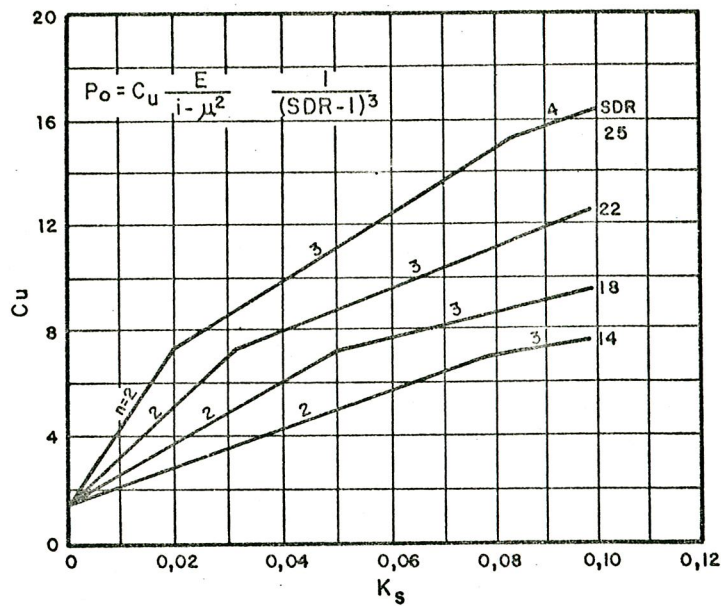
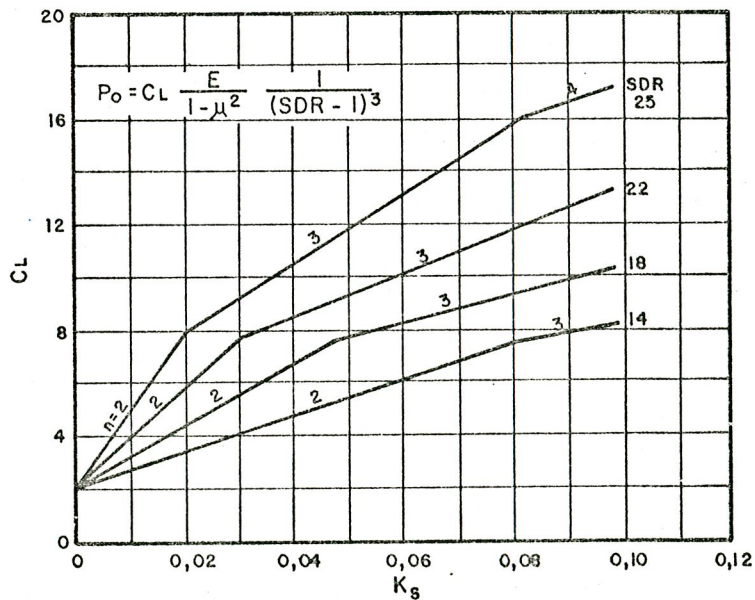


FIG. 21 - OVALIZAÇÃO DE TUBOS DE PVC RÍGIDO (ABNT EB-183, CLASSE 20) DIÂMETRO 200 mm (8") UTILIZADOS COMO REVESTIMENTOS EM POÇOS



(A) PRESSÃO DE COLAPSO UNIFORME



(B) PRESSÃO DE COLAPSO COM VARIAÇÃO LINEAR

FIG. 22 - COEFICIENTES DE DEFORMAÇÃO PARA TUBULAÇÕES PLÁSTICAS (SEM SUPORTE LATERAL)

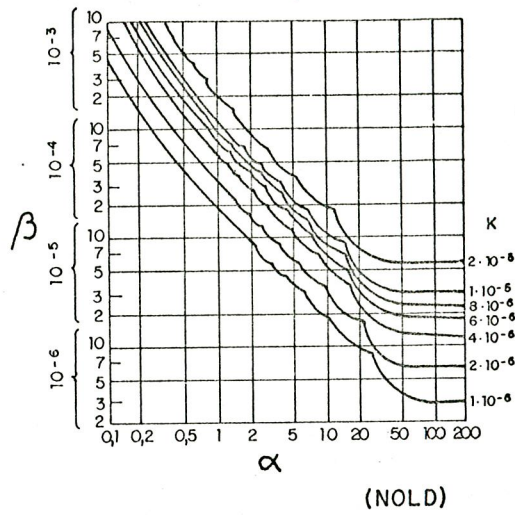


FIG. 23 - RESISTÊNCIA AO AMASSAMENTO DEVIDO A PRESSÃO LATERAL

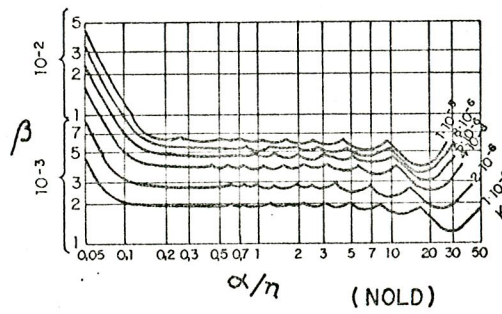
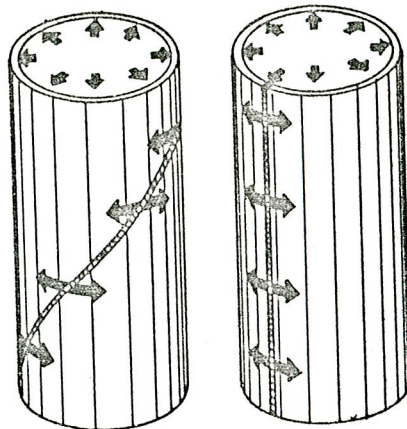


FIG. 24 - RESISTÊNCIA AO AMASSAMENTO DEVIDO A PRESSÃO LONGITUDINAL

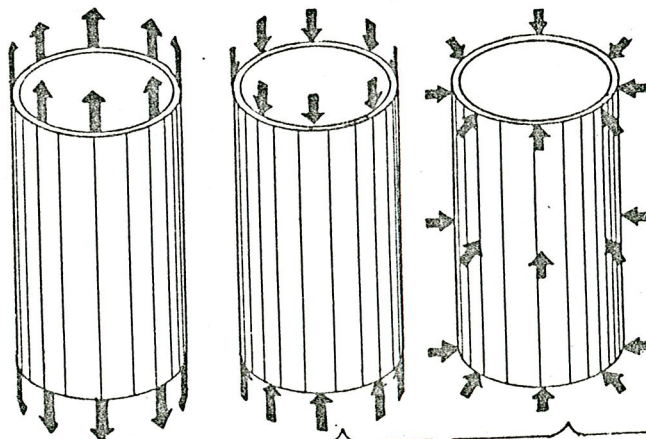
# ANEXO 1

TIPOS DE TUBOS UTILIZADOS NO REVESTIMENTO DE POÇOS PROFUNDOS E AS FORÇAS NÊLES ATUANTES



(HELICOIDAL) (LONGITUDINAL)

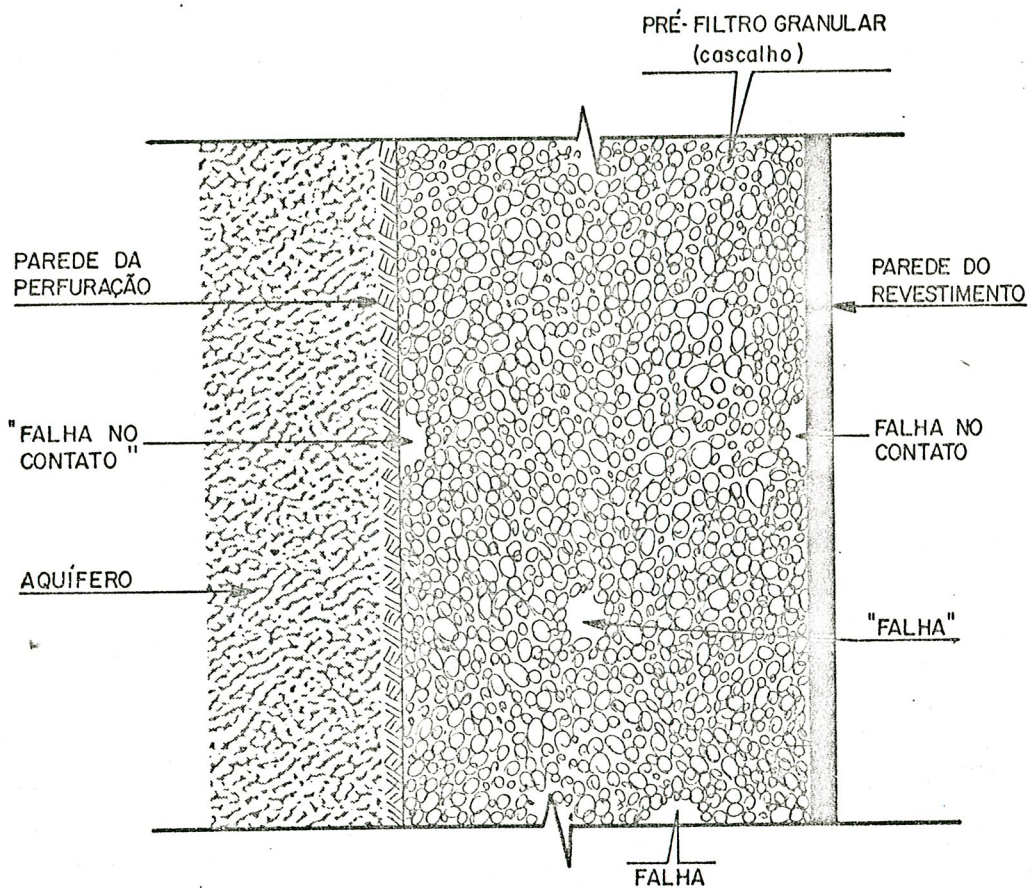
a) Tubos com costura (chapa)



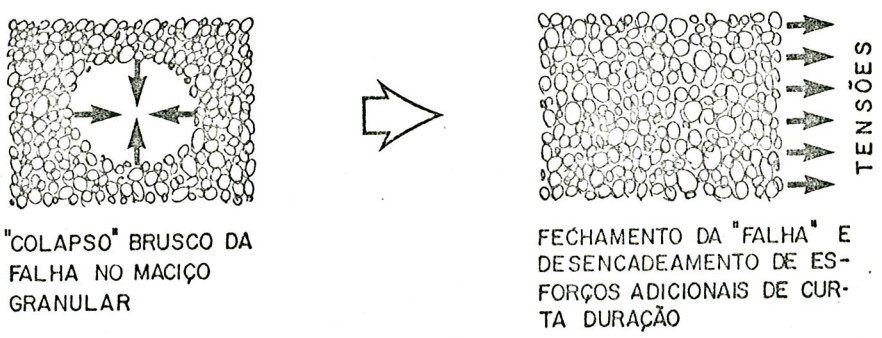
(FORÇAS DE TRAÇÃO) (FORÇAS DE COMPR.) (FORÇAS DE COLAPSO)

b) Tubos lisos (tubos sem costura)

## ANEXO 2



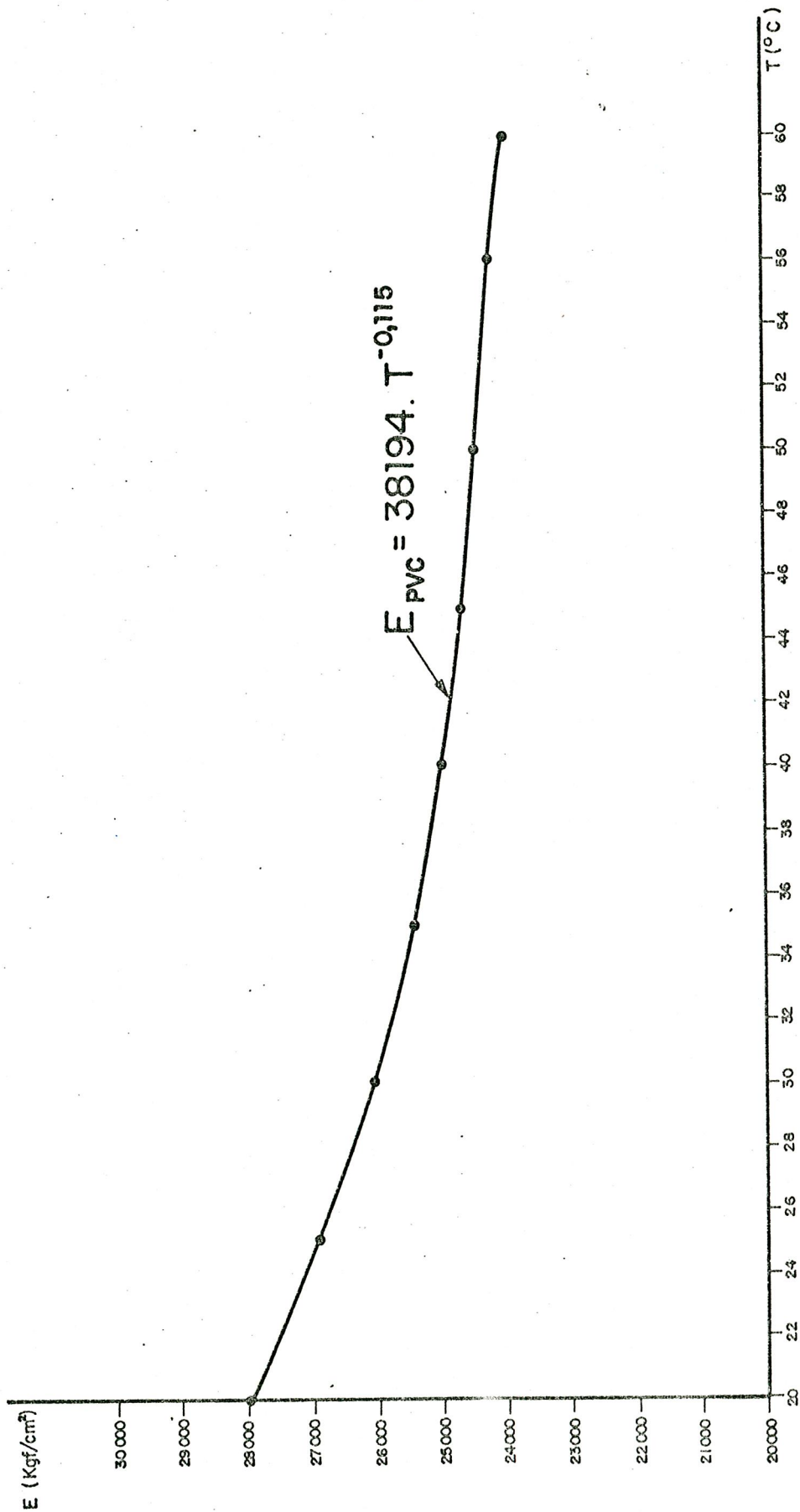
a) TIPOS DE "FALHAS" DO ENCASCALHAMENTO



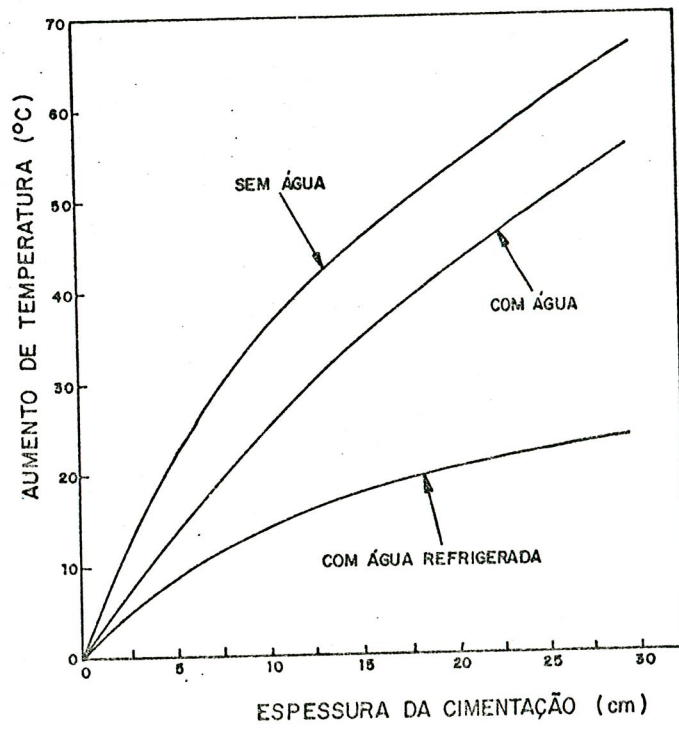
b) EVOLUÇÃO DAS "FALHAS" FORMADAS PELO ACUNHAMENTO EM ABÓBODA DAS PARTÍCULAS GRANULARES DO PRÉ-FILTRO ANULAR.

# ANEXO 3

VARIAÇÃO DO MÓDULO DE ELASTICIDADE DOS TUBOS DE PVC RÍGIDO COM A TEMPERATURA

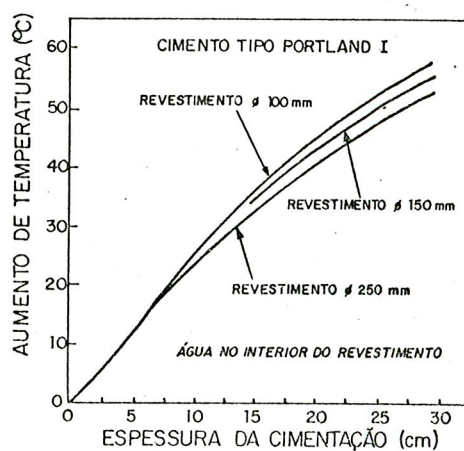


# ANEXO 4

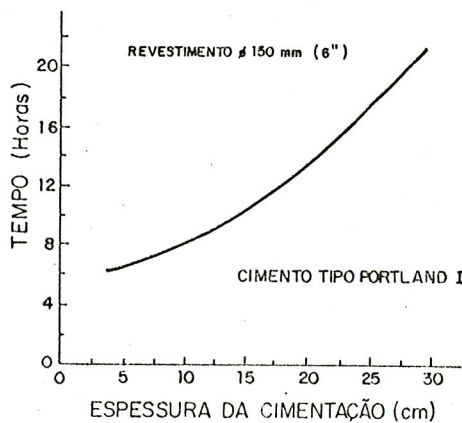


# ANEXO 5

## EVOLUÇÃO DO FENÔMENO EXOTÉRMICO NA CIMENTAÇÃO DE POÇOS



a) EVOLUÇÃO DO PICO DE TEMPERATURA DO REVESTIMENTO

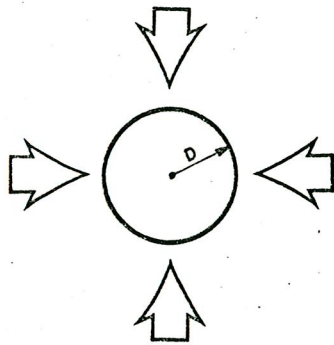


b) TEMPO PARA ATINGIR O PICO DE TEMPERATURA

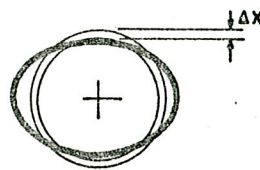


## ANEXO 6

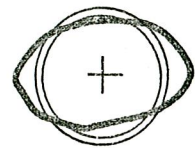
### PROCESSO EVOLUTIVO DO FENÔMENO DE COLAPSO EM REVESTIMENTOS DE POÇOS (TUBOS FLEXÍVEIS)



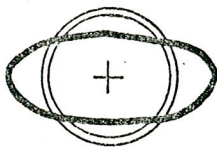
a) CARREGAMENTO RADIAL



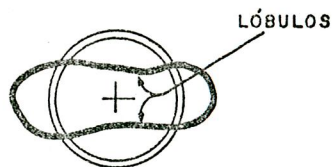
b) INÍCIO DA OVALIZAÇÃO



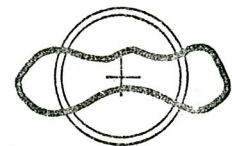
c) OVALIZAÇÃO CRESCENTE



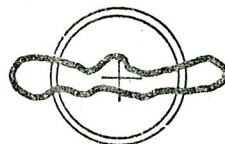
d) OVALIZAÇÃO ALÉM DO ACEITÁVEL (3 a 8%)



e) INÍCIO DO PROCESSO DE COLAPSO (desenvolvimento de lóbulos)



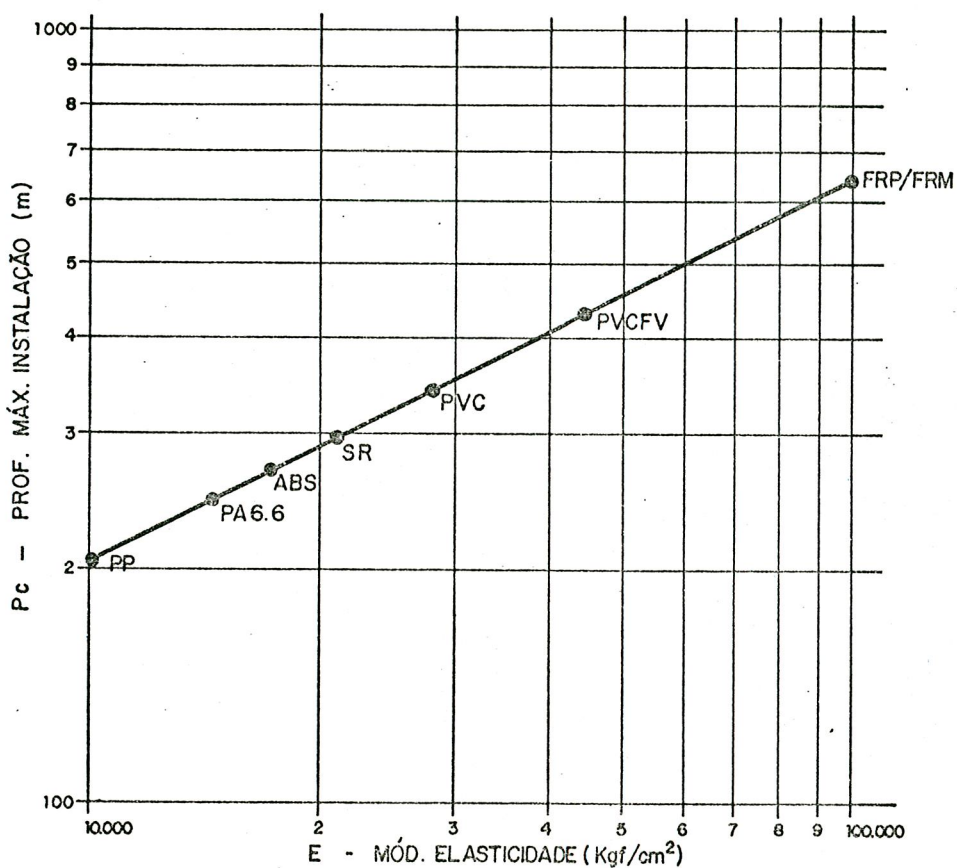
f) EVOLUÇÃO ACENTUADA DOS LÓBULOS DE COLAPSO



g) COLAPSO DA TUBULAÇÃO (irreversível)

# ANEXO 7

GRÁFICO COMPARATIVO PARA OS VÁRIOS TUBOS PLÁSTICOS UTILIZADOS NO REVESTIMENTO DE POÇOS



OBS.: D = 200 mm (8")  
 SRD = 14,00  
 $\Delta x/D = 5\% = 0,050$   
 $E' = 70,00 \text{ Kgf/cm}^2$