

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO

Dissertação Apresentada à
Faculdade de Engenharia Mecânica
Como Requisito Parcial à Obtenção do
Título de Mestre em Engenharia de Petróleo

DIMENSIONAMENTO DE REVESTIMENTOS PARA POÇOS PROFUNDOS,
POÇOS DIRECIONAIS E HORIZONTAIS DE LONGO AFASTAMENTO HORIZONTAL
PELO MÉTODO DO MÍNIMO CUSTO GLOBAL

Este exemplar corresponde a redação final da tese defendida
pelo Eng. José Luiz Roque e aprovada pela Comissão Julgadora
em 11/12/92.

Eric E. Maidla
Dr. Eric E. Maidla

Autor: José Luiz Roque 685

Orientador: Eric Edgar Maidla

51/92

Dezembro de 1992

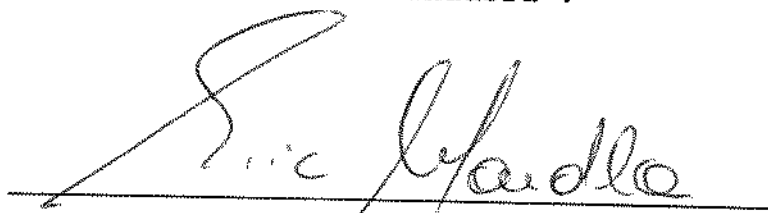
UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL

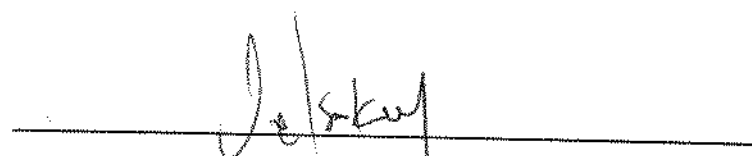
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO

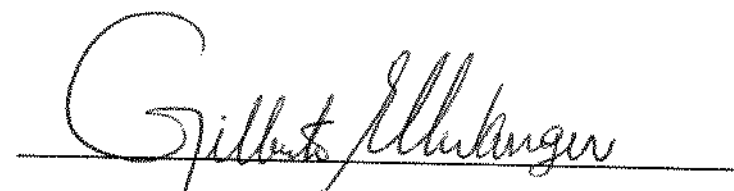
A dissertação "Dimensionamento de Revestimentos para Poços Profundos, Poços Direcionais e Horizontais de Longo Afastamento Horizontal pelo Método do Mínimo Custo Global", elaborada por José Luiz Roque e aprovada por todos os membros da Banca Examinadora foi aceita pela Sub-Comissão de Pós-Graduação em Engenharia de Petróleo como requisito parcial à obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Petróleo.

Campinas, 1 de Dezembro de 1992.

Banca Examinadora :


Eric Edgar Maidla, Ph.D.


Celso Kazuyuki Morooka, Ph.D.


Gilberto Bruno Ellwanger, Ph.D.

Dedico este trabalho à minha
esposa Cristina, meus filhos
Marcelo e Emersom e a meus pais
Elza e

Oscarindo (in memoriam)

AGRADECIMENTOS

À PETROBRÁS, pela preciosa oportunidade de cursar o Mestrado em Engenharia de Petróleo na UNICAMP.

Ao Prof. Dr. Eric Edgar Maidla, pela dedicação e orientação no desenvolvimento desta tese.

Aos professores, funcionários e colegas da UNICAMP, pela amizade e atenção dispensadas.

SUMÁRIO

Página	
RESUMO	vii
Capítulo	
I. INTRODUÇÃO	1
II. DIMENSIONAMENTO DE COLUNAS DE REVESTIMENTO	4
Considerações gerais	4
III. CÁLCULO DA RESISTÊNCIA AO COLAPSO	14
Critério API	14
Critério API modificado	21
IV. CÁLCULO DA RESISTÊNCIA À PRESSÃO INTERNA	25
Critério API	25
Critério API com correção da resistência à pressão interna	27
Tubos com conexão Short Thread, Long Thread e Buttress	28
V. DIMENSIONAMENTO DE COLUNAS EM POÇOS DIRECIONAIS	33
VI. MÉTODOS DE SELEÇÃO DE REVESTIMENTO	47
Método do mínimo peso	50
Método do mínimo custo	53
Método do mínimo custo global	54

VII. DESCRIÇÃO DO MÓDULO DE GERENCIAMENTO E OTIMIZAÇÃO	57
VIII. RESULTADOS DE DIMENSIONAMENTO	61
IX. CONCLUSÕES	97
NOMENCLATURA	100
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	104

RESUMO

O objetivo principal deste trabalho consiste em apresentar algumas propostas para a otimização do dimensionamento da coluna de revestimentos. Assim são apresentadas 4 sugestões que podem ser incorporadas a programas de dimensionamento já existentes.

Formula-se um procedimento de cálculo da resistência ao colapso de " tubos não API ", que apresentam resistência ao colapso superior aos seus equivalentes API, na mesma linha do procedimento estabelecido pela norma API BUL 5C3 (¹) para os tubos API.

Discute-se também a correção da resistência à pressão interna de tubos com conexão buttress, long thread e short thread, conexões essas que não conseguem impedir totalmente o vazamento de gás. Neste item também seguimos a orientação estabelecida pela norma API BUL 5C3 para calcular os limites máximos de correção da resistência à pressão interna dos tubos, no caso iguais à pressão de vazamento na conexão, como definida pela norma.

Outro ponto discutido neste trabalho é a determinação da força axial atuante na coluna de revestimento em poços direcionais. Compara-se os resultados obtidos para essas forças, determinados pelo critério "verticalização da profundidade medida" ⁽¹⁵⁾ e pelo critério da "simulação da retirada da coluna" ⁽¹⁶⁾.

Apresenta-se também um método de seleção de tubos para a montagem da coluna de revestimento, baseado no método do mínimo custo global, proposto por Wojtanowicz e Maidla ⁽¹⁸⁾. Este método está elaborado de tal forma que nos fornece sob quaisquer circunstâncias, a coluna de revestimento de menor custo possível que pode ser utilizada no poço.

Foi utilizado um programa comercial ⁽²⁰⁾ de cálculo de esforços em colunas de revestimentos para testar o método de seleção de tubos e otimização do dimensionamento.

As sugestões apresentadas neste trabalho foram implementadas em um programa para computadores compatíveis com o IBM PC. A linguagem de programação utilizada é o Turbo Pascal 6.0 da Borland Internacional.

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A atividade petrolífera vive nos dias de hoje uma grande reformulação estrutural motivada pela conjuntura econômica mundial e pela consciência de preservação da natureza que cada vez mais toma conta das pessoas.

A busca do crescimento econômico que exige um aumento no consumo de energia agora passa a considerar com muita seriedade os resultados dos danos que possam ser causados ao meio ambiente. Os cuidados que devem ser tomados face às exigências ambientais elevam o custo dessa atividade. Com isto é muito importante que se procure otimizar o uso de materiais e processos visando a redução de seus custos.

Sabemos que o custo da coluna de revestimento pode representar de 18 a 30% do valor de um poço de petróleo. Portanto este é um dos itens que deve ser estudado, pois a pesquisa e desenvolvimento de novos materiais que reduzem o preço dos tubos e a adoção de novas considerações de dimensionamento nos possibilitam reduzir o seu valor final.

Neste trabalho são formuladas algumas sugestões que tem por objetivo a otimização do dimensionamento e seleção de colunas de revestimento.

O emprego de " tubos não API " na coluna, com a garantia de se usar o máximo de sua melhor resistência à pressão de colapso em relação aos tubos API, é discutido no capítulo III. A correção da resistência ao colapso desses tubos, quando sujeitos à esforços axiais é feita até agora com base na curva da máxima energia de distorção ⁽¹⁰⁾. Neste trabalho propõe-se que essa correção seja feita de maneira similar àquela estabelecida pela norma API BUL 5C3 ⁽¹⁾, garantindo para os tubos " não API " a correção dessa resistência, proporcional à que ocorreria em tubos API.

A correção da resistência à pressão interna de tubos que tenham conexão tipo "buttress", "long thread" e "short thread", sujeitos a esforços axiais, é outro fator que pode ajudar a minimizar o custo da coluna. Tubos com esses tipos de conexões, principalmente a conexão buttress , são muito usados na composição de colunas de revestimento. Entretanto essas conexões não conseguem evitar vazamentos quando sujeitas à pressões acima de um determinado valor. Esse valor de pressão é definido pela norma API BUL 5C3 como " pressão de vazamento na conexão ". Neste trabalho, no capítulo IV , propõe-se que o máximo valor que a resistência à pressão interna corrigida pode atingir seja igual à pressão de vazamento na conexão.

A determinação dos esforços axiais na coluna de revestimento em poços direcionais é um elemento chave do dimensionamento. Com o afastamento lateral cada vez maior alcançado pelos poços direcionais, faz-se necessário que se empregue um critério de determinação de esforços que nos dê o resultado mais exato

possível, para impedir um superdimensionamento e conseqüentemente reduzir o custo da coluna. Este tópico será discutido no capítulo V.

No capítulo VI é apresentado um método de seleção de tubos para o dimensionamento da coluna que garante, sob quaisquer circunstâncias, obtermos a coluna de menor custo global, com os tubos que temos à disposição para montar a coluna de revestimento.

No capítulo VIII são apresentados os resultados de dois exemplos de dimensionamento de colunas de revestimentos. Nesses exemplos foram utilizadas as sugestões apresentadas neste trabalho.

CAPÍTULO II

DIMENSIONAMENTO DE COLUNAS DE REVESTIMENTO

CONSIDERAÇÕES GERAIS

O dimensionamento de uma coluna de revestimento requer que conheçamos as tensões atuantes cada ponto dessa coluna. Tais tensões são uma consequência da pressão, da temperatura, das variações dessas duas grandezas, do peso próprio dos tubos, dos dobramentos (zonas de drop-off e de build-up) e dos dog-legs, que também são dobramentos, porém acidentais.

As variações que ocorrem nas condições de temperatura e de pressão ao longo do tempo em um poço, provocam alterações nas tensões atuantes na coluna, diminuindo ou aumentando-as, podendo alcançar valores críticos, provocando a deformação plástica dos tubos, ou seja, danos irreversíveis. Portanto se soubermos as atividades que serão executadas no poço (exploração, injeção), os tipos de fluidos que serão utilizados e as temperaturas envolvidas nas diversas operações, poderemos determinar com

precisão as tensões que estão atuando na coluna de revestimento. Essas tensões são a Axial, circunferencial e Radial.

O critério de falhas de Von Mises ⁽¹³⁾, estabeleceu a relação entre essas tensões e a tensão de escoamento do tubo de aço. Este critério assume que toda tensão aplicada a um cubo de aço dentro da parede do tubo, diminui a resistência do tubo.

A equação (1), que descreve o estado triaxial de tensões, exprime a relação existente entre as tensões atuantes em um determinado ponto do tubo e sua tensão de escoamento.

$$(\sigma_t - \sigma_r)^2 + (\sigma_r - \sigma_a)^2 + (\sigma_a - \sigma_t)^2 = 2.(Y_p)^2 \quad (1)$$

onde:

σ_r → tensão radial, MPa [psi]

σ_a → tensão axial, MPa [psi]

σ_t → tensão circunferencial, MPa [psi]

Y_p → tensão de escoamento, MPa [psi]

As tensões circunferencial e radial, definidas pelas equações (2) e (3), são conhecidas como equações de LAMÉ ⁽¹⁷⁾. Essas tensões resultam da atuação da pressão interna e/ou externa sobre a parede do tubo.

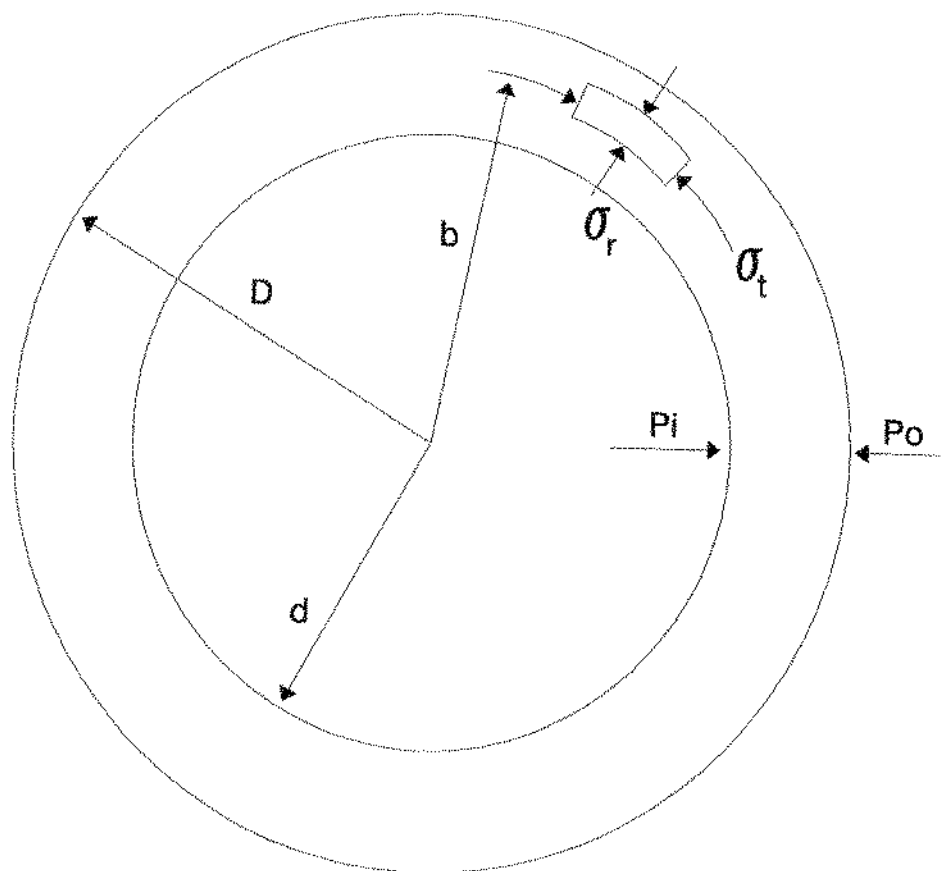


Figura 1 - Tensões principais na seção transversal do tubo.

$$\sigma_r = \frac{(d^2 \cdot P_i - D^2 \cdot P_o) - (d^2 \cdot D^2 / b^2) \cdot (P_i - P_o)}{D^2 - d^2} \quad (2)$$

$$\sigma_t = \frac{(d^2 \cdot P_i - D^2 \cdot P_o) + (d^2 \cdot D^2 / b^2) \cdot (P_i - P_o)}{D^2 - d^2} \quad (3)$$

onde:

- Pi → pressão interna ao tubo, MPa [psi]
- Po → pressão externa ao tubo, MPa [psi]
- D → raio externo do tubo, mm [in]
- d → raio interno do tubo, mm [in]
- b → raio de investigação, mm [in]

O máximo valor, em módulo, da tensão circunferencial será obtido quando o raio de investigação de tensão for igual ao raio interno do tubo ($b = d$). Neste caso, as equações da tensão radial e da tensão circunferencial assumem a seguinte forma:

$$\sigma_r = \frac{P_i.(D^2 + d^2) - 2.D^2.P_o}{D^2 - d^2} \quad (4)$$

$$\sigma_t = -P_i \quad (5)$$

No dimensionamento de uma coluna de revestimento procuramos tubos que resistam às máximas solicitações que podem vir a ocorrer na coluna. Essas solicitações são a Tração/Compressão, Pressão externa (colapso) e Pressão Interna (burst).

A tração/compressão resulta do peso próprio dos tubos, do empuxo hidráulico, das variações nas pressões interna e externa ao revestimento, e das variações na temperatura.

As pressões externa (colapso) e interna (burst) resultam da pressão hidrostática de fluidos contidos no exterior e interior do tubo, respectivamente. Também podem ser consequência de pressões aplicadas deliberadamente, à partir da superfície, no espaço anular ou no interior da coluna de revestimento.

A ação de cada uma dessas solicitações sobre a coluna é analisada individualmente, e sua magnitude está vinculada ao critério geral de dimensionamento que foi empregado na sua

determinação. Assim, considerações distintas são utilizadas no cálculo da pressão de colápio e de burst, dependendo do método de cálculo e do tipo de revestimento em estudo, que pode ser condutor, revestimento de superfície, intermediário e de produção. A definição dos tipos de revestimento pode ser encontrada na ref. 15.

Uma vez determinados, os valores dessas solicitações em cada ponto da coluna são majorados pelos fatores de projeto para se determinar os esforços de projeto, aos quais os tubos de revestimento deverão resistir.

Os fatores de projeto tem valores históricos ⁽¹¹⁾ e foram determinados pela prática das empresas que operam com colunas de revestimento. Os valores usuais dos fatores de projeto são:

$$DFax = 1,8 \quad \text{ou} \quad DFax = 445000 \text{ N} \quad (\cong 100000 \text{ lbf })$$

$$DFco = 1,125$$

$$DFbu = 1,1$$

Os fatores de projeto à tração são aplicados à solicitação axial atuante (multiplica-se por 1,8 ou soma-se 445000 N), gerando dois valores. A solicitação axial de projeto será o maior deles.

A experiência do projetista e o conhecimento das particularidades do campo de petróleo para o qual se destina a coluna de revestimento, bem como o critério de dimensionamento

adotado, podem fazer com que os fatores de projeto tenham valores diferentes dos usuais. MAIDLA (9), demonstrou que a variação no valor dos fatores de projeto podem provocar alterações significativas no preço final da coluna de revestimento.

As figuras 2, 3 e 4, mostram os diagramas de solicitações empregados no dimensionamento de revestimento de produção, admitindo-se que tenham sido determinados pelo critério das cargas máximas (14) .

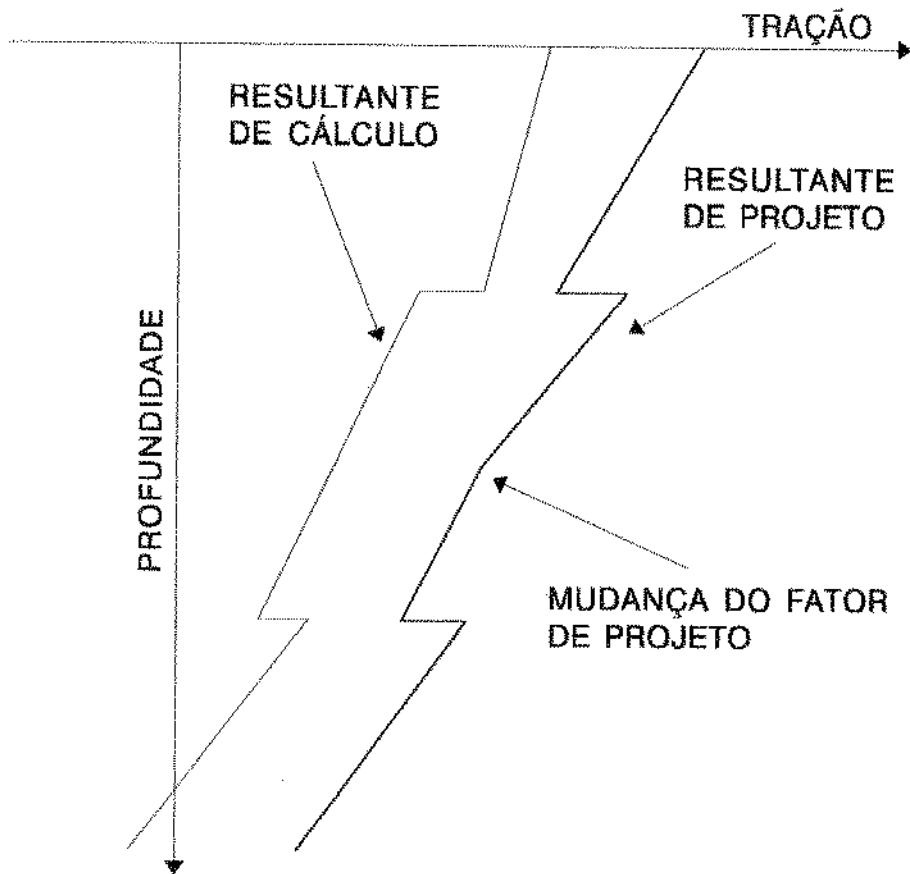


Figura 2 - Esforços para dimensionamento à tração

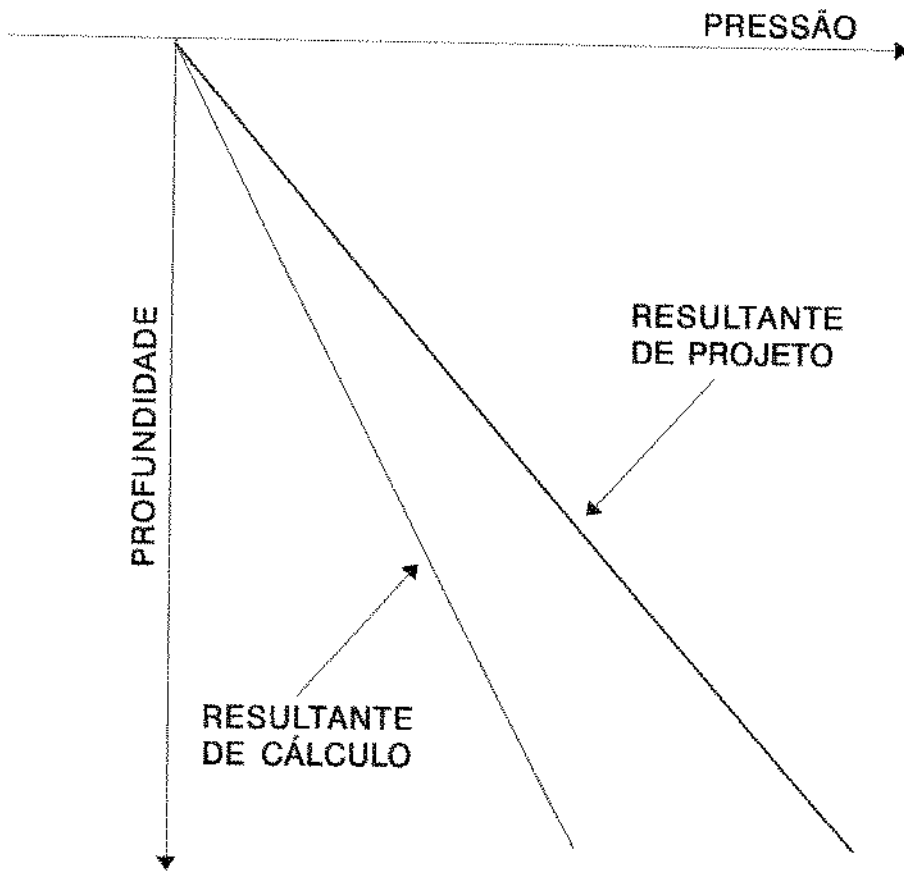


Figura 3 - Esforços para dimensionamento ao colapso

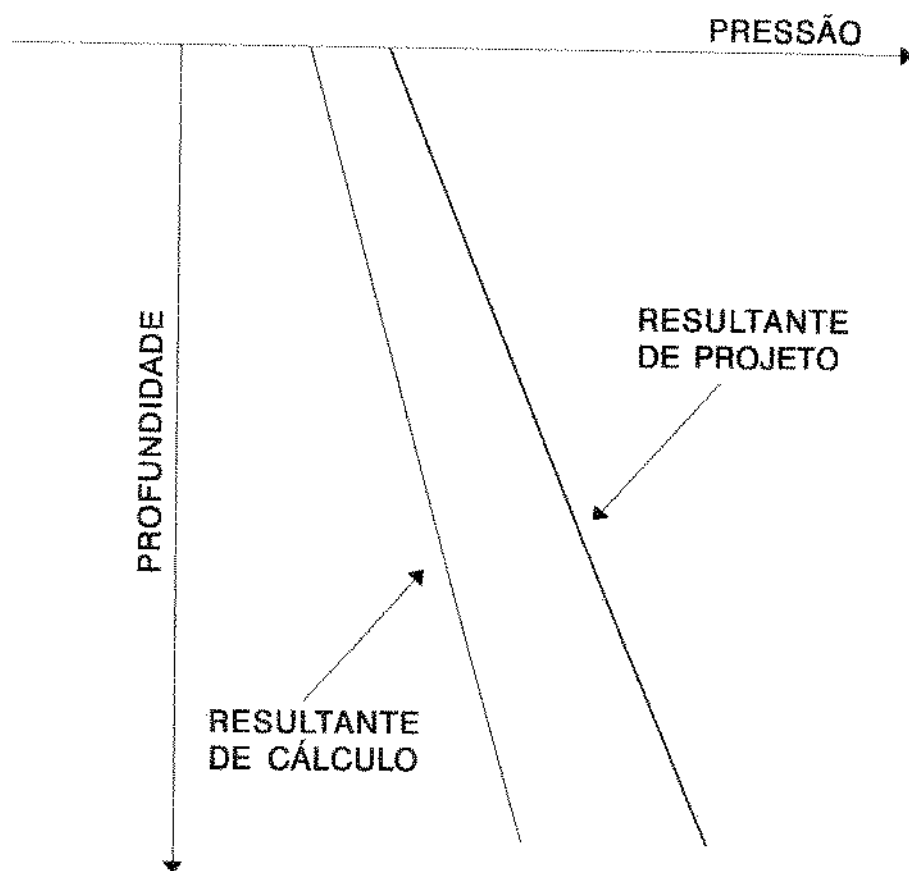


Figura 4 - Esforços para o dimensionamento à pressão interna

Em cada figura são apresentados dois diagramas de esforços. O primeiro deles é a "resultante de cálculo" proveniente dos cálculos estabelecidos no critério de dimensionamento. O segundo, é a "resultante de projeto", que é igual à resultante de cálculo majorada pelo fator de projeto.

Serão selecionados para compor a coluna de revestimento, os tubos que tenham resistência à tração, colapso e burst, superiores às respectivas "resultante de projeto" em cada ponto analisado.

Os fatores de segurança à tração, colapso e burst, em cada ponto estudado, são definidos como sendo a resistência do tubo a cada um desses esforços, dividida pelas respectivas resultantes de carga.

CAPÍTULO III
CÁLCULO DA RESISTÊNCIA AO COLAPSO

• CRITÉRIO API :

O efeito da tensão axial sobre a resistência à pressão interna e à pressão de colapso de tubos sujeitos à tensão axial foi discutido por HOLMQUIST e NADIA (5).

Naquele trabalho, foi considerado o estado biaxial de tensões ($\sigma_r = 0$), para verificar a relação existente entre a tensão axial e a tensão circunferencial. Na equação (1), assumindo que a tensão radial é nula, e que a tensão axial tem um valor qualquer, o valor da tensão circunferencial calculado para essa situação representa o que resta de resistência para o tubo suportar as pressões interna ou de colapso.

O valor da tensão circunferencial calculado dessa forma, pela equação (6), é definido pela norma API BULL 5C3 (1) como sendo a tensão de escoamento equivalente.

$$Y_{pa} = Y_p \left(\sqrt{1 - 0,75 \cdot (\sigma_a / Y_p)^2} \pm 0,5 \cdot (\sigma_a / Y_p) \right) \quad (6)$$

onde:

Y_{pa} → tensão de escoamento equivalente, MPa [psi]

O sinal negativo é usado para calcular a tensão de escoamento equivalente quando estivermos interessados em determinar a resistência ao colapso, e o sinal positivo, a resistência à pressão interna de tubos sujeitos à tensão axial, considerando o estado biaxial de tensões.

A norma API BULL 5C3 (1) padronizou os procedimentos de cálculo que devem ser adotados para a determinação da resistência ao colapso de tubos API. Assim foram definidos quatro tipos de colapso que podem ocorrer em um tubo de revestimento. São eles : colapso de escoamento, colapso plástico, colapso de transição e colapso elástico.

As fórmulas apresentadas a seguir são utilizadas para se determinar a resistência ao colapso de tubos API livres de tensão axial :

$$A = 2,8762 + 0,10679 \cdot 10^{-5} \cdot Y_p + 0,21301 \cdot 10^{-10} \cdot Y_p^2 - 0,53132 \cdot 10^{-16} \cdot Y_p^3 \quad (7)$$

$$B = 0,026233 + 0,50609 \cdot 10^{-6} \cdot Y_p \quad (8)$$

$$C = -465,93 + 0,030867 \cdot Y_p - 0,10483 \cdot 10^{-7} \cdot Y_p^2 + 0,36989 \cdot 10^{-13} \cdot Y_p^3 \quad (9)$$

$$F = \frac{46,95 \cdot 10^6 \cdot \left(\frac{3 \cdot B/A}{2+B/A}\right)^3}{Y_p \cdot \left(\frac{3 \cdot B/A}{2+B/A} - B/A\right) \cdot \left(1 - \frac{3 \cdot B/A}{2+B/A}\right)^2} \quad (10)$$

$$G = F \cdot (B/A) \quad (11)$$

$$DT = D/t \quad (12)$$

onde:

A, B, C, F, G, DT → parâmetros de cálculo

t → espessura da parede do tubo, mm [in]

O tipo de colapso que será utilizado na determinação da resistência ao colapso do tubo é função do valor de " DT " do tubo, calculado pela fórmula (12). Assim temos:

- Colapso de Escoamento: ocorre quando $DT \leq DT_{yp}$

$$DT_{yp} = \frac{\sqrt{(A-2)^2 + 8 \cdot (B+C/Y_p)} + (A-2)}{2 \cdot (B+C/Y_p)} \quad (13)$$

$$P_{yp} = 2 \cdot Y_p \cdot \left(\frac{(D/t)-1}{(D/t)^2}\right) \quad (14)$$

onde:

P_{yp} → Pressão de colapso máxima no regime de colapso de escoamento, [psi]

- Colapso Plástico: ocorre quando $DT_{YP} < DT \leq DT_{PT}$

$$DT_{PT} = \frac{Yp.(A - F)}{C + Yp.(B - G)} \quad (15)$$

$$P_P = Yp. \left(\frac{A}{D/t} - B \right) - C \quad (16)$$

onde:

P_P → Pressão de colapso máxima no regime de colapso plástico, [psi]

- Colapso de Transição: ocorre quando $DT_{PT} < DT \leq DT_{TE}$

$$DT_{TE} = \frac{2 + B/A}{3.B/A} \quad (17)$$

$$P_T = Yp. \left(\frac{F}{D/t} - G \right) \quad (18)$$

onde:

P_T → Pressão de colapso máxima no regime de colapso de Transição, [psi]

- Colapso Elástico: ocorre quando $DT > DT_{TE}$

$$P_E = \frac{46,95.10^6}{(D/t).(D/t-1)^2} \quad (19)$$

onde:

P_p → Pressão de colapso máxima no regime de colapso elástico, [psi]

Observação : Nas fórmulas 7, 8, 9, 10, 14, 15, 16, e 18, a tensão de escoamento (Y_p) é expressa em unidades de campo (psi).

Quando houver tensão axial de tração atuando sobre o tubo de revestimento, a resistência ao colapso fica reduzida. A determinação da máxima pressão de colapso, para esta situação, será feita da forma descrita anteriormente, apenas mudando-se o valor da tensão de escoamento para o valor da tensão de escoamento equivalente nas fórmulas 7, 8, 9, 10, 14, 15, 16, e 18.

A tensão de escoamento equivalente de tubos sujeitos a tensão axial é definida pela norma API BULL 5C3 ⁽¹⁾ pela seguinte equação:

$$Y_{pa} = Y_p \left(\sqrt{1 - 0,75 \cdot (\sigma_a / Y_p)^2} - 0,5 \cdot (\sigma_a / Y_p) \right) \quad (20)$$

onde:

Y_{pa} → tensão de escoamento equivalente, MPa [psi]

À seguir é mostrado o algoritmo utilizado no cálculo da resistência ao colapso corrigida, como estabelecido na norma API BUL 5C3.

Observações:

No algoritmo ...

- 1 - Os dados de entrada são referentes ao tubo em estudo.
- 2 - Os parâmetros de cálculo são definidos nas páginas 16, 17 e 18.
- 3 - Os números entre parêntesis identificam as fórmulas que devem ser utilizadas para o cálculo da resistência ao colapso corrigida.

ALGORITMO PARA CORREÇÃO CORREÇÃO DA RESISTÊNCIA AO COLAPSO
 - CRITÉRIO API -

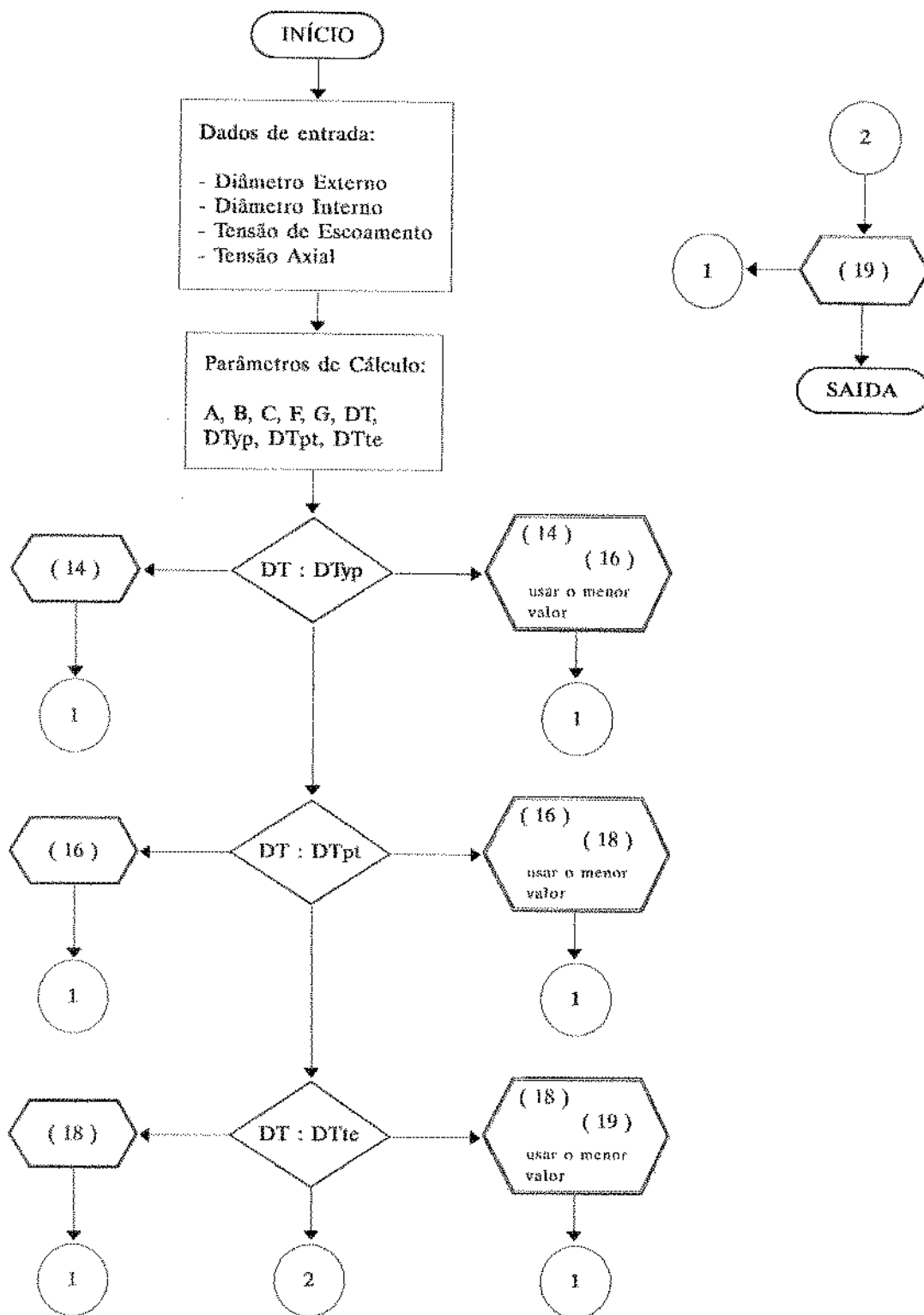


Figura 5

• CRITÉRIO API MODIFICADO :

A seguir apresentamos um procedimento de cálculo para ser empregado na determinação da resistência ao colapso de tubos " não API " sujeitos à tensão axial (9). Chamaremos este procedimento de critério API modificado.

Os tubos " não API ", atendem a todas as determinações padronizadas pelas normas API quanto a resistência à tração , à pressão interna, à tensão de escoamento e de ruptura, porém devido à alterações feitas no processo de sua fabricação, apresentam uma resistência ao colapso diferente daquela determinada pelos procedimentos de cálculo API, para o caso de tubos livres de tensão axial. Para exemplificar, são apresentadas a seguir as características mecânicas de dois tubos, sendo um API e outro " não API ".

GRAU	DIAM.	PESO	P.COLAPSO	P.BURST	TRAÇÃO	CONEXÃO
S95**	7	26	7800	8600	717000	BUTT
C95	7	26	5880	8600	717000	BUTT

** Tubo " não API " ()

Unidades utilizadas na tabela do fabricante :

Diâmetro : in

Pressão de colapso e de burst : psi

Tração : lbf

peso : lbf/ft

Para se determinar a resistência ao colapso de tubos " não API " sujeitos a um determinado valor de tensão axial, atuaremos em duas etapas:

1 - Determinar as resistências ao colapso nas duas situações: com a presença de tensão axial (resistência ao colapso reduzida), e sem a presença de tensão axial, utilizando a sequência de cálculo anteriormente descrita para os tubos API. Determinar o fator de redução verificado entre os dois valores de resistência ao colapso.

2 - Aplicar o fator de redução à resistência ao colapso do tubo " não API " para estabelecer a máxima pressão de colapso admissível, para aquele valor de tensão axial.

Vejamos o exemplo a seguir:

Cálculo da pressão de colapso reduzida de tubo não API:

- diâmetro externo do tubo : 177,8 mm (7 in)
- diâmetro interno do tubo : 159,41 mm (6,276 in)
- peso : 379,44 N/m (26 lbf/ft)
- grau do aço : S95
- tensão escoamento : $Y_p = 665$ MPa (95000 psi)
- pressão de colapso : 54,6 MPa (7800 psi)
- tensão axial atuante : 278,1 MPa (39739,00 psi)

Seguindo o roteiro anteriormente estabelecido para a determinação da resistência ao colapso de tubos API, temos,

- $R_c = 41,16 \text{ MPa}$ (5880 psi)
 (tubo livre de tensão axial)

- $R_{cr} = 34,79 \text{ MPa}$ (4970 psi)
 (considerando o efeito da tensão axial)

- fator de redução = $34,79/41,16 = 0,845$.

- Resistência ao Colapso Reduzida do tubo " não API ":

$R_{cr} = 0,845 \cdot (54,6) = 46,15 \text{ MPa}$ (6590 psi)

Vamos comparar este resultado com aqueles que seriam obtidos caso fossem calculados pela curva da máxima energia de deformação ⁽¹⁰⁾, utilizada pela PETROBRÁS ⁽¹²⁾ e pela LONE STAR STEEL ⁽¹⁶⁾ por exemplo, com pequenas modificações entre elas , para calcular a resistência ao colapso reduzida de tubos sujeitos à tensão axial de tração. As equações adotadas por essas empresas para esse cálculo são as seguintes:

PETROBRÁS ⁽¹⁰⁾ :

$$X^2 + X \cdot Y + Y^2 = 1 \quad (21)$$

LONE STAR STEEL ⁽¹⁵⁾ :

$$X^2 + 0,52 \cdot X \cdot Y + Y^2 = 1 \quad (22)$$

onde :

$$X = \frac{\text{Tração atuante}}{\text{Resistência à tração do tubo}}$$

Y = fator de redução da resistência ao colapso

Assim, no exemplo anterior, usando as fórmulas (21) e (22), obtemos os seguintes valores para a resistência ao colapso reduzida :

PETROBRÁS :

$$X = 0,418$$

$$Y = 0,723$$

$$R_{cr} = 39,48 \text{ MPa} \quad (5640 \text{ psi })$$

LONE STAR STEEL :

$$X = 0,418$$

$$Y = 0,806$$

$$R_{cr} = 43,96 \text{ MPa} \quad (6280 \text{ psi })$$

Comparando esses resultados com aquele obtido pelo método API modificado ($R_{cr} = 46,15 \text{ MPa}$) , podemos observar que o critério adotado pela PETROBRÁS é o mais conservador e portanto podendo resultar em colunas de revestimento mais caras.

Acreditamos que o método API modificado é o mais indicado para o cálculo da resistência ao colapso reduzida de tubos " não API ", uma vez que segue os critérios estabelecidos pela norma API BULL 5C3 ⁽¹⁾ para o cálculo da resistência ao colapso reduzida de tubos sujeitos à tensão axial de tração, o que permite que se utilize ao máximo essa margem adicional de resistência oferecida pelo tubo, e também porque o tubo " não API ", neste caso, é na realidade um tubo API melhorado.

CAPÍTULO IV
CÁLCULO DA RESISTÊNCIA À PRESSÃO INTERNA

• CRITÉRIO API :

O dimensionamento da coluna de revestimentos à pressão interna pode ser feito com base em dois métodos.

O primeiro método, estabelecido pela norma API BULL 5C3 (1), não considera o efeito da tensão axial na resistência à pressão interna. Assim para se determinar a máxima pressão interna que o tubo pode suportar, devemos calcular a pressão interna de escoamento do tubo, a pressão interna de escoamento da luva e a pressão interna de vazamento da conexão. A máxima pressão interna admissível será o menor valor dentre os três calculados. As fórmulas apresentadas a seguir são utilizadas nesses cálculos:

1 - Pressão Interna de Escoamento do Tubo:

$$P_b = 0,875 \cdot \left(\frac{2 \cdot Y_p \cdot t}{D} \right) \quad (23)$$

2 - Pressão de Vazamento da Conexão:

$$P_v = E.Z.V.p. \left(\frac{W^2 - Es^2}{2.Es.W^2} \right) \quad (24)$$

onde:

- E → módulo de Young, 21E4 MPa [30E6 psi]
- Z → conicidade da rosca, mm/mm [in/in]
- V → número de voltas para o aperto manual do tubo
- W → diâmetro externo da luva, mm [in]
- Es → diâmetro do tubo na rosca, nos planos E₁ e E₇ definidos na norma API STD 5B (4), mm [in]

• Pressão Interna de Escoamento da Luva:

$$P_L = Y_{pL} \cdot \left(\frac{W - d_1}{W} \right) \quad (25)$$

onde:

- d₁ → diâmetro da rosca na extremidade do pino após o aperto, mm [in]
- Y_{p1} → tensão de escoamento da luva, MPa [psi]

• CRITÉRIO API COM CORREÇÃO DA RESISTÊNCIA À PRESSÃO INTERNA

O segundo método utilizado na determinação da máxima pressão interna admissível, conhecido como critério biaxial de correção da resistência à pressão interna, considera o efeito da tensão axial na resistência à pressão interna. Neste método, a interação entre as tensões tangencial e axial é analisada segundo o critério de falhas de Von Mises ⁽¹³⁾. As equações descritas anteriormente para o estabelecimento da máxima pressão interna pelo critério API são utilizadas neste método, porém, os valores das tensões de escoamento do tubo e da conexão são substituídos pelos valores das tensões de escoamento equivalente do tubo e da luva respectivamente. As tensões equivalentes são determinadas pela fórmula (26). No caso do cálculo da tensão de escoamento equivalente da luva, substitui-se Y_p por Y_{p_l} na fórmula (26).

$$Y_{pa} = Y_p \cdot \left(\sqrt{1 - 0,75 \cdot \left(\frac{\sigma_a}{Y_p} \right)^2} + 0,5 \cdot \left(\frac{\sigma_a}{Y_p} \right) \right) \quad (26)$$

Este método, segundo Kastor ⁽⁷⁾, não é válido para o dimensionamento de colunas de revestimento de poços profundos sujeitos à alta pressão interna, pois a consideração de que a tensão radial é nula não é mais válida, sendo necessário a utilização do critério triaxial de tensões para a correção da resistência à pressão interna. Kastor, demonstra que é inadequado o uso deste método (critério biaxial) para a correção da resistência à pressão interna quando a pressão atuante for maior

que 84 MPa (12000 psi). Para valores de pressão interna menores que 84 MPa, os resultados obtidos para a resistência à pressão interna corrigida, por este método e pelo critério triaxial de tensões, são praticamente iguais.

• TUBOS COM CONEXÃO TIPO SHORT THREAD, LONG THREAD E BUTTRESS

Vamos agora apresentar uma sugestão de cálculo para ser empregado no dimensionamento à pressão interna de tubos com conexão buttress (BUT), short thread (ST) e long thread (LT).

Neste procedimento, a máxima pressão interna admissível em cada ponto da coluna será igual àquela determinada de acordo com a norma API BUL 5C3, entretanto, permitiremos que essa pressão seja corrigida, pelo efeito da tensão axial, pelo critério biaxial de correção da resistência à pressão interna.

O máximo valor que a pressão interna admissível poderá atingir é igual a pressão de vazamento na conexão, como definida pela norma API BUL 5C3.

A tabela 1, mostra os valores da pressão interna de vazamento na conexão para os diferentes tipos de conexões e roscas. Os valores foram calculados de acordo com a norma API BUL 5C3 para vários diâmetros nominais de tubos, livres de tensão

axial. Os dados dessa tabela estão expressos em unidades de campo.

TABELA 1 - Pressão interna de vazamento na conexão, em psi, para diferentes tipos de conexões . (tubo livre de tensão axial)

Diâmetro	conexão		
	STC	LTC	BTC
4-1/2	17920	17920	17380
5	13160	13160	16100
7	9520	9520	11790
7-5/8	11800	11800	12680
8-5/8	10380	10380	11230
9-5/8	8460	8460	9160
9-5/8**	9670	9670	9160
10-3/4	6880	-	7450
10-3/4**	7860	-	7450
11-3/4	5820	-	6300
13-3/8	4550	-	4930
16	3230	-	3560
18-5/8	3150	-	3500
20	2400	-	2320

** - Tubos com tensão de escoamento maior ou igual a 770 MPa (110 psi)

Como podemos ver na tabela 2, que mostra as pressões internas de escoamento do tubo, da conexão, e a pressão interna de vazamento da conexão para alguns tubos de revestimento com

diâmetro externo de 177,8 mm (7 polegadas) com diferente graus e pesos, os tubos que apresentam tensão de escoamento menor que 665 MPa (95000 psi) , (C95, N80 e K55), também apresentam a máxima pressão interna admissível, calculada pelo critério API, menor que a pressão de vazamento na conexão para os respectivos tipos de conexão. Deste modo, esses tubos apresentam uma maior margem para a correção da resistência à pressão interna

Concluimos, portanto, que o método proposto para a correção da resistência à pressão interna, apresentará melhores resultados para os tubos com tensão de escoamento menor que 665 MPa (95000 psi), e que são justamente os mais empregados em poços de pequena ou média profundidade ou onde a máxima pressão interna não é alta.

TABELA 2 - Pressões Interna de Escoamento do Tubo, da Luva, e de Vazamento na Conexão, para tubos com diâmetro igual a 7 polegadas. Os dados da tabela estão em unidades de campo.

		Máxima Pressão Interna Admissível, psi						
Peso	Grau	Tubo	Luva			Vazamento na Conexão		
			SIC	LTC	BTC	SIC	LTC	BTC
23,0	K55	4360	4360	4360	4360	9520	9520	11790
26,0	K55	4980	4980	4980	4980	9520	9520	11790
23,0	N80	6340	-	6340	6340	9520	9520	11790
26,0	N80	7240	-	7240	7240	9520	9520	11790
29,0	N80	8160	-	8160	8160	9520	9520	11790
32,0	N80	9060	-	9060	8460	9520	9520	11790
35,0	N80	9960	-	9240	8460	9520	9520	11790
38,0	N80	10800	-	9240	8460	9520	9520	11790
23,0	C95	7530	-	7530	7530	9520	9520	11790
26,0	C95	8600	-	8600	8600	9520	9520	11790
29,0	C95	9690	-	9690	8690	9520	9520	11790
32,0	C95	10760	-	10760	10050	9520	9520	11790
35,0	C95	11830	-	10970	10050	9520	9520	11790
38,0	C95	12820	-	10970	10050	9520	9520	11790
26,0	P110	9960	-	9960	9960	9520	9520	11790
29,0	P110	11220	-	11220	11220	9520	9520	11790
32,0	P110	12460	-	12460	11640	9520	9520	11790
35,0	P110	13700	-	12700	11640	9520	9520	11790
38,0	P110	14850	-	12700	11640	9520	9520	11790

Peso - Lbf/ft

Por exemplo: se estivermos utilizando tubos com diâmetro igual a 177,8 mm (7 polegadas), N-80, 466,9 N/m (32 Lbf/ft), vemos que pelo critério API a resistência à pressão interna é igual à 59,22 MPa (8460 psi). Pelo critério proposto, no caso do tubo estar tracionado, a resistência a pressão interna poderá variar até o valor de 11790 psi.

CAPÍTULO V

DIMENSIONAMENTO DE COLUNAS DE REVESTIMENTO EM POÇOS DIRECIONAIS

O dimensionamento de colunas de revestimento em poços direcionais se processa da mesma forma que em poços verticais e utiliza os mesmos critérios para a determinação das cargas atuantes na coluna. A pressão de colapso e a pressão interna utilizadas no dimensionamento são determinadas com base nas profundidades verticais do poço direcional.

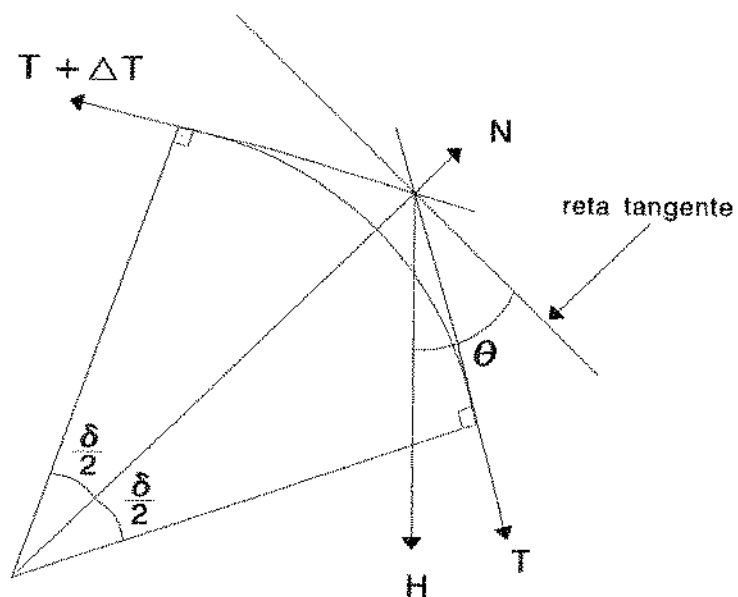
A determinação da tensão axial, no entanto, sofre algumas alterações, uma vez que agora temos a presença de trechos curvos (zonas de build-up e de drop-off) onde esforços axiais adicionais ocorrem em função do dobramento dos tubos de revestimento. Ainda podem existir dog-legs, acidentais, que também provocarão o aparecimento de tensões de dobramento elevadas.

Nos trechos curvos e nos dog-legs as fibras do tubo que estão no lado convéxio da curvatura sofrem um acréscimo de tensão

devido ao dobramento. Esse esforço axial adicional deve ser somado àquele que já existia nesses pontos.

O programa auxiliar de cálculo de cargas criado para testar as propostas apresentadas neste trabalho, calcula a tensão axial atuante na coluna, ao longo da trajetória do poço, baseado na sugestão feita por Wojtanowicz e Maidla (16). Neste programa existe também uma rotina que permite simular a existência de um dog-leg, acidental, em qualquer ponto da trajetória do poço vertical ou direcional, e calcular os esforços de dobramento dele decorrente.

A figura (6), que ilustra o procedimento adotado para o cálculo da tensão axial, mostra as forças atuantes em um segmento do trecho curvo da trajetória do poço.



N : FORÇA NORMAL

T : FORÇA AXIAL

H : PESO

δ : ÂNGULO DE DOBRAMENTO

θ : INCLINAÇÃO DA RETA TANGENTE

Figura 6 - Forças no trecho curvo ⁽¹⁹⁾

O trecho curvo é dividido em pequenos arcos de circunferência. Determina-se as inclinações das tangentes ao arco nos pontos extremos deste. Define-se uma tangente ao ponto médio do arco, com inclinação igual a média das inclinações das tangentes aos pontos extremos do arco. O acréscimo de força axial na extremidade do arco para o caso da coluna estar parada (desprezando o atrito), é dado pelo balanço de forças na direção da reta tangente. Assim temos:

$$(T + \Delta T) \cdot \cos(\delta/2) - H \cdot \cos\theta - T \cdot \cos(\delta/2) = 0 \quad (27)$$

$$\Delta T \cdot \cos(\delta/2) = H \cdot \cos\theta, \quad (28)$$

$\delta/2 \rightarrow$ é um ângulo pequeno, portanto, $\cos(\delta/2) \cong 1$, assim, o acréscimo de força para este caso é dado por :

$$\Delta T \cong H \cdot \cos\theta \quad (29)$$

A equação (29) é empregada para determinar o esforço axial ao longo de toda a trajetória do poço, pois o acréscimo de força axial é calculado dentro de pequenos intervalos - 25 metros - e totalizados desde a sapata até a extremidade superior da coluna.

O esforço axial adicional que ocorre devido aos dobramentos, Força de dobramento, em unidades de campo, é calculada pela equação (30) proposta por Lubinsk (8).

$$F_b = 64 \cdot \alpha \cdot D \cdot q \cdot \frac{6 \cdot K \cdot L_j}{\tanh(6 \cdot K \cdot L_j)} \quad (30)$$

$$K = \sqrt{\frac{T}{E \cdot I}} \quad (31)$$

$$I = \frac{\pi}{64} (D^4 - d^4) \quad (32)$$

onde:

L_j → comprimento do tubo de revestimento, ft

α → DLS (dog-leg severity), graus/ft

I → momento de inércia, in^4

T → força axial, lbf

O acréscimo de força axial calculado pela equação (29) pode ser chamado de acréscimo de força estático, pois foi calculado para a coluna parada em sua posição final.

A força axial atuante na coluna calculada por este procedimento será utilizada para corrigir as resistências ao colápio e a pressão interna dos tubos.

Para se fazer o dimensionamento da coluna à tração, vamos calcular o acréscimo de força axial que ocorreria no caso de retirarmos a coluna de dentro do poço. Para simular essa retirada devemos considerar além do peso próprio dos tubos, a força de atrito devido ao arraste. O coeficiente de atrito de dimensionamento adotado para toda extensão do poço, nesta simulação, é igual a 0,4 . Na realidade devem existir dois valores de coeficientes de atrito, sendo um para o trecho revestido e o outro para o trecho de poço aberto.

O acréscimo de força axial em cada segmento da coluna quando simulamos a sua retirada, é dado por :

$$\Delta T = H \cdot \cos\theta + \mu \cdot N \quad (33)$$

Na figura 6, fazendo-se um balanço de forças na direção da força normal, temos :

$$H.\sin\theta + (T + \Delta T).\sin(\delta/2) + T.\sin(\delta/2) - N = 0 , \quad (34)$$

$$H.\sin\theta + 2.T.\sin(\delta/2) + \Delta T.\sin(\delta/2) - N = 0 , \quad (35)$$

mas, $\Delta T.\sin(\delta/2) \cong 0$, assim a força normal é dada por :

$$N = H.\sin\theta + 2.T.\sin(\delta/2) , \quad (36)$$

e o acréscimo de força para este caso é dado por:

$$\Delta T \cong H.\cos\theta + \mu.[H.\sin\theta + 2.T.\sin(\delta/2)] \quad (37)$$

O acréscimo de força axial calculado pela equação (37) pode ser chamado de acréscimo de força dinâmico, pois foi calculado para a coluna no início de seu movimento, à partir de sua posição final.

A figura (7) mostra os resultados obtidos para o esforço axial atuante na coluna em um poço direcional tipo build-and-hold, determinados para os casos de coluna parada e em movimento, no início de sua retirada.

Dados do poço direcional utilizados no exemplo:

- profundidade vertical da sapata :	2500 m
- afastamento lateral da sapata :	3200 m
- profundidade medida da sapata :	4404 m
- kick-of-point (KOP) :	350 m
- taxa de build-up :	1,6°/30.5 m (≅ 1.6°/100 ft)
- profundidade medida no final do build-up:	1578 m
- dog-leg :	9°/30.5 m (≅ 9°/100 ft)
- profundidade do dog-leg :	350 m
- peso específico da lama :	1449,9 Kg/m ³ (12,1 bm/gal)

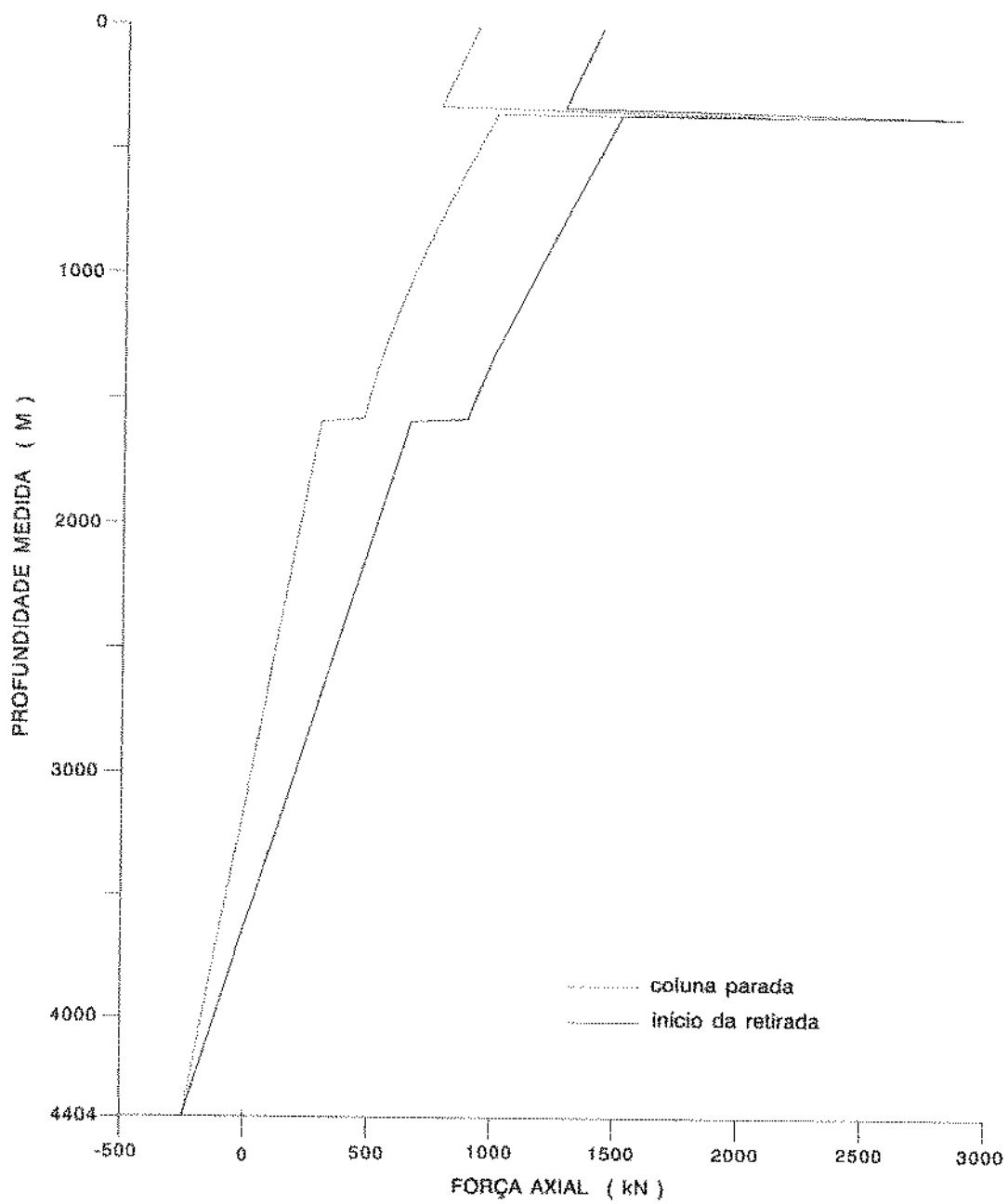


Figura 7 - Força Axial na coluna ao longo da trajetória do poço

Existe um outro procedimento para o dimensionamento de coluna de revestimento em poços direcionais, empregado pela PETROBRÁS ⁽¹⁵⁾ e que faz as seguintes considerações:

- " O poço direcional é projetado como se fosse um poço vertical, no que diz respeito à pressão interna e ao colápsio. São consideradas as profundidades verticais para os cálculos de dimensionamento. Assim sendo, na correção do colápsio devido à tração é utilizado o peso da coluna projetada ".

- " Para o caso da tração, o poço direcional é transformado em poço vertical, com profundidade medida considerada como profundidade vertical. As tensões devidas à tração e às cargas de dobramento são calculadas utilizando-se os valores provenientes deste poço vertical ".

Aplicamos os dois critérios de determinação de esforços axiais ao poço do exemplo anterior para compararmos os resultados. As figuras 8 e 9, mostram os esforços axiais empregados na correção da resistência ao colápsio dos tubos, calculados pelos critérios adotado pela Petrobrás ⁽¹⁵⁾ e o proposto por Wojtanowicz e Maidla ⁽¹⁸⁾, respectivamente.

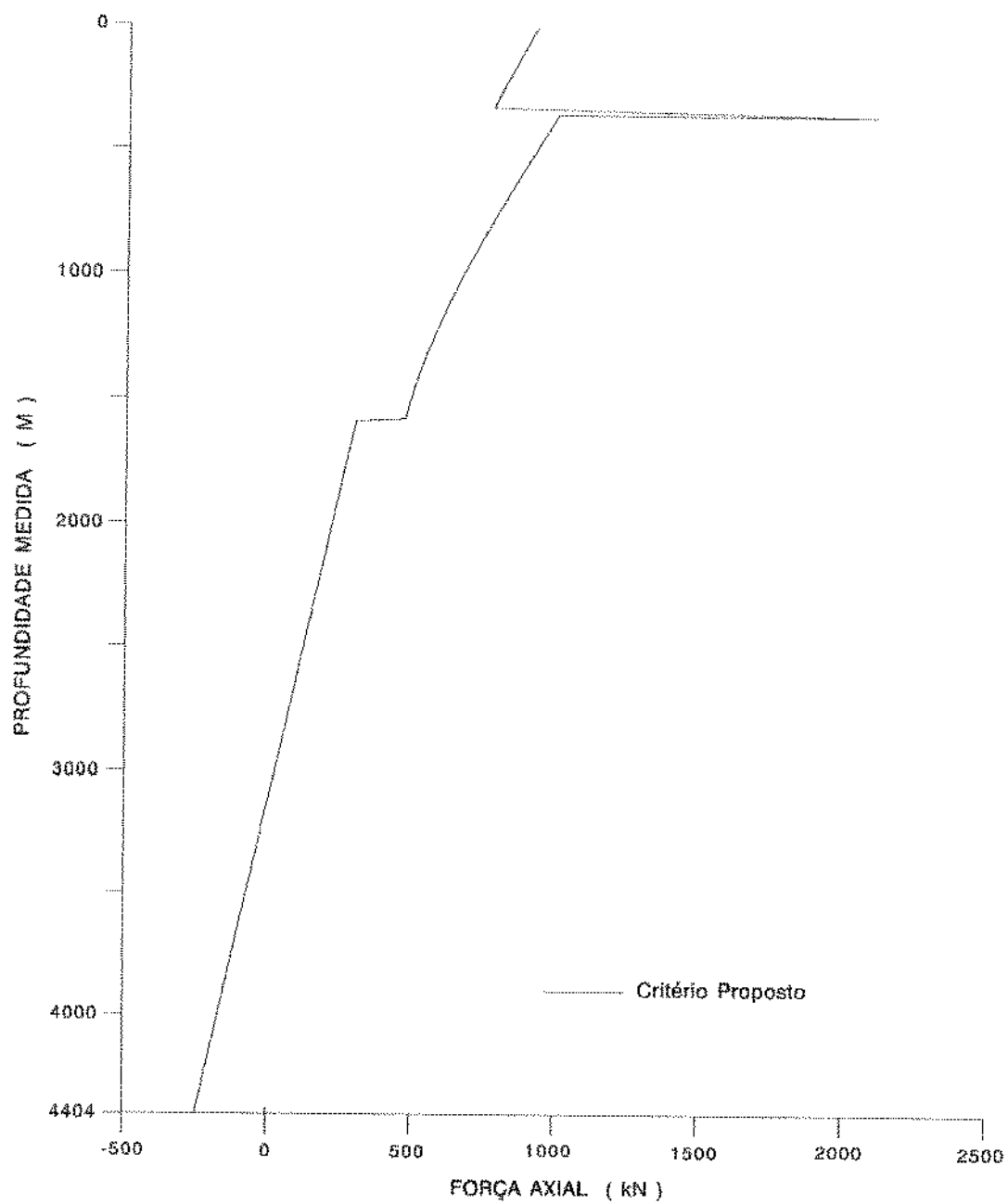


Figura 8 - Força Axial na coluna ao longo da trajetória do poço

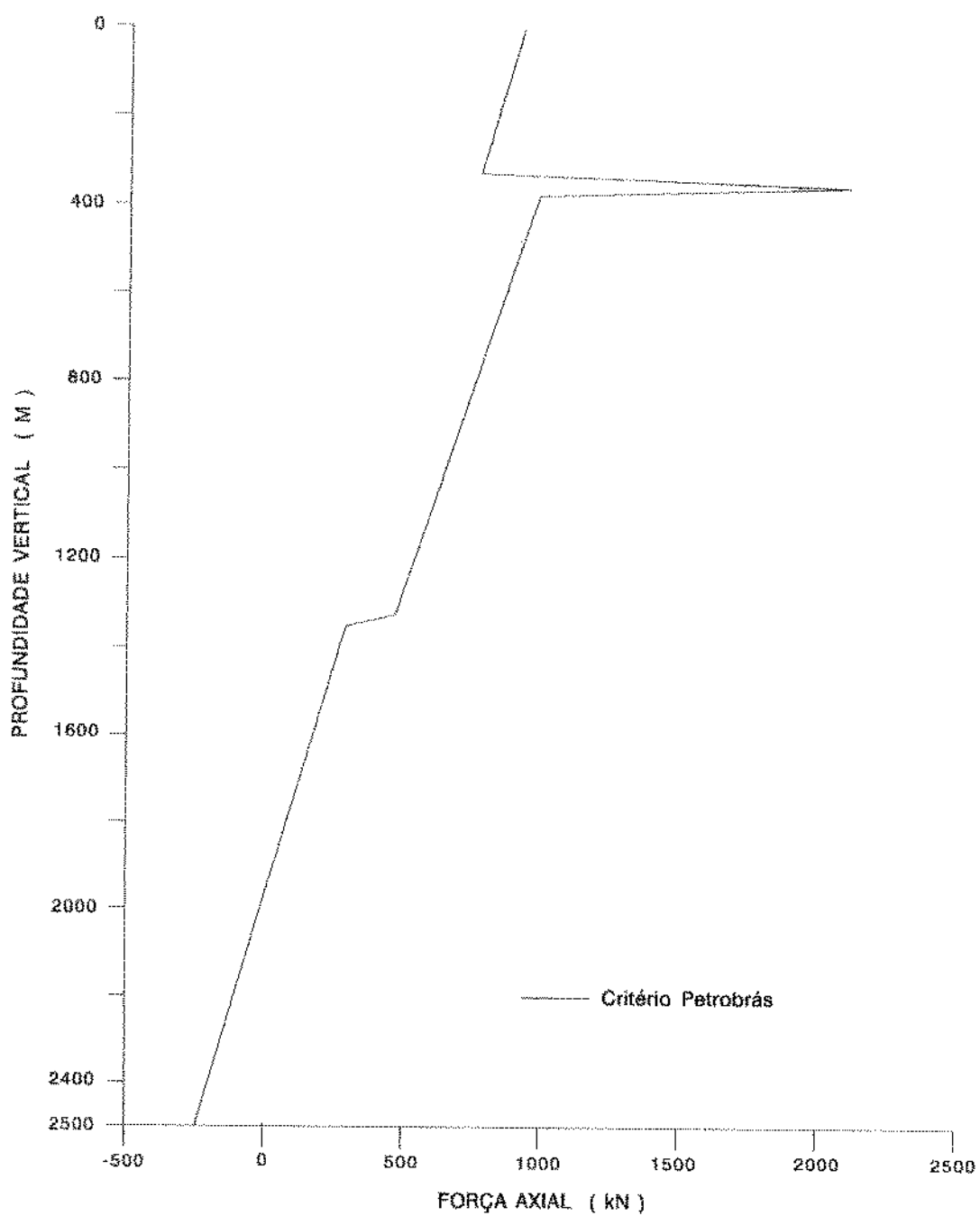


Figura 9 - Força Axial na coluna

Embora pareçam diferentes, as figuras 8 e 9 fornecem para um mesmo ponto da coluna, o mesmo valor de força axial atuante. A aparente diferença que existe entre elas deve-se ao fato de que na figura 8 temos profundidades medidas ao longo da trajetória do poço, enquanto que na figura 9 temos profundidades verticais, correspondentes àquelas profundidades medidas.

Portanto, para a determinação da força axial que corrige a resistência à pressão interna e ao colapso dos tubos em poço direcionais, é mais conveniente utilizar o critério empregado pela Petrobrás ⁽¹⁵⁾, uma vez que o critério proposto por Wojtanowicz e Maidla ⁽¹⁶⁾ fornece os mesmos resultados, porém o esforço computacional neste método é muito maior.

A figura 10 mostra que os esforços axiais utilizados no dimensionamento à tração dos tubos, determinados pelo critérios adotado pela Petrobrás ⁽¹⁵⁾ e pelo proposto por Wojtanowicz e Maidla ⁽¹⁶⁾, apresentam diferenças significativas. Essas diferenças, principalmente na porção superior da coluna, na zona de build-up, serão ampliadas quando os esforços axiais forem corrigidos pelo fator de projeto à tração. Isto fatalmente nos obrigará a usarmos tubos de melhores características mecânicas (mais caros) para atender à solicitação axial de projeto, aumentando o custo final da coluna.

Consideramos que o critério proposto por Wojtanowicz e Maidla ⁽¹⁶⁾ para o cálculo da força axial na coluna, para o dimensionamento à tração, é mais coerente e leva à valores mais próximo da realidade. Quanto melhor for a estimativa dos

coeficientes de atrito a serem usados neste cálculo, menor será o erro cometido na determinação da força axial.

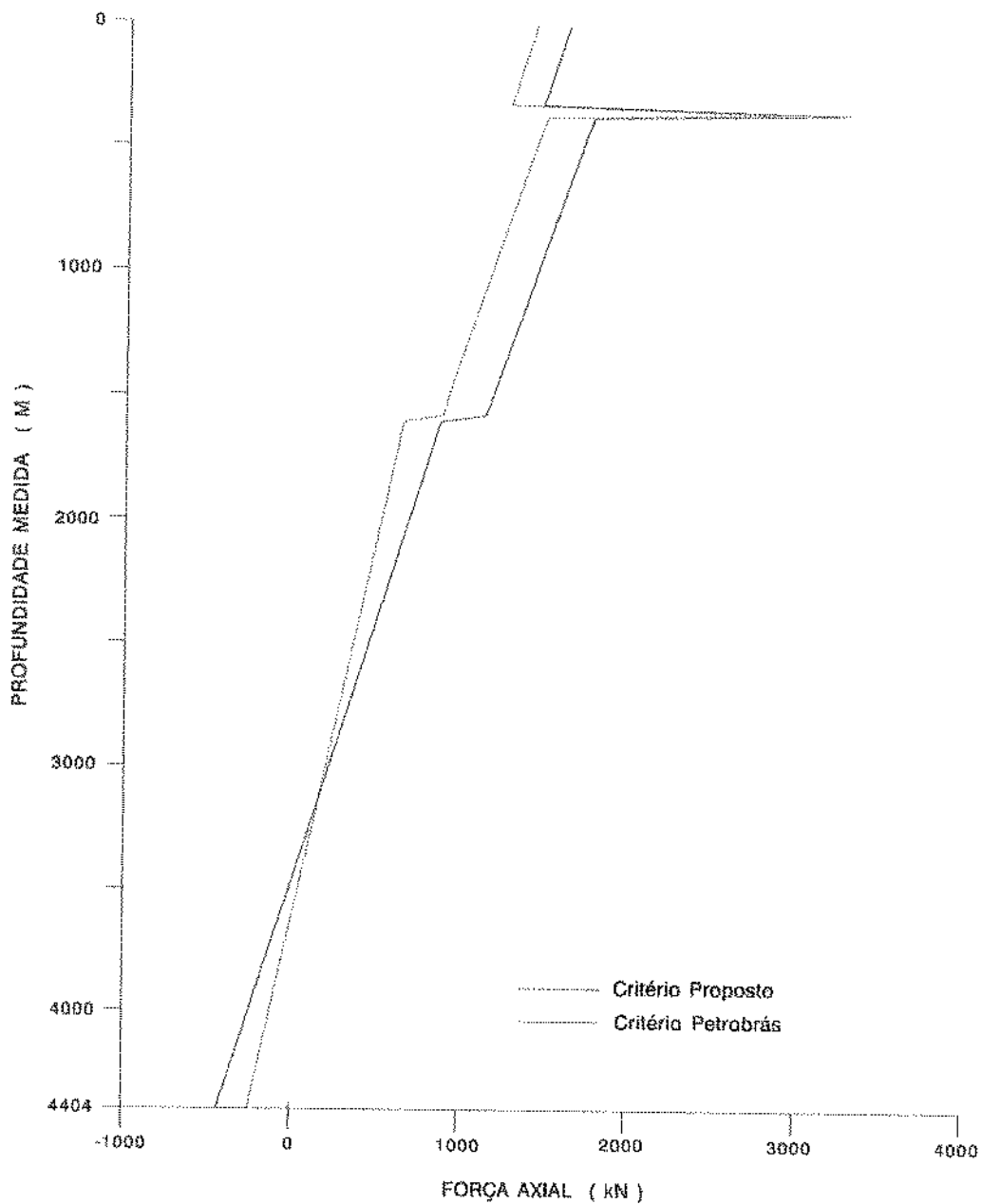


Figura 10 - Força Axial na coluna ao longo da trajetória do poço.

Atualmente existem muitos programas de cálculo de esforços em colunas de revestimento à disposição no mercado. Esses programas além das considerações normais de cálculo, também analisam as variações que ocorrem na temperatura e na pressão, nas diferentes intervenções que possam ser realizadas no poço, o que permite que se determine de modo preciso as máximas força axial, pressões e as variações dessas grandezas. Com isto é importante que os projetistas passem a considerar a redução dos coeficientes de projeto, principalmente o coeficiente de dimensionamento à tração, cujo valor historicamente tem sido alto para atender possíveis picos de tensão não previstos nos cálculos.

CAPÍTULO VI
MÉTODOS DE SELEÇÃO DE REVESTIMENTO

Vários autores desenvolveram pesquisas que abordam o problema da otimização da seleção de tubos, com o objetivo de se determinar a coluna de revestimento que tenha o menor custo ou o menor peso, que pode ser empregada sob às condições encontradas no poço ⁽⁶⁾, ⁽¹⁸⁾.

Basicamente, os métodos resultantes desses estudos, e que são sugeridos para serem aplicados ao problema da seleção de tubos são:

1. Método do Mínimo Peso
2. Método do Mínimo Custo
3. Método do Mínimo Custo Global

O modelo criado neste trabalho para a aplicação desses métodos ao problema da otimização da seleção de tubos, foi elaborado de forma a funcionar separado do programa de cálculo

das tensões que atuam no revestimento. Assim tivemos a oportunidade de testá-lo com um programa de cálculo de cargas comercial ⁽²⁰⁾, e também com um módulo de cálculo de cargas mais simples (programa auxiliar de cargas), elaborado com base no método das cargas máximas ⁽¹⁴⁾, que permitiu que fossem analisadas as propostas apresentadas nos capítulos II, III, IV e V. O objetivo deste trabalho não é o de desenvolver um novo programa de cálculo de cargas, mas antes, apresentar propostas de cálculo para serem utilizadas em programas já existentes, e que são muitos. A figura 11, ilustra a estrutura do trabalho desenvolvido nesta tese.

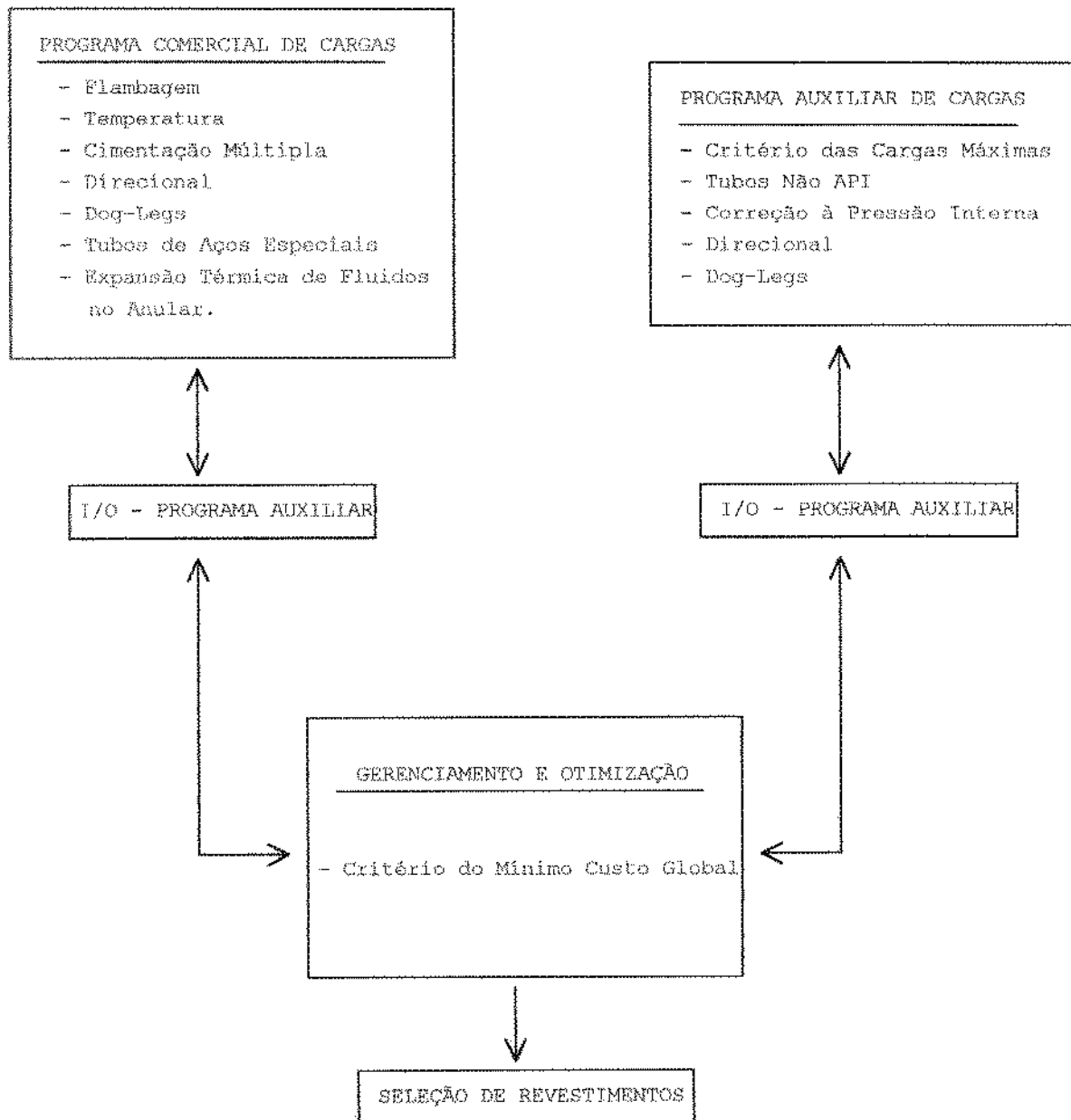


Figura 11 - Estrutura do Sistema de Dimensionamento e Otimização

O uso do programa comercial favoreceu no início dos trabalhos o desenvolvimento completo do módulo de gerenciamento e otimização. Depois de concluída esta fase é que foi desenvolvido o programa auxiliar de cálculo de cargas, com a finalidade de testar os procedimentos aqui propostos. Finalmente foi feito o acoplamento do programa auxiliar de cálculo de cargas com o módulo de gerenciamento e otimização para verificar o funcionamento em conjunto de todas as rotinas.

DESCRIÇÃO DOS MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO

- MÉTODO DO MÍNIMO PESO :

Este método tem por objetivo determinar a coluna de menor custo final dentre as mais leves, capazes de suportarem os máximos esforços que podem ocorrer durante a vida útil do poço. Para cada trecho em estudo da coluna, denominado comprimento mínimo de seção, fig. (12), são selecionados os tubos de menor peso que atendem as exigências do problema. Antes de passar para o trecho seguinte, é escolhido, dentre os selecionados, o tubo de menor preço que irá compor a seção de revestimento dentro do trecho estudado.

O custo total da coluna de menor peso é dado por:

$$C_{T_{MIN}} = \min [C_T(Q_{T_{MIN}})]_m \quad (38)$$

$$Q_{T_{MIN}} = \min(Q_T)_m \quad (39)$$

$$Q_{T_m} = \sum_{n=1}^R L_n \cdot q_n \quad (40)$$

$$C_{T_m} = \sum_{n=1}^R L_n \cdot S_n \quad (41)$$

onde:

S → custo unitário do tubo, US\$/m [US\$/ft]

R → número de seções que compõem a coluna

C_T → custo total da coluna, US\$

Q_T → peso total da coluna, N [lbf]

m → total de colunas com mínimo peso ou mínimo custo

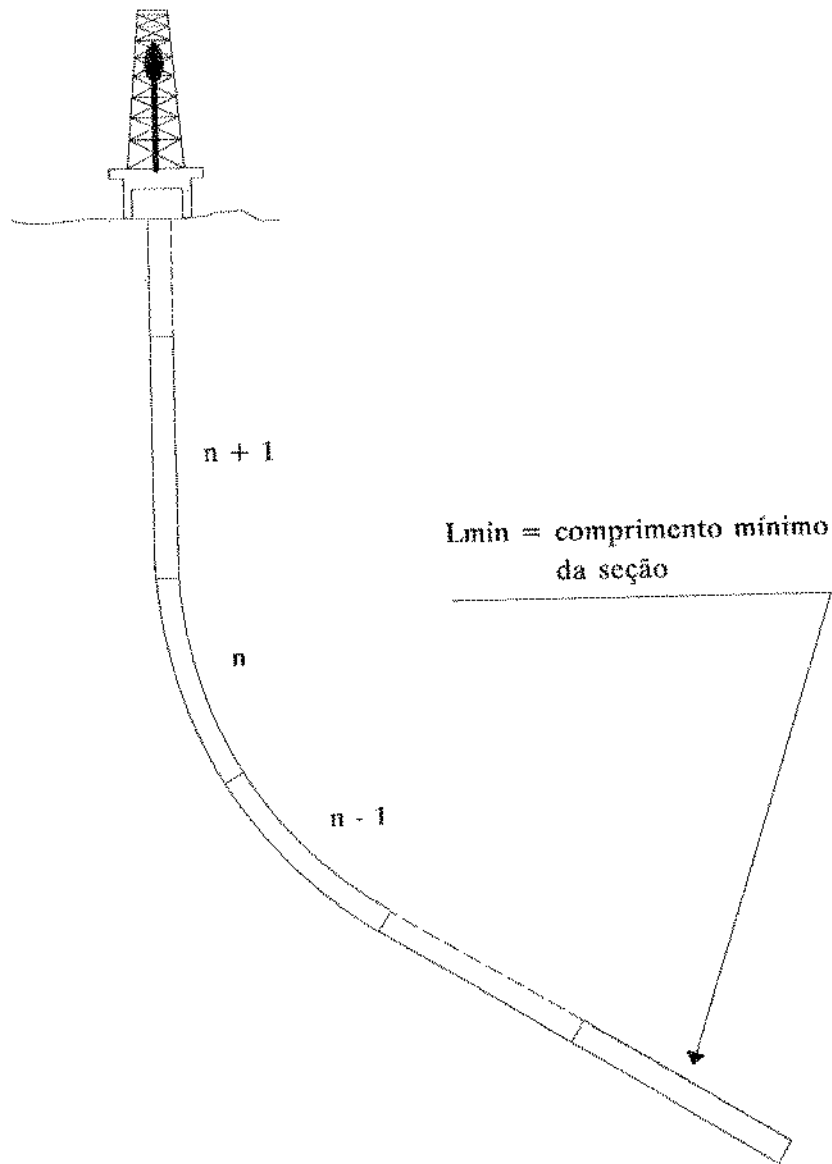


Figura 12 - Discretização da coluna de revestimento em comprimentos mínimos de seção ⁽⁹⁾.

* MÉTODO DO MÍNIMO CUSTO :

Este método tem por objetivo determinar a coluna de menor custo dentre todas as colunas capazes de suportarem os máximos esforços de cálculo previstos. Para cada trecho em estudo na composição da coluna, de comprimento igual ao comprimento mínimo de seção, é selecionado o tubo de menor preço que atende as exigências do problema. Caso existam mais de um tubo com preço igual ao preço mínimo, então será escolhido o tubo de menor peso que tenha o preço mínimo.

O custo total da coluna de menor custo é dado por:

$$C_{\text{men}} = \min \left(\sum_{n=1}^M L_n \cdot S_n \right)_{\text{m}} \quad (42)$$

A existência dos métodos " 1 " e " 2 ", é justificada pelo fato de não ser possível minimizar o peso total e custo final de uma coluna de revestimento simultaneamente.

• MÉTODO DO MÍNIMO CUSTO GLOBAL :

O método do mínimo custo global ⁽³⁾, usa os mesmos princípios dos dois métodos anteriores e ainda, a cada trecho em estudo, considera para a análise todos os tubos mais leves que o mais barato e todos os tubos mais baratos que o mais leve, capazes de suportarem os máximos esforços de cálculo previstos de ocorrerem. A figura 13 mostra o critério de seleção deste método empregado a cada estágio da otimização.

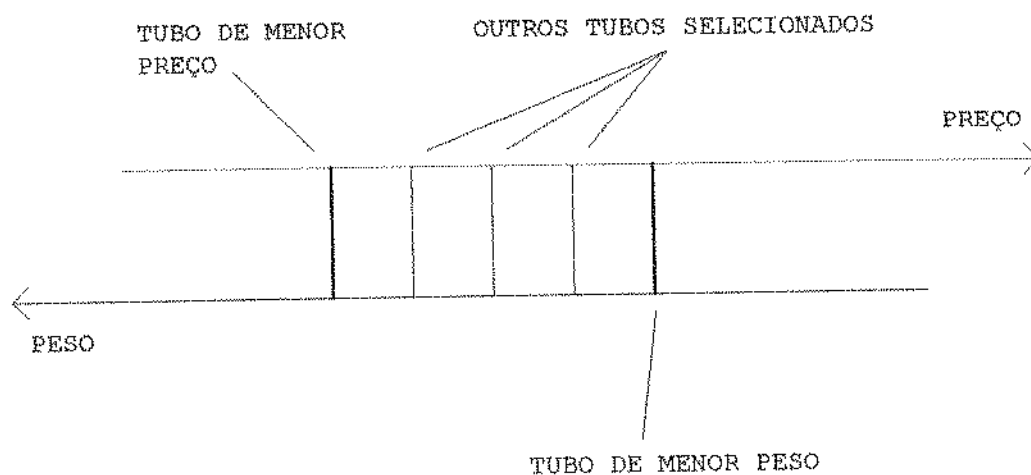


Figura 13 - Critério de seleção de tubos do método do mínimo custo global.

Este método pesquisa a hipótese da existência de uma coluna que atende aos máximos esforços de cálculo, cujo preço final seja menor que aquele determinado pelo método do mínimo custo, quando aplicados ao mesmo problema.

Justifica-se tal hipótese pelo seguinte fato: caso os tubos determinados pelo método do mínimo custo para as seções da porção inferior da coluna forem diferentes daqueles determinados pelo método do mínimo peso, então os tubos escolhidos pelo método do mínimo custo são mais pesados. Se tubos mais pesados são utilizados na porção inferior da coluna, maiores esforços axiais ocorrerão na porção superior. Assim é possível que seja necessário utilizar tubos mais nobres (mais caros), na porção superior da coluna, para suportar tais esforços. Isto pode fazer com que o preço final da coluna determinada pelo método do menor custo, seja maior que o de uma das várias colunas selecionadas pelo método do mínimo custo global. A figura 14 mostra a evolução do custo acumulado das colunas para os três métodos apresentados, supondo que existe a solução proposta pelo método do mínimo custo global.

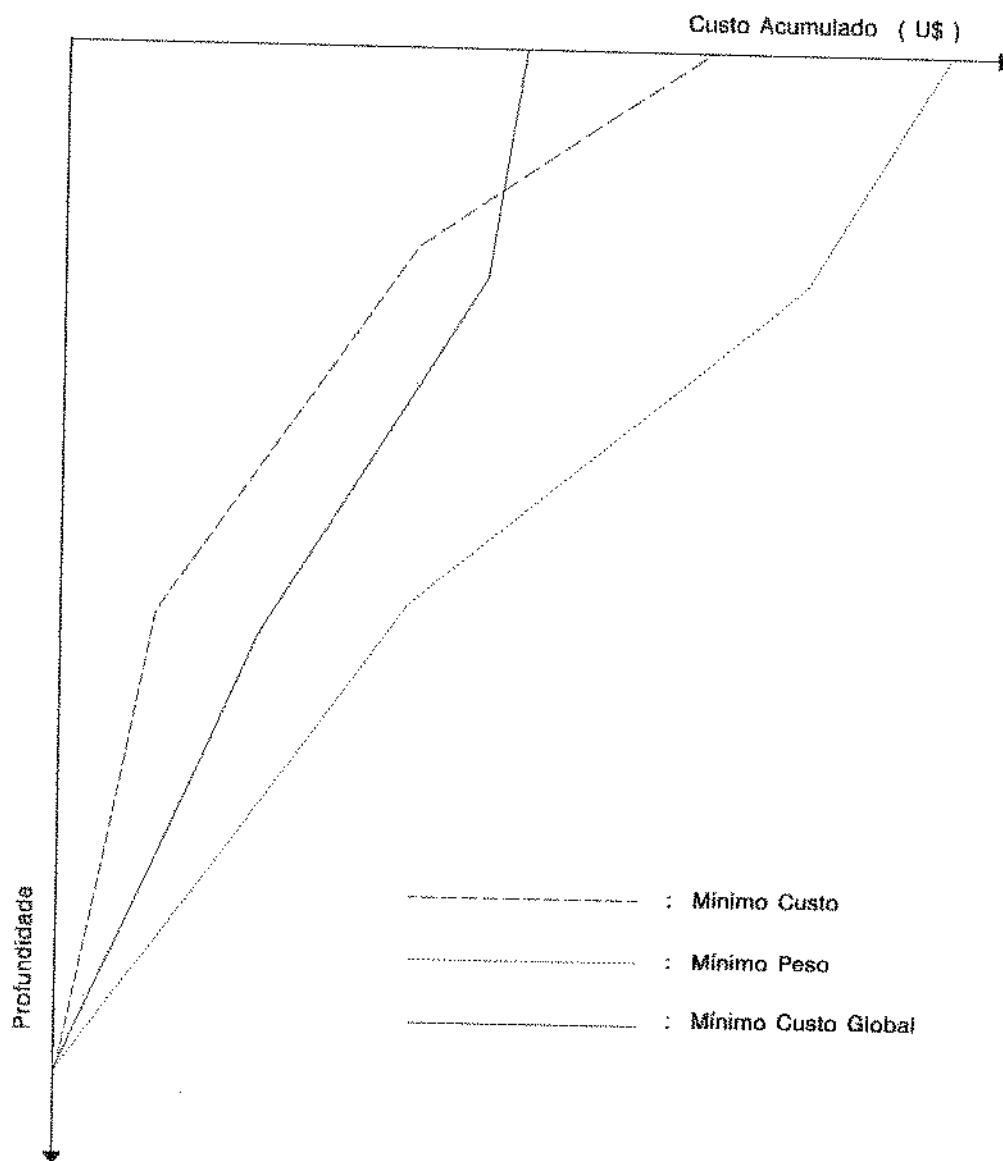


Figura 14 - Custo acumulado x Profundidade, para os três métodos de seleção.

CAPÍTULO VII

DESCRIÇÃO DO MÓDULO DE GERENCIAMENTO E OTIMIZAÇÃO

O modelo desenvolvido para o módulo de gerenciamento e otimização utiliza o método do mínimo custo global como rotina de seleção de tubos. Dessa forma ao completar o dimensionamento, teremos três respostas possíveis para o problema.

1. O problema apresenta duas soluções: Nesse caso uma das soluções é a coluna de menor peso e outra será a coluna de menor custo global.

2. O problema apresenta uma solução: no caso de solução única, a coluna de menor custo global tem o mesmo peso que a coluna de menor peso.

3. O problema não apresenta solução: Nesse caso as condições reinantes no poço são extremamente severas para os tipos de tubos que dispomos para a utilização. Portanto será necessário experimentar outros tubos .

O elemento principal de controle do módulo de otimização é o comprimento mínimo de seção, mostrado na figura (12). A necessidade de se estabelecer um comprimento mínimo de seção é puramente operacional, pois por exemplo, não é interessante termos uma seção de revestimento formada por três ou quatro tubos, fazendo parte de uma coluna de revestimento composta de varias seções que tenham comprimento muito grande em relação àquela seção curta.

Durante o processo de composição da coluna de revestimento, que se inicia a partir da extremidade inferior da coluna, são testados dentro de cada trecho em estudo, todos os tubos disponíveis para uso. A extensão desse trecho é sempre igual ao comprimento mínimo (L_{min}) da seção de revestimento, exceto nos casos onde o tubo que estiver sendo testado for igual aos tubos que compõem a seção anterior a que está sendo dimensionada.

Nesse modelo são determinadas várias composições de coluna que atendem as exigências do problema. Exigências do problema, nesse caso, significa que dentro de cada comprimento mínimo de seção analisado pelo modelo, os fatores de segurança à tração, pressão interna, colapso e triaxial, devem ser maiores ou iguais aos respectivos fatores de projeto estabelecidos no projeto do poço.

O modelo foi montado de forma a permitir a pesquisa da influência da variação do tamanho do comprimento mínimo de seção sobre o custo ou peso final da coluna de revestimento. Foram determinadas soluções para diferentes valores de comprimento

mínimo de seção, para um mesmo problema, e os resultados podem ser vistos no cap VIII.

A seguir é apresentado o fluxograma do sistema de otimização empregado para o dimensionamento de uma coluna de revestimento.

Fluxograma do Sistema de Dimensionamento e Seleção de Tubos

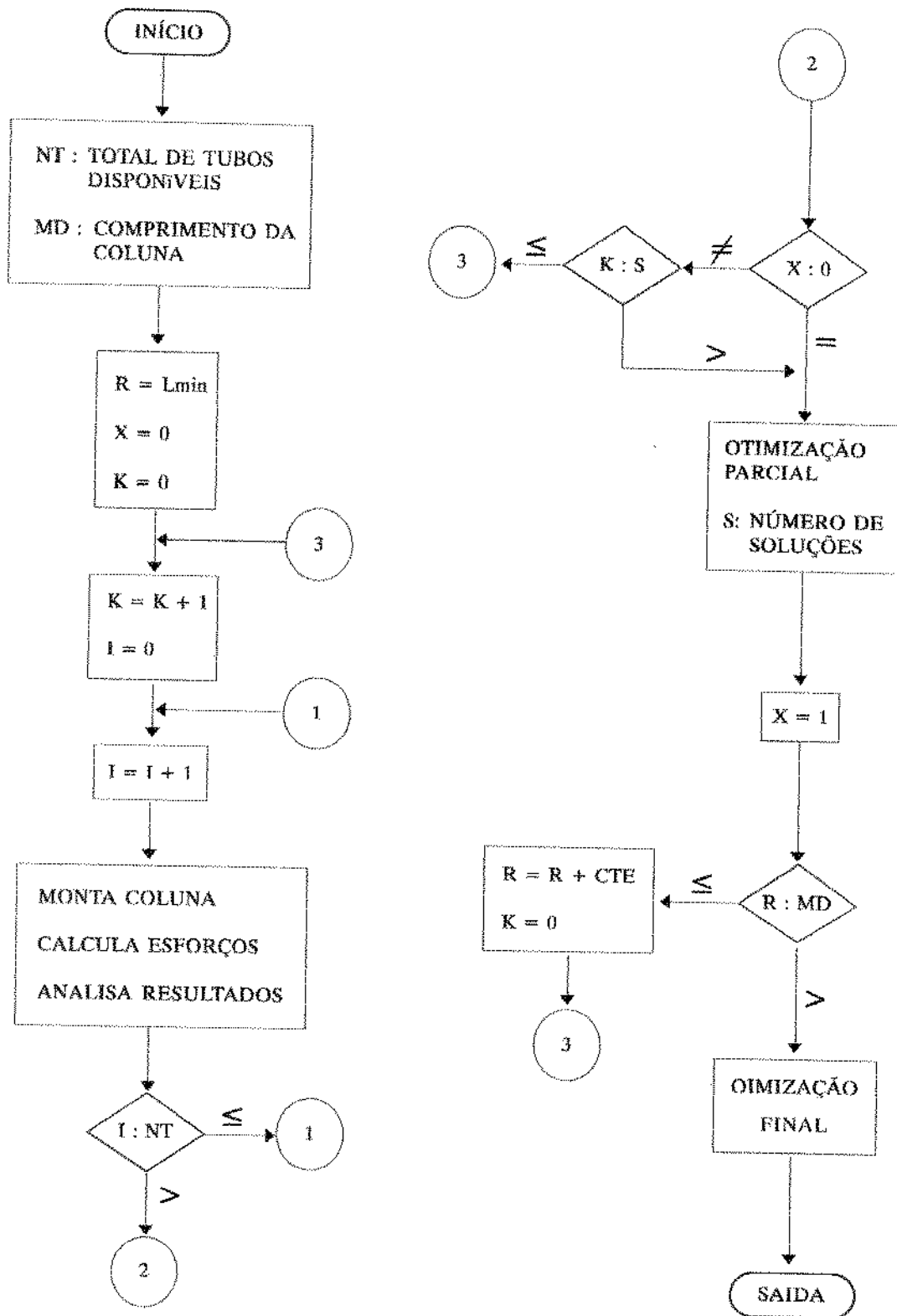


Figura 15

CAPÍTULO VIII
RESULTADOS DE DIMENSIONAMENTO

Neste capítulo apresentamos os resultados do dimensionamento de uma coluna de revestimento de produção para um poço direcional e para um poço vertical. A determinação das cargas atuantes foi feita com base no método das cargas máximas ⁽¹⁴⁾.

O dimensionamento e cálculo da resistência dos tubos foram feitos para quatro diferentes critérios:

1 - Critério API: Corrige a resistência ao colapso dos tubos devida à tração de acordo com a norma API BUL 5C3 ⁽¹⁾. Não corrige a resistência à pressão interna.

2 - Critério API Modificado: Corrige a resistência ao colapso dos tubos devida à tração de acordo com a norma API BUL 5C3 e ainda corrige proporcionalmente a resistência ao colapso dos " tubos não API ", como indicado no capítulo III.

3 - Critério API com correção da resistência à pressão interna devido à tração: Corrige a resistência ao colapso dos

tubos de acordo com a norma API BUL 5C3, e corrige a resistência à pressão interna como indicado no capítulo IV.

4 - Critério API Modificado com correção da resistência à pressão interna devido à tração: corrige a resistência ao colapso da mesma forma que no segundo critério, e corrige a resistência à pressão interna como no terceiro critério.

Nestes exemplos, para cada critério escolhido, o dimensionamento da coluna foi repetido para diferentes valores de comprimento mínimo de seção.

Para cada valor de comprimento mínimo de seção resultaram duas colunas que atendem às exigências do problema. Uma é a coluna de menor peso e a outra é a coluna de menor custo global. As características mecânicas dos tubos utilizados nestes exemplos estão listadas na tabelas 3 e 7.

TABELA 3 - Preço e características mecânicas de tubos com diâmetro nominal de 7 polegadas e conexão buttress, usados no exemplo de dimensionamento do poço direcional.

GRAU	PESO Lb/ft	DIÂMETRO INTERNO in	COLAPSO psi	BURST psi	TRAÇÃO 1000*lb _f	PREÇO U\$/m
J55	23.0	6.366	3270	4360	366	40.58
K55	23.0	6.366	3270	4360	366	44.07
N80	23.0	6.366	3830	6340	532	49.41
C95	23.0	6.366	4140	7530	632	55.58
L80	23.0	6.366	3830	6340	532	55.95
C75	23.0	6.366	3750	5940	499	61.44
SS95	23.0	6.366	5650	6340	532	68.74
J55	26.0	6.276	4320	4980	415	43.56
K55	26.0	6.276	4320	4980	415	49.09
N80	26.0	6.276	5410	7240	604	55.57
C95	26.0	6.276	5880	8600	717	62.82
L80	26.0	6.276	5410	7240	604	63.25
C75	26.0	6.276	5220	4790	566	68.48
P110	26.0	6.276	6230	9960	830	73.11
SS95	26.0	6.276	7800	7240	604	74.71
N80	29.0	6.184	7020	8160	676	62.32
C95	29.0	6.184	7830	9690	803	70.07
L80	29.0	6.184	7020	8160	676	70.55
C75	29.0	6.184	6730	7650	634	74.40
P110	29.0	6.184	8530	11220	929	79.43
SS95	29.0	6.184	9200	8160	676	81.33
V150	29.0	6.184	9800	15300	1243	97.03
N80	32.0	6.094	8610	9060	745	68.77
C95	32.0	6.094	9750	10050	885	77.33
L80	32.0	6.094	8610	9060	745	77.85
C75	32.0	6.094	8200	7930	699	81.65
P110	32.0	6.094	10780	11640	1025	87.17
SS95	32.0	6.094	10400	8460	745	89.51
V150	32.0	6.094	13020	15870	1370	106.48
N80	35.0	6.004	10180	8460	814	75.21
C95	35.0	6.004	11650	10050	920	84.57
L80	35.0	6.004	10180	8460	734	85.15
C75	35.0	6.004	9670	7930	763	89.31
P110	35.0	6.004	13020	11640	1096	95.34
V150	35.0	6.004	16230	15870	1402	116.47
N80	38.0	5.920	11390	8460	877	81.66
C95	38.0	5.920	13440	10050	920	91.82
L80	38.0	5.920	11390	8460	833	92.45
C75	38.0	5.920	10680	7930	822	96.96
P110	38.0	5.920	15140	11640	1096	103.52
SS95	38.0	5.920	12700	8460	876	107.70
V150	38.0	5.920	19240	15870	1402	126.45

** dados da tabela em unidades de campo.

dados do poço e da coluna para o exemplo de dimensionamento do poço direcional:

- diâmetro do revestimento :	177.8 mm	(7 polegadas)
- profundidade vertical da sapata :		2500 m
- afastamento lateral da sapata :		3200 m
- profundidade medida da sapata :		4421 m
- kick-of-point (KOP) :		350 m
- taxa de build-up :	1,6°/30.5 m	(\cong 1.6°/100 ft)
- profundidade medida no final do build-up:		1578 m
- dog-leg :	9°/30.5 m	(\cong 9°/100 ft)
- profundidade do dog-leg :		350 m
- peso específico da lama externa ao revest. :	1665,5 kg/m ³	(13.9 lbm/gal)
- peso específico da lama interna ao revest. :	1437.9 kg/m ³	(12.0 lbm/gal)
- gradiente de fratura da formação :	21,47 kPa/m	(0,936 psi/ft)
- gradiente de pressão da formação :	13,8 kPa/m	(0,598 psi/ft)
- peso específico da pasta de cimento:	1845,3 kg/m ³	(15.4 lbm/gal)
- profundidade do topo do cimento :		2200 m

O peso dos tubos nos resultados do dimensionamento apresentados a seguir, está expresso em unidade de campo (lbf/ft). A tabela abaixo mostra a equivalência desses pesos no sistema de unidade SI.

Tabel 4 - Equivalência de peso em unidades de campo e em unidades SI

Peso	
unidade de campo (lbf/ft)	unidade SI (N/m)
23	335,57
26	379,34
29	423,11
32	466,88

Resultados do dimensionamento feito pelo critério API.

diâmetro nominal : 177,8 mm (7 polegadas)

profundidade da base e do topo da seção : m

comprimento mínimo de seção (L_{min}) : m

GRAU	PESO	CONEXÃO	BASE / TOPO	L _{min}
C95	23.0	BUT	427 / 0	233
N80	23.0	BUT	1177 / 427	
C95	23.0	BUT	1427 / 1177	
SS95	26.0	BUT	2673 / 1427	
N80	29.0	BUT	4171 / 2673	
C95	29.0	BUT	4421 / 4171	

PESO TOTAL : 1691644 N (380297 lbf)
custo final (U\$) : 278675,0

C95	23.0	BUT	427 / 0
N80	23.0	BUT	1177 / 427
C95	23.0	BUT	1427 / 1177
N80	29.0	BUT	4171 / 1427
N80	32.0	BUT	4421 / 4171

CUSTO FINAL (U\$) : 262903,0
peso total : 1757149 N (395023 lbf)

GRAU	PESO	CONEXÃO	BASE / TOPO	Lmin
C95	23.0	BUT	627 / 0	466
N80	23.0	BUT	1102 / 627	
N80	26.0	BUT	1577 / 1102	
SS95	26.0	BUT	2523 / 1577	
N80	29.0	BUT	3946 / 2523	
C950	29.0	BUT	4421 / 3946	

PESO TOTAL : 1712436 N (384973 lbf)
 custo final (U\$) : 277522,0

C95	23.0	BUT	627 / 0
N80	23.0	BUT	1102 / 627
N80	26.0	BUT	1577 / 1102
N80	29.0	BUT	3496 / 1577
N80	32.0	BUT	4421 / 3496

CUSTO FINAL (U\$) : 265175,0
 peso total : 1774661 N (398960 lbf)

GRAU	PESO	CONEXÃO	BASE / TOPO	Lmin
C95	23.0	BUT	877 / 0	699
N80	26.0	BUT	1577 / 877	
SS95	26.0	BUT	2298 / 1577	
N80	29.0	BUT	3698 / 2298	
C95	29.0	BUT	4421 / 3698	

PESO TOTAL : 1732137 N (389402 lbf)
 custo final (U\$) : 279644,0

C95	23.0	BUT	877 / 0
N80	26.0	BUT	1577 / 877
N80	29.0	BUT	3698 / 1577
N80	32.0	BUT	4421 / 3698

CUSTO FINAL (U\$) : 269762,0
 peso total : 1795368 N (403615 lbf)

GRAU	PESO	CONEXÃO	BASE / TOPO	Lmin
N80	26.0	BUT	1577 / 0	932
SS95	26.0	BUT	2523 / 1577	
N80	29.0	BUT	3473 / 2523	
C95	29.0	BUT	4421 / 4421	

PESO TOTAL : 1760686 N (395820 lbf)
 custo final (U\$) : 284438,0

N80	26.0	BUT	1577 / 0
N80	29.0	BUT	3473 / 1577
C95	29.0	BUT	4421 / 3473

CUSTO FINAL (U\$) : 272712,0
 peso total : 1802111 N (405131 lbf)

GRAU	PESO	CONEXÃO	BASE / TOPO	Lmin
SS95	26.0	BUT	2073 / 0	1165
N80	29.0	BUT	3248 / 2073	
C95	29.0	BUT	4421 / 3248	

PESO TOTAL : 1780395 N (400249 lbf)
 custo final (U\$) : 310320,0

N80	29.0	BUT	3248 / 0
N80	32.0	BUT	4421 / 3248

CUSTO FINAL (U\$) : 283091,0
 peso total : 1922520 N (432200 lbf)

Resultados do dimensionamento feito pelo critério API modificado.

diâmetro nominal : 177,8mm (7 polegadas)
 profundidade da base e do topo da seção : m
 comprimento mínimo de seção (Lmin) : m

GRAU	PESO	CONEXÃO	BASE / TOPO	Lmin
C95	23.0	BUT	427 / 0	233
N80	23.0	BUT	1177 / 427	
C95	23.0	BUT	1427 / 1177	
SS95	26.0	BUT	4421 / 1427	

PESO TOTAL : 1615113 N (363092 lbf)
 custo final (U\$) : 298403,0

C95	23.0	BUT	427 / 0
N80	23.0	BUT	1177 / 427
C95	23.0	BUT	1427 / 1177
N80	29.0	BUT	4171 / 1427
N80	32.0	BUT	4421 / 4171

CUSTO FINAL (U\$) : 262903,0
 peso total : 1757149 N (395023 lbf)

GRAU	PESO	CONEXÃO	BASE / TOPO	Lmin
C95	23.0	BUT	627 / 0	466
N80	23.0	BUT	1102 / 627	
SS95	23.0	BUT	1577 / 1102	
SS95	26.0	BUT	4421 / 1157	

PESO TOTAL : 1608535 N (361615 lbf)
 custo final (U\$) : 303478,0

C95	23.0	BUT	627 / 0
N80	23.0	BUT	1102 / 627
N80	26.0	BUT	1577 / 1102
N80	29.0	BUT	3946 / 1577
N80	32.0	BUT	4421 / 3946

CUSTO FINAL (U\$) : 265175,0
 peso total : 1774653 N (398960 lbf)

GRAU	PESO	CONEXÃO	BASE / TOPO	Lmin
C95	23.0	BUT	877 / 0	699
SS95	23.0	BUT	1577 / 877	
SS95	26.0	BUT	4421 / 1577	

PESO TOTAL : 1608535 N (361615 lbf)
custo final (U\$) : 309361,0

C95	23.0	BUT	877 / 0
N80	26.0	BUT	1577 / 877
N80	29.0	BUT	3698 / 1577
N80	32.0	BUT	4421 / 3698

CUSTO FINAL (U\$) : 269762,0
peso total : 1795368 N (403615 lbf)

GRAU	PESO	CONEXÃO	BASE / TOPO	Lmin
N80	26.0	BUT	1577 / 0	932
SS95	26.0	BUT	4421 / 1577	

PESO TOTAL : 1677585 N (377138 lbf)
custo final (U\$) : 300613,0

N80	26.0	BUT	1577 / 0
N80	29.0	BUT	3473 / 1577
C95	29.0	BUT	4421 / 3473

CUSTO FINAL (U\$) : 272712,0
peso total : 1802111 N (405131 lbf)

Resultados do dimensionamento feito pelo critério API, com
correção da resistência à pressão interna

diâmetro nominal : 177,8 mm (7 polegadas)
profundidade da base e do topo da seção : m
comprimento mínimo de seção (Lmin) : m

GRAU	PESO	CONEXÃO	BASE / TOPO	Lmin
C95	23.0	BUT	427 / 0	233
N80	23.0	BUT	1177 / 427	
C95	23.0	BUT	1427 / 1177	
SS95	26.0	BUT	2673 / 1427	
N80	29.0	BUT	4171 / 2673	
C95	29.0	BUT	4421 / 4171	

PESO TOTAL : 1691637 N (380297 lbf)
 custo final (U\$) : 278675,0

C95	23.0	BUT	427 / 0
N80	23.0	BUT	1177 / 427
C95	23.0	BUT	1427 / 1177
N80	29.0	BUT	4171 / 1427
N80	32.0	BUT	4421 / 4171

CUSTO FINAL (U\$) : 2620930
 peso total : 1757141 N (395023 lbf)

GRAU	PESO	CONEXÃO	BASE / TOPO	Lmin
C95	23.0	BUT	627 / 0	466
N80	23.0	BUT	1102 / 627	
N80	26.0	BUT	1577 / 1102	
SS95	26.0	BUT	2523 / 1577	
N80	29.0	BUT	3946 / 2523	
C95	29.0	BUT	4421 / 3946	

PESO TOTAL : 1712444 N (384973 lbf)
 custo final (U\$) : 277522,0

C95	23.0	BUT	627 / 0
N80	23.0	BUT	1102 / 627
N80	26.0	BUT	1577 / 1102
N80	29.0	BUT	3946 / 1577
N80	32.0	BUT	4421 / 3946

CUSTO FINAL (U\$) : 265175,0
 peso total : 1774662 N (398960 lbf)

GRAU	PESO	CONEXÃO	BASE / TOPO	Lmin
C95	23.0	BUT	877 / 0	699
N80	26.0	BUT	1577 / 877	
SS95	26.0	BUT	2298 / 1577	
N80	29.0	BUT	3698 / 2298	
C95	29.0	BUT	4421 / 3698	

PESO TOTAL : 1732137 N (389402 lbf)
 custo final (U\$) : 279644,0

C95	23.0	BUT	877 / 0
N80	26.0	BUT	1577 / 877
N80	29.0	BUT	3698 / 1577
N80	32.0	BUT	4421 / 3698

CUSTO FINAL (U\$) : 269762,0
 peso total : 1795360 N (403615 lbf)

GRAU	PESO	CONEXÃO	BASE / TOPO	Lmin
N80	26.0	BUT	1577 / 0	932
SS95	26.0	BUT	2523 / 1577	
N80	29.0	BUT	3473 / 2523	
C95	29.0	BUT	4421 / 3473	

PESO TOTAL : 1760686 N (395820 lbf)
 custo final (U\$) : 284438,0

N80	26.0	BUT	1577 / 0
N80	29.0	BUT	3473 / 1577
C95	29.0	BUT	4421 / 3473

CUSTO FINAL (U\$) : 272712,0
 peso total : 1802103 N (405131 lbf)

Resultados do dimensionamento feito pelo critério API
 modificado, com correção da resistência à pressão interna

diâmetro nominal : 177,8 mm (7 polegadas)
 profundidade da base e do topo da seção : m
 comprimento mínimo de seção (Lmin) : m

GRAU	PESO	CONEXÃO	BASE / TOPO	Lmin
C95	23.0	BUT	427 / 0	233
N80	23.0	BUT	1177 / 427	
C95	23.0	BUT	1427 / 1177	
SS95	26.0	BUT	4421 / 1427	

PESO TOTAL : 1615106 N (363092 lbf)
 custo final (U\$) : 298403,0

C95	23.0	BUT	427 / 0
N80	23.0	BUT	1177 / 427
C95	23.0	BUT	1427 / 1177
N80	29.0	BUT	4171 / 1427
N80	32.0	BUT	4421 / 4171

CUSTO FINAL (U\$) : 262093,0
 peso total : 1757141 N (395023 lbf)

GRAU	PESO	CONEXÃO	BASE / TOPO	Lmin
C95	23.0	BUT	627 / 0	466
N80	23.0	BUT	1102 / 627	
SS95	23.0	BUT	1577 / 1102	
SS95	26.0	BUT	4421 / 1577	

PESO TOTAL : 1608536 N (361615 lbf)
 custo final (U\$) : 303478,0

C95	23.0	BUT	627 / 0
N80	23.0	BUT	1102 / 627
N80	26.0	BUT	1577 / 1102
N80	29.0	BUT	3946 / 1577
N80	32.0	BUT	4421 / 3946

CUSTO FINAL (U\$) : 265175,0
 peso total : 1774654 N (398960 lbf)

GRAU	PESO	CONEXÃO	BASE / TOPO	Lmin
C95	23.0	BUT	877 / 0	699
SS95	23.0	BUT	1577 / 1577	
SS95	26.0	BUT	4421 / 4421	

PESO TOTAL : 1608543 N (361615 lbf)
 custo final (U\$) : 309361,0

C95	23.0	BUT	877 / 0
N80	26.0	BUT	1577 / 877
N80	29.0	BUT	3698 / 1577
N80	32.0	BUT	4421 / 3698

CUSTO FINAL (U\$) : 269762,0
 peso total : 1174499 N (403615 lbf)

GRAU	PESO	CONEXÃO	BASE / TOPO	Lmin
N80	26.0	BUT	1577 / 0	932
SS95	26.0	BUT	4421 / 1577	

PESO TOTAL : 1677593 N (377138 lbf)
 custo final (U\$) : 300613,0

N80	26.0	BUT	1577 / 0
N80	29.0	BUT	3473 / 1577
C95	29.0	BUT	4421 / 3473

CUSTO FINAL (U\$) : 272712,0
 peso total : 1802104 N (405131 lbf)

Observamos nos resultados deste exemplo de dimensionamento, para os quatro critérios, que dependendo do comprimento mínimo da seção de revestimento utilizado, é possível ter uma coluna composta por até 6 seções diferentes de revestimento.

Não é adequado utilizar um número grande de seções para compor a coluna, pois isso acarreta uma série de problemas operacionais.

O número ideal de seções em uma coluna depende de seu comprimento, da logística e da análise de custos. É usual que colunas com até 5000 metros de comprimento, tenham no máximo 4 seções diferentes de tubos de revestimento.

A tabela 5 mostra os resultados do dimensionamento do exemplo para o caso de procurarmos a coluna de menor peso, composta por 4 seções diferentes. Os números que identificam os critérios seguem a mesma definição encontrada nas páginas 61 e 62.

Tabela 5 - coluna de menor peso nos 4 critérios de dimensionamento

critério	peso (N)	custo (U\$)	Lmin (m)
1	1760694	284438	932
2	1608543	303478	466
3	1760694	284438	932
4	1608543	303478	466

Na tabela 5 vemos que o critério API modificado e critério API modificado com correção da pressão interna nos darão a melhor solução para a coluna de menor peso composta por 4 seções.

Composição da coluna selecionada pelo método do menor peso:

GRAU	PESO	CONEXÃO	BASE / TOPO
C95	23.0	BUT	627 / 0
N80	23.0	BUT	1102 / 627
SS95	23.0	BUT	1577 / 1102
SS95	26.0	BUT	4421 / 1577

PESO TOTAL : 1608543 N (361615 lbf)
 custo final (U\$) : 303478,0

As figuras 16, 18 e 19 mostram os fatores de segurança à tração, burst e colapso respectivamente, calculados para essa coluna. A figura 17 também mostra o fator de segurança à tração para essa coluna, contudo numa faixa mais restrita de observação, para valores que variam de 0 (zero) à 20.

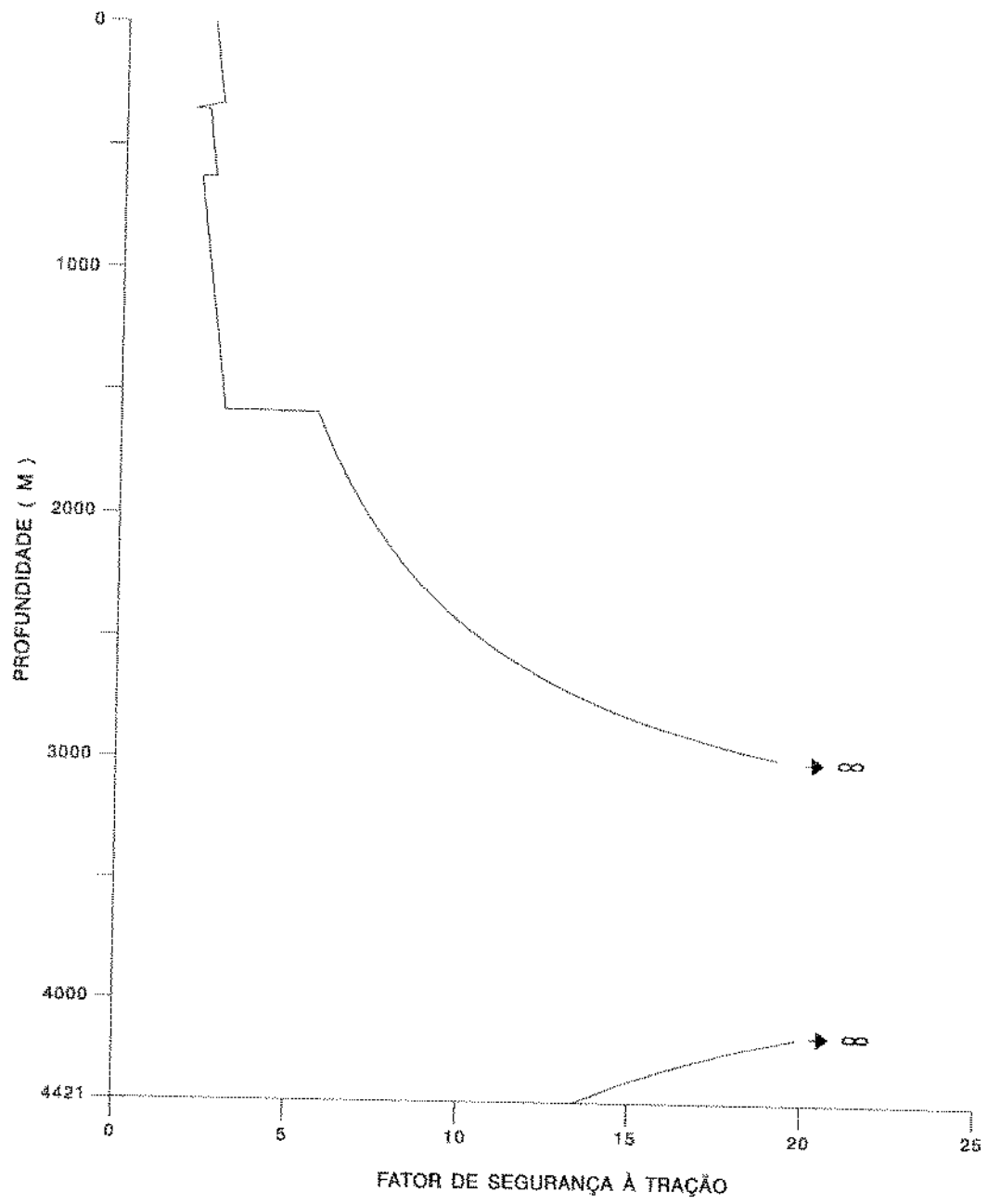


Figura 17



Figura 18

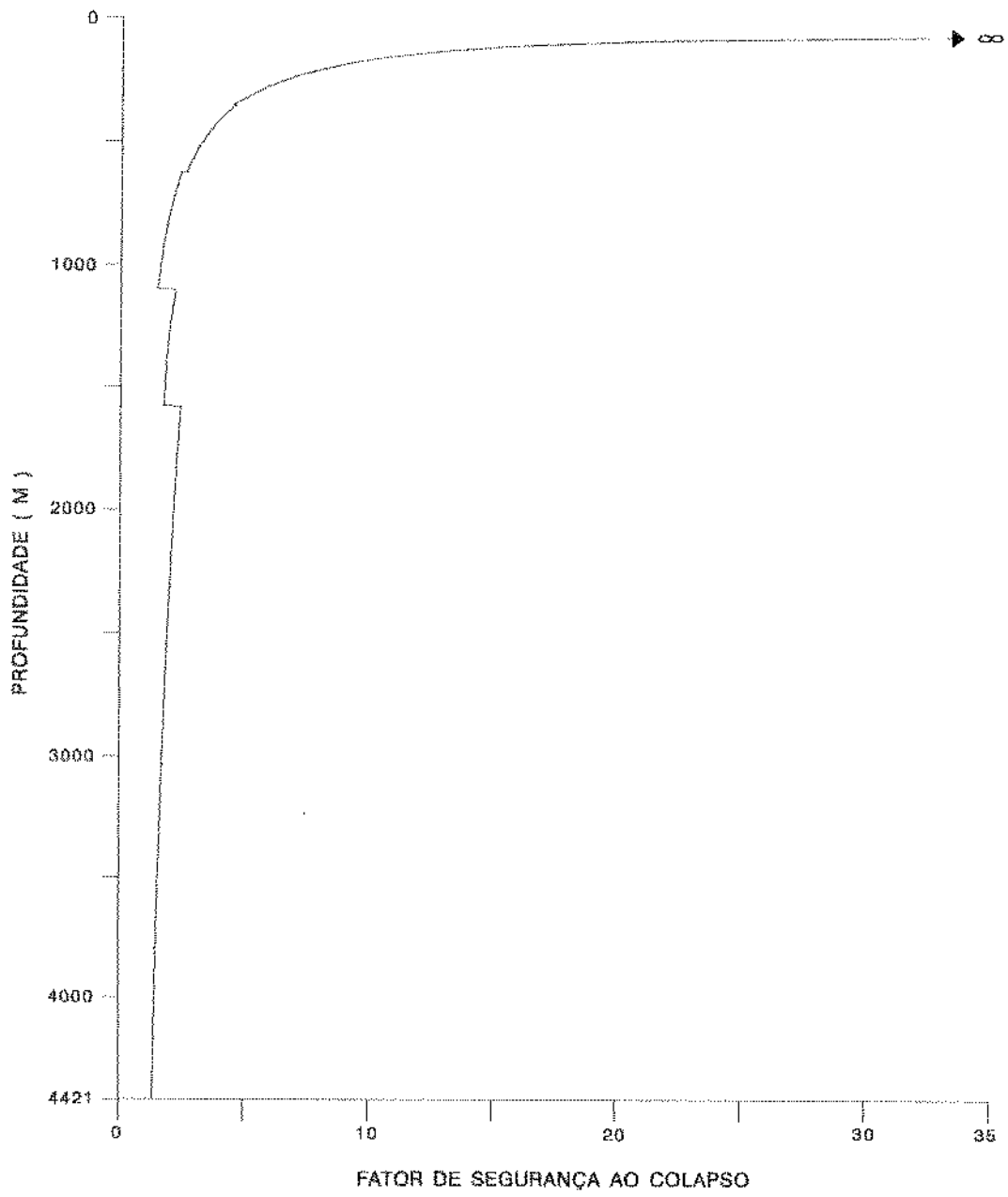


Figura 19

A tabela 6 mostra os resultados do dimensionamento do exemplo para o caso de procurarmos a coluna de menor custo global, composta por 4 seções. Os números que identificam os critérios seguem a mesma definição encontrada nas páginas 61 e 62.

Tabela 6 - coluna de menor custo global nos 4 critérios de dimensionamento

critério	custo (U\$)	peso (N)	Lmin (m)
1	269762	1795360	699
2	269762	1795360	699
3	269762	1795360	699
4	269762	1795360	699

Na tabela 6 vemos que os 4 critérios de dimensionamento nos dão a mesma solução para a coluna que apresenta o mínimo custo global, composta por 4 seções.

Composição da coluna escolhida pelo método do menor custo global:

GRAU	PESO	CONEXÃO	BASE / TOPO
C95	23.0	BUT	877 / 0
N80	26.0	BUT	1577 / 877
N80	29.0	BUT	3698 / 1577
N80	32.0	BUT	4421 / 3698

CUSTO FINAL (U\$) : 269762,0
 peso total : 1795360 N (403615 lbf)

As figuras 20, 22 e 23 mostram os fatores de segurança à tração, burst e colapso respectivamente, calculados para essa coluna. A figura 21 também mostra o fator de segurança à tração para essa coluna, contudo numa faixa mais restrita de observação, para valores que variam de 0 (zero) à 20.

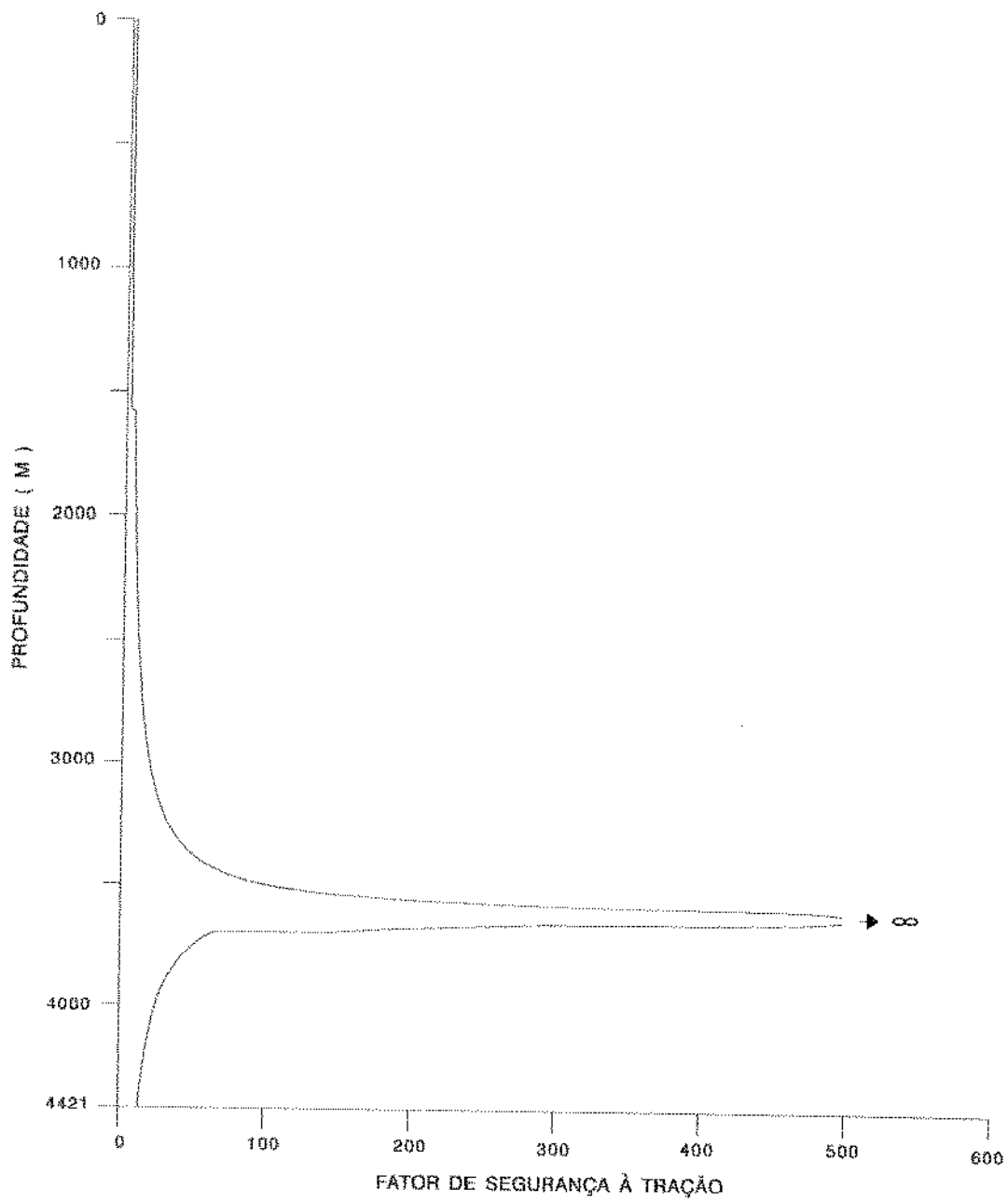


Figura 20

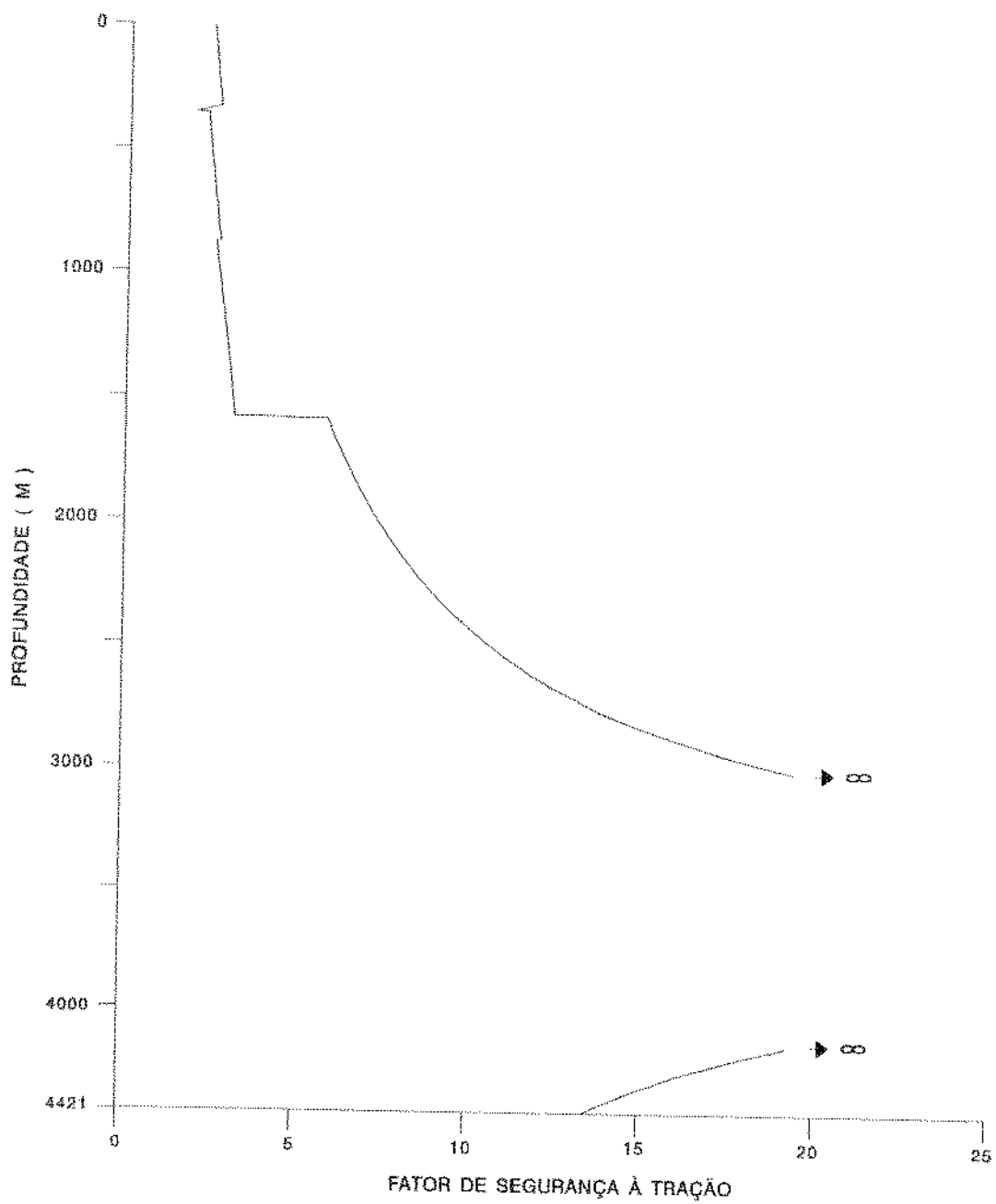


Figura 21

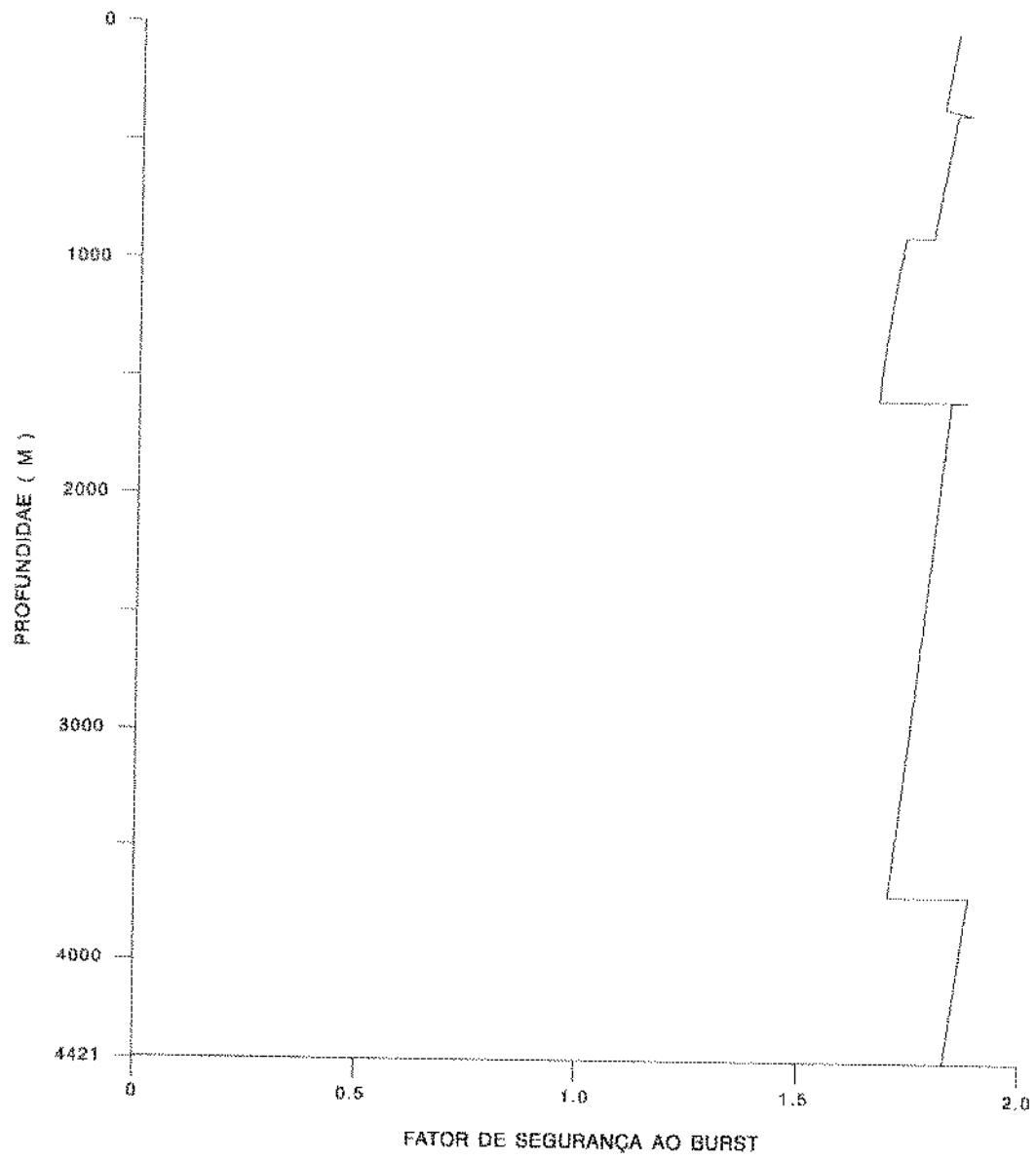


Figura 22

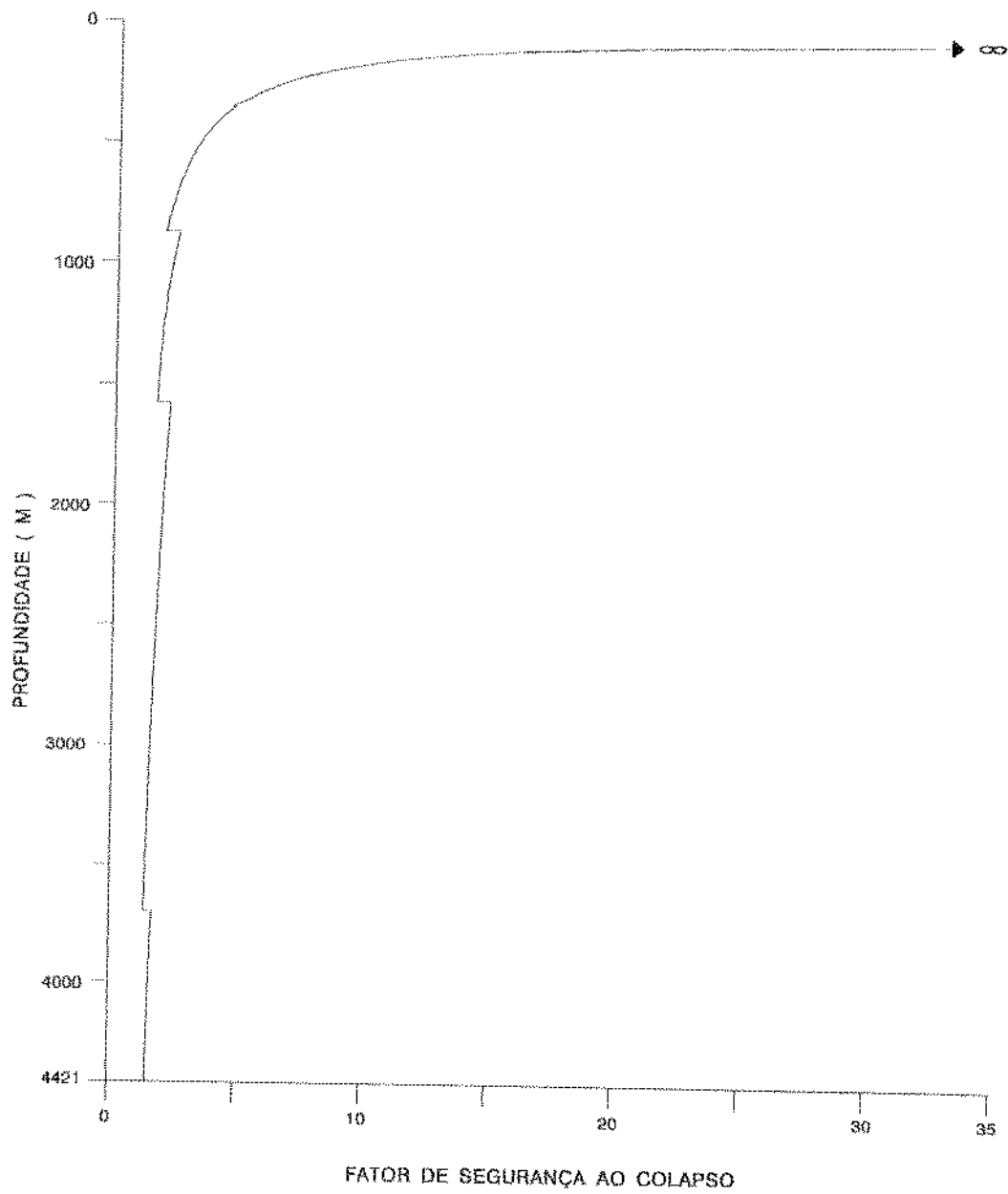


Figura 23

Resultados do dimensionamento da coluna de revestimento em um poço vertical.

A tabela 7 mostra as características mecânicas dos tubos usados neste exemplo.

TABELA 7 - Preço e características mecânicas de tubos com diâmetro nominal de 5 polegadas e conexão buttress, usados no exemplo de dimensionamento do poço vertical.

GRAU	PESO Lb/ft	DIÂMETRO		BURST psi	TRAÇÃO 1000*lbf	PREÇO U\$/m
		INTERNO in	COLAPSO psi			
K55	15.0	4.408	5560	5700	241	29.01
N80	15.0	4.408	7250	8290	350	33.58
L80	15.0	4.408	7250	8290	350	37.85
C95	15.0	4.408	8110	9840	481	39.57
SS95	15.0	4.408	9380	8290	350	40.23
P110	15.0	4.408	8850	11400	481	43.18
V150	15.0	4.408	10260	15540	651	52.74
N80	18.0	4.276	10500	9910	422	40.30
C95	18.0	4.276	12030	11770	501	47.48
SS95	18.0	4.276	11880	9910	422	48.27
P110	18.0	4.276	13470	13620	580	50.85
V150	18.0	4.276	16860	18580	785	62.12
N80	21.4	4.126	12760	9910	501	47.91
C95	21.4	4.126	15160	11770	563	56.45
P110	21.4	4.126	17550	13620	671	60.41
N80	23.2	4.044	13830	9910	537	51.94
SS95	23.2	4.044	15820	9910	537	62.22
N80	24.1	4.000	14400	9910	537	53.96
LS110	24.1	4.000	19800	13620	671	63.25
C95	24.1	4.000	17100	11770	510	63.72
V150	24.1	4.000	27000	18580	858	83.10

dados do poço e da coluna para o exemplo de dimensionamento do poço vertical:

- diâmetro do revestimento : 127.0 mm (5 polegadas)
- profundidade vertical da sapata : 6000 m
- peso específico da lama externa ao revest. : 1905.2 kg/m³
(15.9 lbm/gal)
- peso específico da lama interna ao revest. : 1689.5 kg/m³
(14.1 lbm/gal)
- gradiente de fratura da formação : 22,56 kPa/m
(0,983 psi/ft)
- gradiente de pressão da formação : 16.2 kPa/m
(0,702 psi/ft)
- peso específico da pasta de cimento: 1845,3 kg/m³
(15.4 lbm/gal)
- profundidade do topo do cimento : 5400 m

Neste exemplo procuramos a melhor solução para a coluna de menor peso e para a coluna de menor custo global, composta por no máximo 4 seções diferentes de tubos. Não serão apresentadas as composições das colunas para os diferentes valores de comprimento mínimo de seções, mas somente a melhor solução encontrada para cada caso.

Neste exemplo, os 4 critérios de dimensionamento apresentaram a mesma solução para a coluna de menor peso.

Composição da coluna de menor peso:

GRAU	PESO	CONEXÃO	BASE / TOPO
V150	15.0	BUT	3075 / 0
P110	18.0	BUT	4050 / 3075
V150	18.0	BUT	5350 / 4050
P110	21.4	BUT	6000 / 5350

PESO TOTAL : 1473837 N (331332 lbf)
 custo final (U\$) : 331818,0

As figuras 25 e 26 mostram os fatores de segurança ao burst e ao colapso respectivamente, calculados para essa coluna. A figura 24 mostra o fator de segurança à tração para essa coluna, para valores que variam de 0 (zero) à 10.

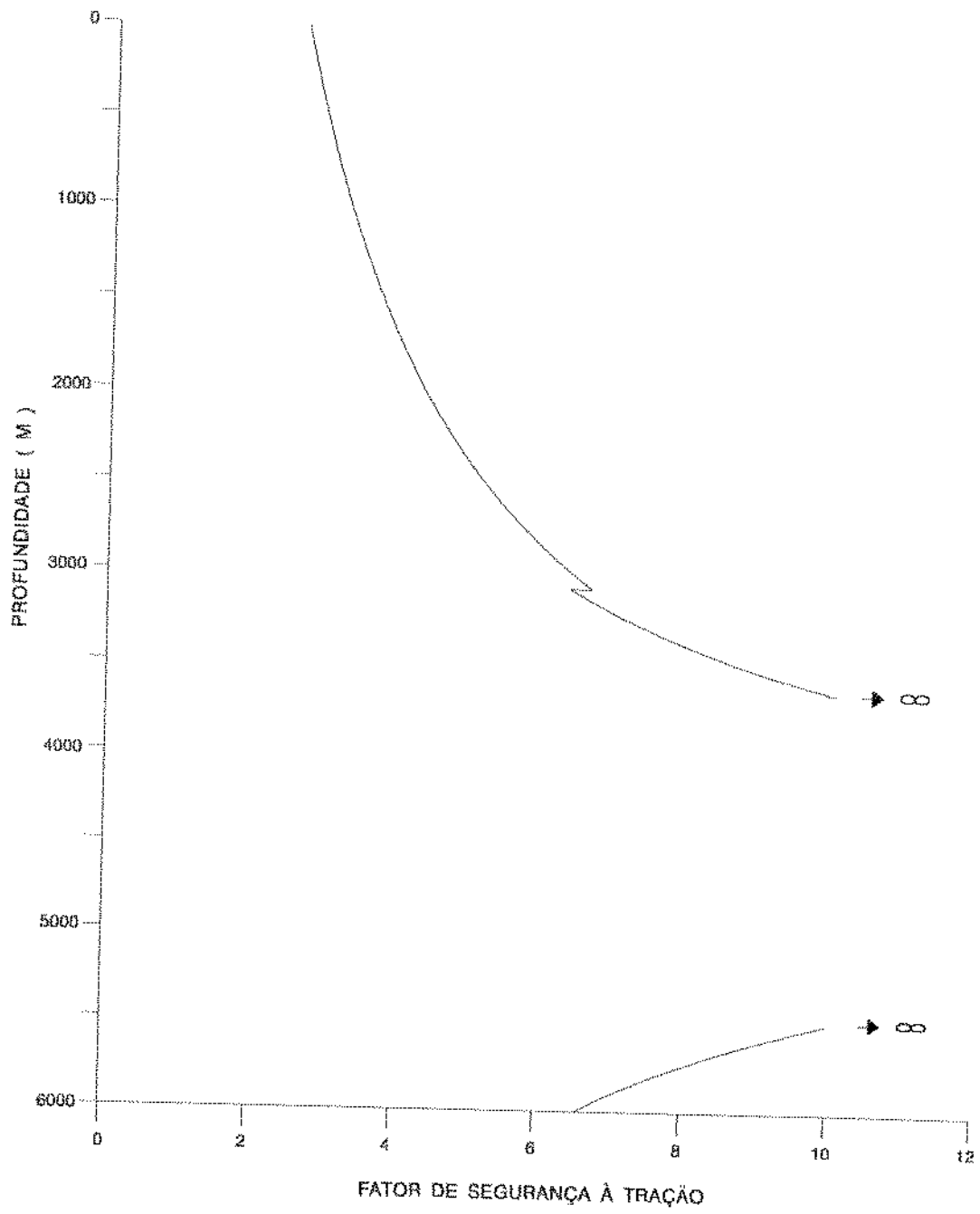


Figura 24

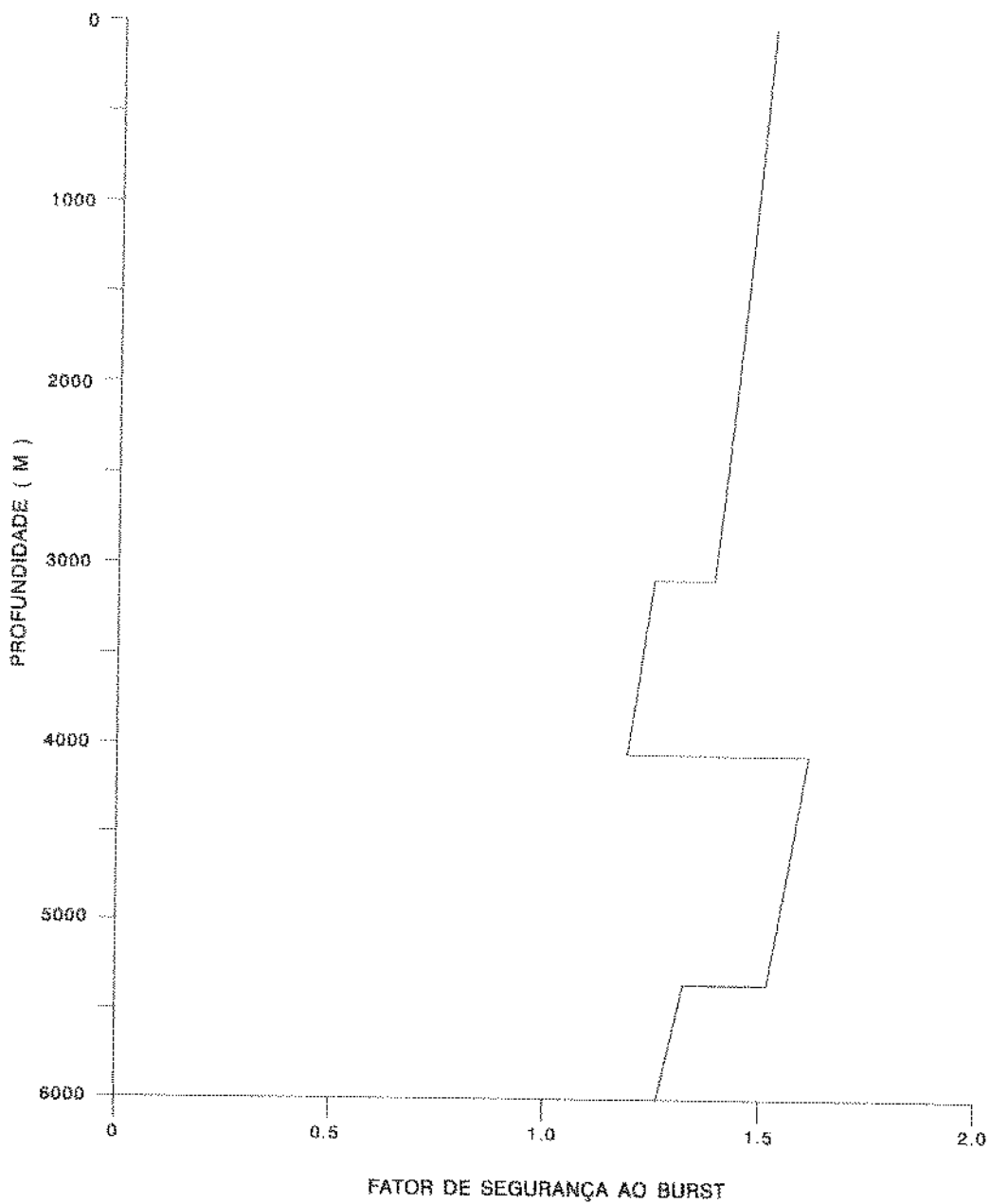


Figura 25

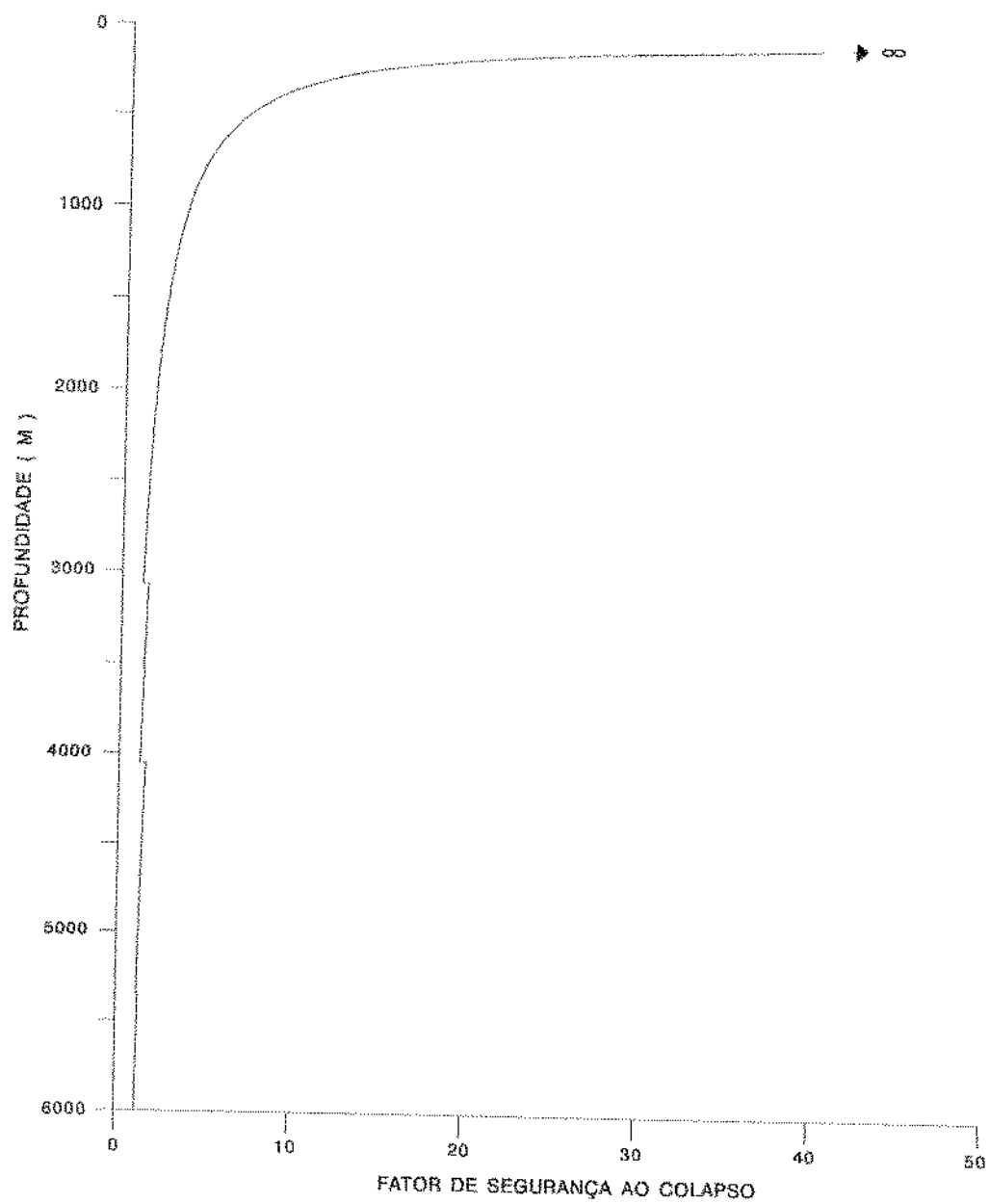


Figura 26

A coluna de menor custo global, para este exemplo de dimensionamento, foi determinada pelo critério API com correção da resistência à pressão interna.

Composição da coluna de menor custo global

GRAU	PESO	CONEXÃO	BASE / TOPO
C95	18.0	BUT	1450 / 0
P110	18.0	BUT	4050 / 1450
P110	21.4	BUT	6000 / 4050

CUSTO FINAL (U\$) : 318888,0
 peso total : 1672979 N (376101 lbf)

As figuras 28 e 29 mostram os fatores de segurança ao burst e ao colapso respectivamente, calculados para essa coluna. A figura 27 mostra o fator de segurança à tração para essa coluna, para valores que variam de 0 (zero) à 10.

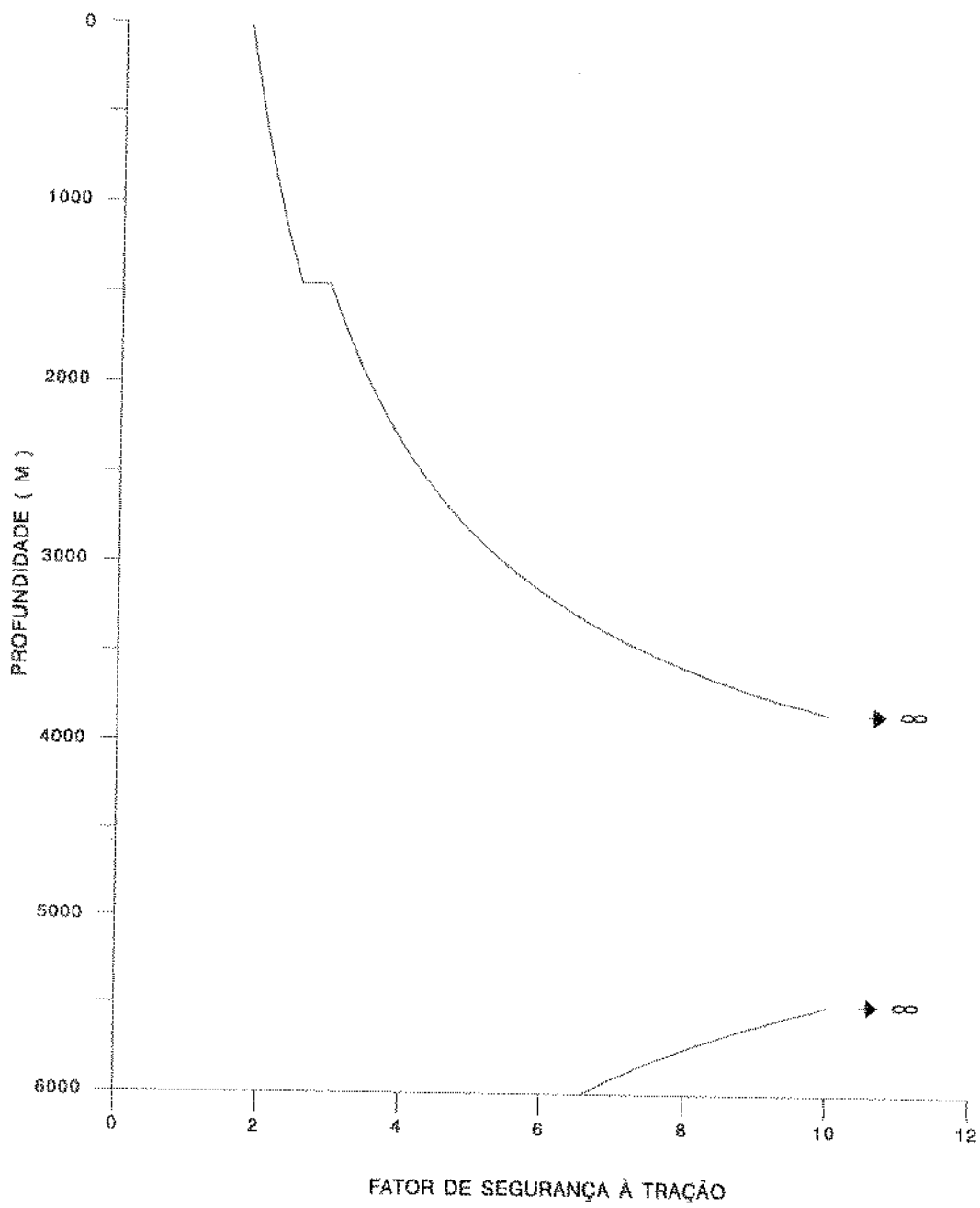


Figura 27

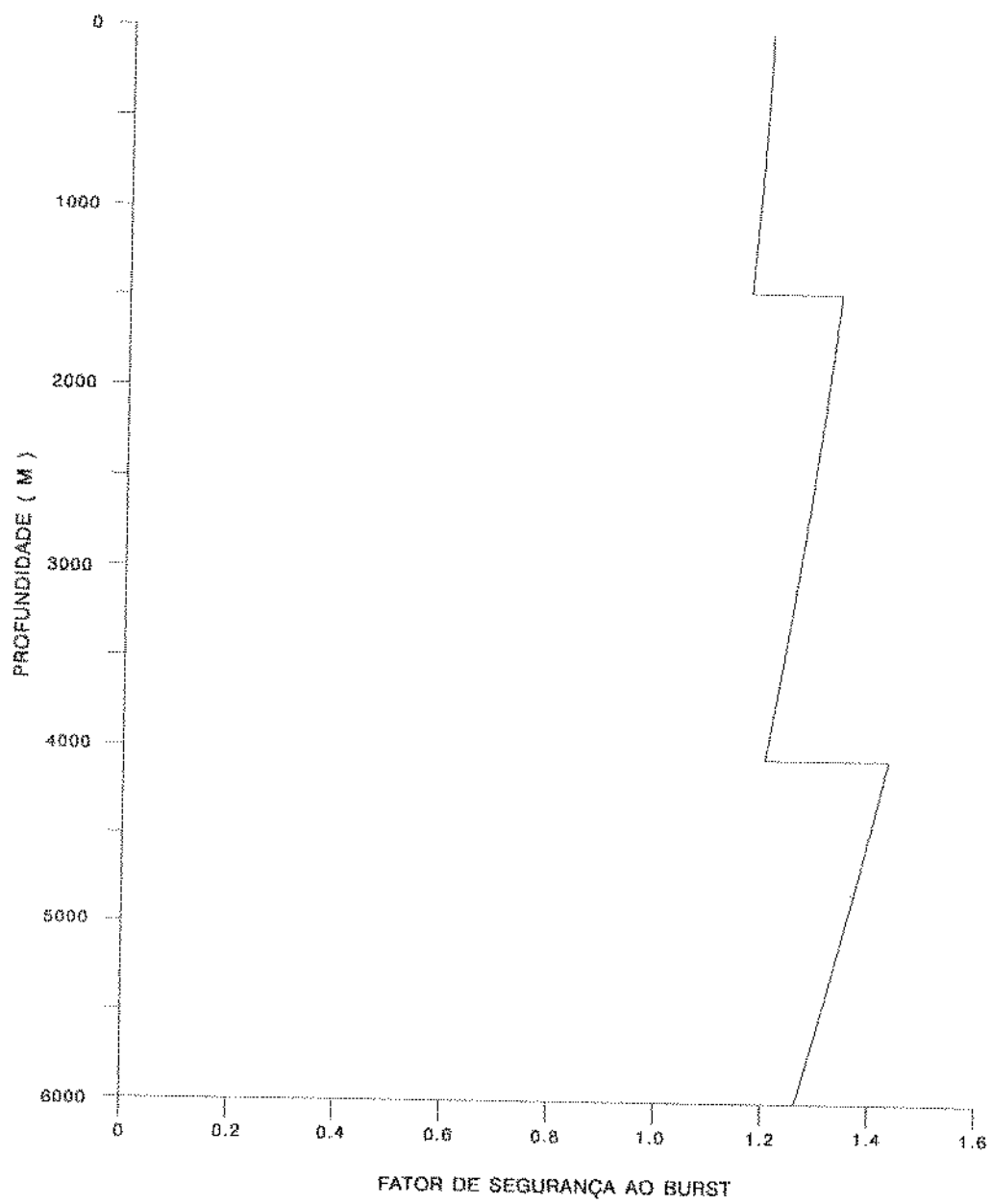


figura 28

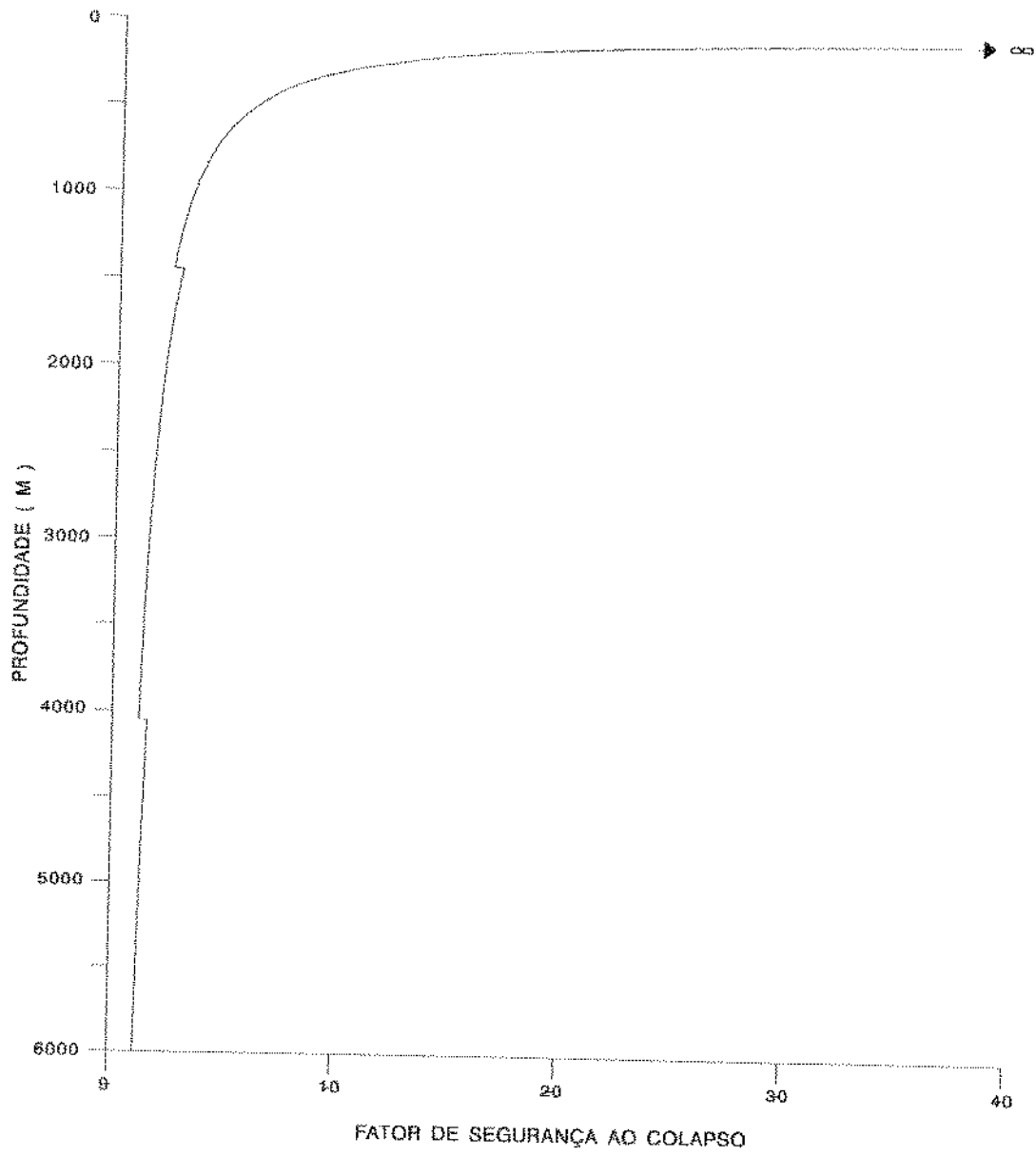


Figura 29

A análise dos resultados destes e de outros exemplos de dimensionamento que utilizaram os mesmos arquivos de tubos (tabela 3 e tabela 7) usados nos dimensionamentos dos exemplos anteriores, nos mostra que o critério API sempre nos dará o pior resultado, quer seja para a coluna de menor peso ou para a coluna de menor custo global, enquanto que a melhor solução pode ocorrer em qualquer um dos outros três critérios.

CAPÍTULO IX

CONCLUSÕES

Analisando os resultados de vários exemplos de dimensionamento, como o do capítulo VIII, podemos concluir que:

1. Influência do comprimento mínimo de seção (L_{min}) no peso total ou no custo final da coluna : Diferentes valores de comprimento mínimo de seção podem gerar colunas compostas pelo mesmo número de seções. Se estipularmos o número de seções que devem compor a coluna, então o melhor resultado para a coluna de menor peso ou de menor custo, não é necessariamente aquele obtido com o menor comprimento mínimo de seção que permitiu compor a coluna com o número de seções desejado. É preciso investigar vários valores de comprimento mínimo de seção para que a solução ótima seja encontrada.

2. Critérios de dimensionamento : A adoção de diferentes critérios de dimensionamento (API, API modificado, API com correção da resistência à pressão interna, API modificado com correção da resistência à pressão interna), para o caso de procurarmos a coluna de menor peso ou a de menor preço que pode

ser utilizada no poço, ajuda-nos a economizar. Na maioria dos casos, a diferença observada entre os resultados desses 4 critérios é muito significativa. Não podemos afirmar previamente qual dos critérios dará a melhor solução. Em alguns casos é possível que os 4 critérios apresentem a mesma solução para o problema, mas geralmente, o critério API não produz a melhor solução entre eles.

3. Correção da resistência à pressão interna de tubos com conexões tipo "short thread", "long thread" e "buttress" :

A utilização de tubos com estas conexões, deve ficar sujeita à máxima pressão interna prevista de ocorrer na coluna de revestimento. O valor dessa máxima pressão não está definido, contudo, deverá ser menor que a pressão de vazamento da conexão em uso, e também ser menor que 84 MPa (12000 psi). O valor de 84 MPa para a pressão interna funciona como limite para a aplicação da correção da resistência à pressão interna pelo critério biaxial de tensões. Para pressões maiores que esta, deve-se fazer a correção pelo critério triaxial de tensões, como proposto por Kastor (?). Convém observar no entanto que para valores de pressão interna da ordem de 84 MPa ou maiores, não é prudente utilizar essas conexões, pois sua capacidade de vedação não é confiável, o que, a longo prazo com certeza provocará danos e prejuízos. Para os casos que apresentam esses níveis de pressão recomenda-se utilizar conexões tipo extreme-line ou conexões premium que tenham mecanismo de vedação tipo metal-metal. Muitas empresas que operam com revestimentos já adotam estas conexões, que embora custem mais, representam segurança quanto à possibilidade de vazamentos.

4. Força axial na coluna em poços direcionais : Ficou evidenciado que a determinação da solicitação axial na coluna, em poços direcionais, para o dimensionamento à tração, é melhor resolvida com o emprego do critério proposto por Wojtanowicz e Maidla ⁽¹⁸⁾, que considera a influência do atrito na solicitação axial nos trechos não verticais do poço. O valor da solicitação axial assim determinado, pode resultar maior ou menor que aquele calculado pelo critério da verticalização da profundidade medida ⁽¹⁵⁾, dependendo da magnitude do afastamento lateral do poço direcional e do coeficiente de atrito utilizado.

NOMENCLATURA

Caracteres romanos maiúsculos:

A, B, C, F, G, DT,

DT_{ET} , DT_{TE} , $DT_{\gamma P}$... Parâmetros de cálculo

C_T Custo total da coluna, dólares

D Raio externo do tubo, mm [in]

$DFax$ Fator de projeto à tração

$DFbu$ Fator de projeto ao burst

$DFco$ Fator de projeto ao colápio

E_s Diâmetro do tubo na rosca, nos planos

E_1 e E_7 , definidos na norma

API STD 5B (4), mm [in]

E_d Força de dobramento, N [lbf]

H Peso do Tubo no intervalo de cálculo,

N [lbf]

L Comprimento, m [ft]

N Força normal, N [lbf]

P_b Pressão interna de escoamento do corpo

do tubo, MPa [psi]

P_E Pressão de colápio elástico, MPa [psi]

P_i Pressão interna ao tubo, MPa [psi]

P_L	.....Pressão interna de escoamento na luva, MPa [psi]
P_o	.....Pressão externa ao tubo, MPa [psi]
P_p	.....Pressão de colapso plástico, MPa [psi]
P_T	.....Pressão de colapso de Transição, MPa [psi]
P_v	.....Pressão de vazamento na conexão, MPa [psi]
P_{yp}	.....Pressão de colapso de escoamento, MPa [psi]
Q_T	.....Peso total da coluna, N [lbf]
R	.....Número de seções que compõem a coluna
S	.....Custo unitário dos tubos, dólares/m dólares/ft
T	.....Força axial, N [lbf]
V	.....Número de voltas de aperto manual do tubo
Y_p	.....Tensão de escoamento do tubo, MPa [psi]
Y_{pa}	.....Tensão de escoamento equivalente, MPa [psi]
Y_{pL}	.....Tensão de escoamento da luva, MPa [psi]
W	.....Diâmetro externo da luva, mm [in]

zDeclividade (conicidade) da rosca,
mm/mm [in/in]

Caracteres romanos minúsculos:

dRaio interno do tubo, mm [in]
 d_1 Diâmetro da rosca na extremidade do
pino após o aperto, mm [in]
pPasso da rosca, mm [in]
qPeso unitário do tubo, N/m [lbf/ft]
tEspessura da parede do tubo, mm [in]

Caracteres gregos:

α DLS (dog-leg severity), graus/m
graus/ft
 δ Ângulo de dobramento, graus
 θ Ângulo de inclinação média, graus
 μ Fator de atrito, adimensional
 σ_a Tensão axial, MPa [psi]
 σ_r Tensão radial, MPa [psi]

σ_t Tensão tangencial, MPa [psi]
 Δ Variação entre dois pontos.

Subscritos:

Jreferente à junta de revestimento.
míndice de total de colunas com mínimo
preço ou mínimo peso
níndice de seções da coluna
minreferente à mínimo

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. API BUL. 5C3 : Bulletin on Formulas and Calculations for Casing, Tubing, Drill Pipe and Line Pipe Properties. Fourth Edition. Dallas, API, 1989.
2. API BUL. 5C2 : Bulletin on Performance Properties of Casing, Tubing and Drill Pipe. 18th Edition. Dallas, API, 1982.
3. API SPEC 5CT: Specification for Casing and Tubing. 3th Edition. Washington. 1990.
4. API STD 5B : Specification for Threading, Gaging, and Thread Inspection of Casing, Tubing, and Line Pipe. 13th Edition. Washington. 1988
5. Holmquist, J.L. and Nadia, A : " A theoretical and Experimental Approach to the Problem of Deep-Well Casing ". Drill. and Prod. Prac., API, Dallas, 1932.
6. Jegier, J.: " Dynamic Programing to Casing String Design ", SPE of AIME. Paper number 12348. 1983
7. Kastor, R.L.: " Triaxial Casing Design for Burst ", IADC/SPE. Drilling Conference, paper number 14727. Dallas, 1986

8. Lubinski, A.: " Maximum Permissible Doglegs in Rotary Bore Hole ". Transactions of AIME. 175 - 1901. 1961
9. Maidla, Eric E.:" Dimensionamento de Revestimentos ". Notas de Aula , Unicamp. 1991.
10. Messrs, W. and Dunlop, K.:" Setting Depths for Casing ", API Division of Production. Dallas. 1940
11. Moody, W.C. : " Survey Report on Casing_string Design Factors ", Spring Meeting of Mid-Continent District. 1965. Amarillo
12. PETROGUIA : 1ª Edição . Petrobrás S/A. 1989.
13. Popov, E.P.: " Introduction to Mechanics of Solids ", 4th Edition. Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice Hall Inc., 1968.
14. Prentice, C.M.: " Maximum Load Casing Design", Journal of Petroleum Technology , Julho /1970
15. Saliés, J.B. : " Otimização do Projeto de Colunas de Revestimento ", Tese de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto. 1988.
16. TECHNICAL DATA : Lone Star Steel Company. Dallas. 1988
17. Timoshenko, S.P. and Goodier, J.N. : " Theory of Elasticity ", 19th Edition . Tokyo Japan, MacGraw-Hill International Book Company. 1983.

18. Wojtanowics, A.L. and Maidla, E.E. : " Minimum-Cost Casing Design for Vertical and Directional Wells ", Journal of Petroleum Technology , Outubro/1987.
19. Wold, H.C.J. : " Topics on Directional Drilling ", Notas de Aula, Unicamp. 1991.
20. WS-CASING : Enertech Engineering and Research Co.. Houston. 1990.