

# DIMENSIONAMENTO MECÂNICO

---

André Luiz Lupinacci Massa, MSc.

# OBJETIVO

---

- Determinar a espessura de parede de aço necessária para suportar às pressões internas e externas atuantes em um duto submarino.

# TÓPICOS GERAIS DO PROJETO DE DUTOS

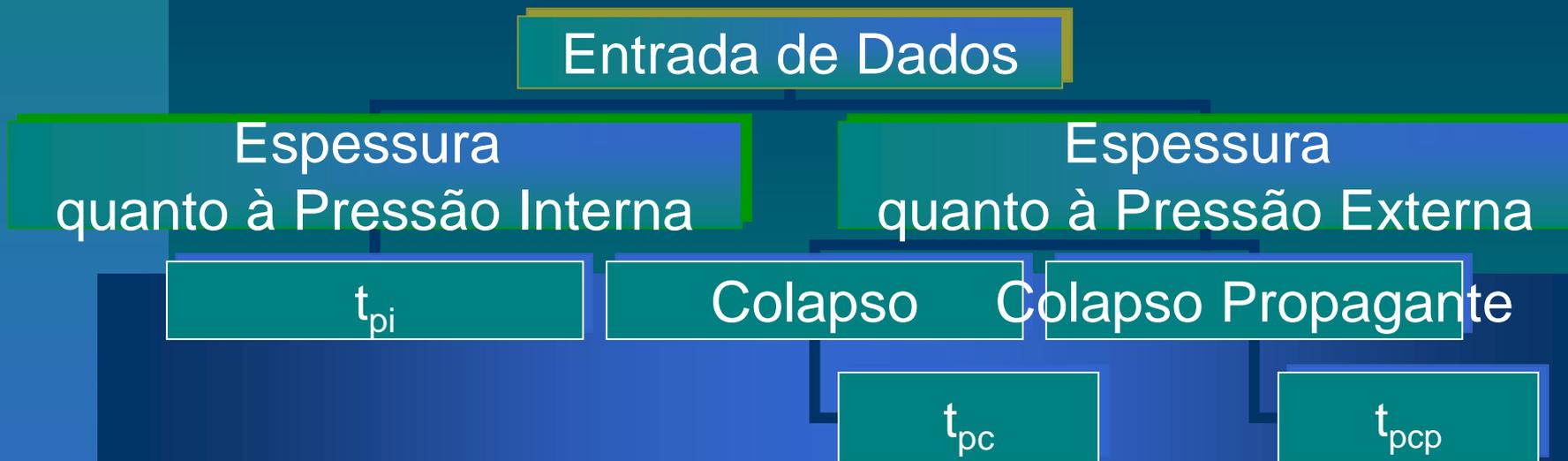
---

- **Análise Hidráulica;**
- **Dimensionamento Mecânico;**
- **Estabilidade Hidrodinâmica;**
- **Corrosão e Proteção Catódica;**
- **Análise de Instalação;**
- **Análise de Vãos Livres**
- **Análise Termomecânica;**

# PRINCIPAIS TÓPICOS ABORDADOS PARA O DIMENSIONAMENTO MECÂNICO

- Fluxograma Básico do Dimensionamento Mecânico;
- Principais dados de entrada para o dimensionamento;
- Fatores de segurança aplicados (DNV OS F-101);
- Sobre-espessura de corrosão e tolerância de fabricação;
- Dimensionamento quanto à pressão interna;
- Dimensionamento quanto à pressão externa;
  - Pressão externa (Colapso);
  - Pressão externa (Colapso Propagante);
- Resumo de cálculo.

# FLUXOGRAMA BÁSICO DO DIMENSIONAMENTO MECÂNICO



Em geral:

$$t_{\text{final}} = \text{Maior valor entre } t_{pi}, t_{pc} \text{ e } t_{pcp}$$

# PRINCIPAIS DADOS DE ENTRADA PARA O DIMENSIONAMENTO

---

- Diâmetro Externo do Duto (OD);
- Pressão de Projeto (Máxima pressão operacional do duto - MAOP) ( $P_d$ );
- Perfil de Temperatura do fluido (Temp);
- Lâminas d'água mínima e máxima (LDA);
- Proximidade de facilidades (plataformas, terminais, embarcações, etc...)

# FATORES DE SEGURANÇA APLICADOS (DNV OS F-101)

## ■ Classes de Segurança - Safety Class Factor – ( $\gamma_{sc}$ )

- Low (Baixa) – Quando a falha implica em baixo risco humano e pequeno impacto econômico e ambiental;
- Medium (Média) – Quando a falha implica em risco humano, impacto ambiental significativo ou consequências político-econômicas (classificação usual para condições operacionais em áreas afastadas de plataformas);
- High (Alto) – Quando a falha implica em alto risco humano, impacto ambiental significativo ou consequências político-econômicas (classificação usual para condições operacionais em áreas próximas de plataformas);

# FATORES DE SEGURANÇA APLICADOS (DNV OS F-101)

- Valores para  $\gamma_{sc}$  (Tabela 5-5)

Safety Class	Low	Medium	High
Pressure Containment	1,046	1,138	1,308
Other	1,04	1,14	1,26

# FATORES DE SEGURANÇA APLICADOS (DNV OS F-101)

- Material Resistance Factor ( $\gamma_m$ ) (Tabela 5-4)  
Fator que depende da categoria do estado limite do dimensionamento.

<b>Categoria do estado Limite</b>	<b>SLS/ULS/ALS</b>	<b>FLS</b>
$\gamma_m$	1,15	1,00

- SLS/ULS/ALS – Estados Limites de Serviço, Último e Acidental;
- FLS – Estado limite de Fadiga.

# FATORES DE SEGURANÇA APLICADOS (DNV OS F-101)

- Material Strength Factor ( $\alpha_u$ ) (Tabela 5-6)

Fator que considera a propriedades do material nos cálculos de resistência

Fator	Normal	Requisito Suplementar (U)
$\alpha_u$	0,96	1,00

- Observação: Na avaliação de teste hidrostático o valor de  $\alpha_u$  é igual a 1,00

# FATORES DE SEGURANÇA APLICADOS (DNV OS F-101)

- Fator de Fabricação ( $\alpha_{fab}$ ) (Tabela 5-7)

Fator que considera a forma como o duto foi fabricado.

Fabricação	Sem Costura (Seamless)	UO&TRB	UOE
$\alpha_{fab}$	1,00	0,93	0,85

# FATORES DE SEGURANÇA APLICADOS (DNV OS F-101)

- Resistência do Material ( $f_y, f_u$ )

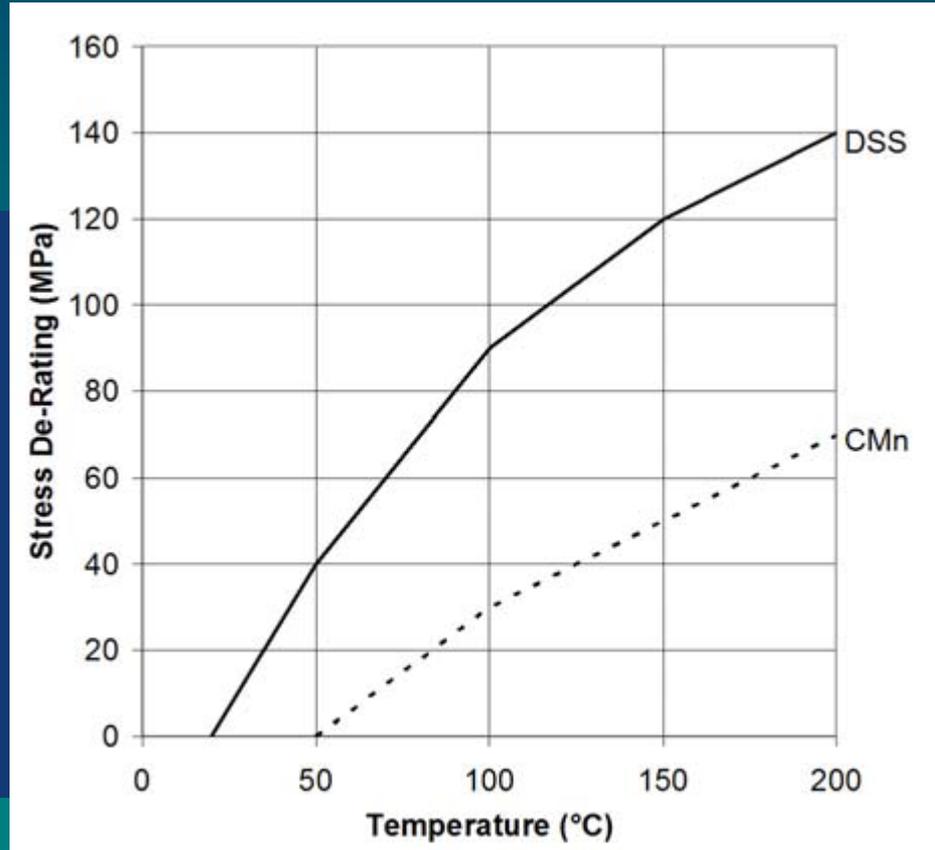
$$f_y = (SMYS - f_{y,temp}) \alpha_u$$

$$f_u = (SMTS - f_{u,temp}) \alpha_u$$

- SMYS – Tensão de escoamento do Material;
- $f_{y,temp}$  – Redução da resistência função da temperatura do fluido;
- $\alpha_u$  – Fator de resistência do material.

# FATORES DE SEGURANÇA APLICADOS (DNV OS F-101)

- Decréscimo devido à temperatura –  $f_{y(u),temp}$  (figura 2 da norma DNV)



# SOBRE-ESPESSURA DE CORROSÃO E TOLERÂNCIA DE FABRICAÇÃO

---

- Sobre-espessura de corrosão é uma reserva que deverá ser adicionada a espessura calculada para compensar possíveis perdas de espessura por corrosão da parede interna do duto.
- Determinação da sobre-espessura através de um estudo de corrosividade;
- Na ausência de informações adicionais a norma DNV recomenda a adoção de 3mm para a sobre-espessura

# SOBRE-ESPESSURA DE CORROÇÃO E TOLERÂNCIA DE FABRICAÇÃO

- Tolerância de fabricação é uma espessura adicional que deve ser considerada para compensar eventuais perdas durante a fabricação do tubo;
- Varia conforme o diâmetro e a forma de fabricação;
- Considerar a tolerância negativa;
- Valores conforme Norma API 5L (2004)

Table 9—Tolerances for Wall Thickness

Size	Type of Pipe	Tolerance <sup>a</sup> (Percent of Specified Wall Thickness)	
		Grade B or Lower	Grade X42 or Higher
≤ 2 <sup>7</sup> / <sub>8</sub>	All	+ 20.0, - 12.5	+ 15.0, -12.5
> 2 <sup>7</sup> / <sub>8</sub> and < 20	All	+ 15.0, - 12.5	+ 15.0, -12.5
≥ 20	Welded	+ 17.5, -12.5	+ 19.5, -8.0
≥ 20	Seamless	+ 15.0, -12.5	+ 17.5, -10.0

<sup>a</sup>Where negative tolerances smaller than those listed are specified by the purchaser, the positive tolerance shall be increased to the applicable total tolerance range in percent less the wall thickness negative tolerance.

# ESPESSURA DE PAREDE FINAL DO DUTO

## Espessura final do duto

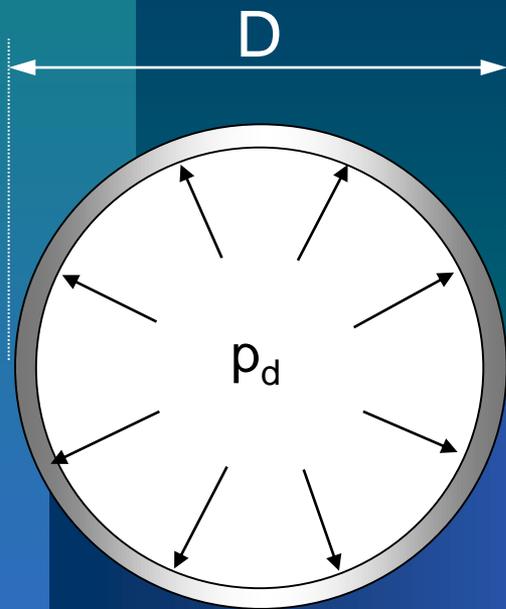
$$t = t_1 + t_{\text{corr}} + t_{\text{fab}}$$

OU

$$t = \frac{t_1 + t_{\text{corr}}}{1 - \%t_{\text{fab}}}$$

- Espessuras de Parede características (Seção 5C202)
- Para dimensionamento à pressão interna
  - Condição de Operação
$$t_1 = t - t_{\text{fab}} - t_{\text{corr}}$$
  - Condição de Teste Hidrostático
$$t_1 = t - t_{\text{fab}}$$
- Para outros dimensionamentos:
  - Condição de Instalação
$$t_2 = t$$
  - Demais casos
$$t_2 = t - t_{\text{corr}}$$

# DIMENSIONAMENTO QUANTO À PRESSÃO INTERNA



$$p_{ix} - p_e \leq \frac{p_b(t_1)}{\gamma_m \cdot \gamma_{SC}} \quad (5.7)$$

Where

$p_{ix} = p_{li}$  during operation, (see Sec.3 B300 and 4 B200) and

$p_{ix} = p_{lt}$  during system test.

$$p_b(t) = \frac{2 \cdot t}{D - t} \cdot f_{cb} \cdot \frac{2}{\sqrt{3}} \quad (5.8)$$

where

$$f_{cb} = \text{Min} \left[ f_y; \frac{f_u}{1.15} \right] \quad (5.9)$$

**Guidance note:**

In the above formulae,  $t$  shall be replaced by  $t_1$  when used in Eq 5.7 and  $t_2$  when used in Eq. 5.19.

# DIMENSIONAMENTO QUANTO À PRESSÃO INTERNA

## ■ Pressão Local (Local Pressure) (Seção 4B202)

$$p_{li} = p_{inc} + \rho_{cont} \cdot g \cdot (h_{ref} - h_l) \quad (4.1)$$

$$p_{lt} = p_t + \rho_t \cdot g \cdot (h_{ref} - h_l) \quad (4.2)$$

where

$p_{li}$  is the local incidental pressure

$p_{inc}$  is the incidental reference pressure at the reference elevation

$\rho_{cont}$  is the density of the relevant content of the pipeline

$g$  is the gravity

$h_{ref}$  is the elevation of the reference point (positive upwards)

$h_l$  is the elevation of the local pressure point (positive upwards)

$p_{lt}$  is the local system test pressure

$p_t$  is the system test reference pressure at the reference elevation

$\rho_t$  is the density of the relevant test medium of the pipeline

# DIMENSIONAMENTO QUANTO À PRESSÃO INTERNA

## ■ Formato equivalente (Seção 13E400)

$$(p_{ii} - p_e) \frac{D - t_1}{2 \cdot t_1} \leq \frac{2 \cdot \alpha_U}{\sqrt{3} \cdot \gamma_m \cdot \gamma_{SC}} \cdot (SMYS - f_{y,temp}) \quad (13.3)$$

$$p_d \frac{D - t_1}{2 \cdot t_1} \leq \frac{2 \cdot \alpha_U}{\sqrt{3} \cdot \gamma_m \cdot \gamma_{SC} \cdot \gamma_{inc}} \cdot (SMYS - f_{y,temp}) \quad (13.4)$$

$$\eta = \frac{2 \cdot \alpha_U}{\sqrt{3} \cdot \gamma_m \cdot \gamma_{SC} \cdot \gamma_{inc}} \quad (13.5)$$

$$p_d \frac{D - t_1}{2 \cdot t_1} \leq \eta \cdot (SMYS - f_{y,temp}) \quad (13.6)$$

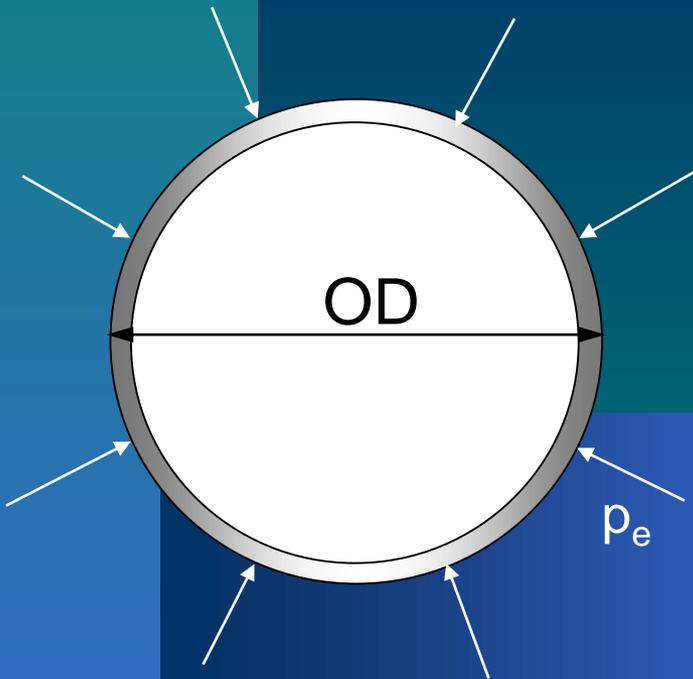
$$p_d \frac{D - t_1}{2 \cdot t_1} \leq \frac{\eta}{1.15} \cdot (SMYS - f_{u,temp}) \quad (13.7)$$

**Table 13-3 "Usage factors"  $\mu$  for pressure containment**

Utilisation factor, $\alpha_U$	Safety Class			Pressure test
	Low	Medium	High	
1.00	0.8473 (0.843)	0.802	0.6981	0.96
0.96	0.8133 (0.838)	0.77	0.672	0.96

In location class 1, 0.802 may be used  
 In location class 1, 0.77 may be used  
 Effectively this factor since the pressure test is governing

# DIMENSIONAMENTO QUANTO À PRESSÃO EXTERNA



## ■ Colapso;

- Pressão externa;
- Pressões nas fases Elásticas e Plásticas
- Ovalização ( $f_o$ );
- Ocorre localizadamente;

## ■ Colapso Propagante;

- Pressão externa;
- Acontece somente após a ocorrência de um colapso;
- Ocorre de forma generalizada

# DIMENSIONAMENTO QUANTO À PRESSÃO EXTERNA

## ■ Colapso (Seções 5D401 & 13E700)

$$(p_c(t) - p_{el}(t)) \cdot (p_c(t)^2 - p_p(t)^2) = p_c(t) \cdot p_{el}(t) \cdot p_p(t) \cdot f_o \cdot \frac{D}{t} \quad (5.10)$$

where:

$$p_{el}(t) = \frac{2 \cdot E \cdot \left(\frac{t}{D}\right)^3}{1 - \nu^2} \quad (5.11)$$

$$p_p(t) = f_y \cdot \alpha_{fab} \cdot \frac{2 \cdot t}{D} \quad (5.12)$$

$$f_o = \frac{D_{\max} - D_{\min}}{D} \quad (5.13)$$

not to be taken < 0.005 (0.5%)

$$p_e - p_{\min} \leq \frac{p_c(t_1)}{\gamma_m \cdot \gamma_{SC}} \quad (5.14)$$

$$p_c = y - \frac{1}{3}b \quad (13.13)$$

where:

$$b = -p_{el}(t)$$

$$c = -(p_p(t))^2 + p_p(t)p_{el}(t)f_o \frac{D}{t}$$

$$d = p_{el}(t)p_p(t)^2$$

$$u = \frac{1}{3} \left( -\frac{1}{3}b^2 + c \right)$$

$$v = \frac{1}{2} \left( \frac{2}{27}b^3 - \frac{1}{3}bc + d \right)$$

$$\Phi = \cos^{-1} \left( \frac{-v}{\sqrt{-u^3}} \right)$$

$$y = -2\sqrt{-u} \cos \left( \frac{\Phi}{3} + \frac{60\pi}{180} \right)$$

# DIMENSIONAMENTO QUANTO À PRESSÃO EXTERNA

## ■ Colapso Propagante(Seção 5D501)

$$P_e < \frac{P_{pr}}{\gamma_m \cdot \gamma_{SC}} \quad (5.15)$$

where

$$P_{pr} = 35 \cdot f_y \cdot \alpha_{fab} \left( \frac{t_2}{D} \right)^{2.5} \quad D/t < 45 \quad (5.16)$$

- Em função da profundidade, pode haver necessidade da utilização de buckle arrestors;

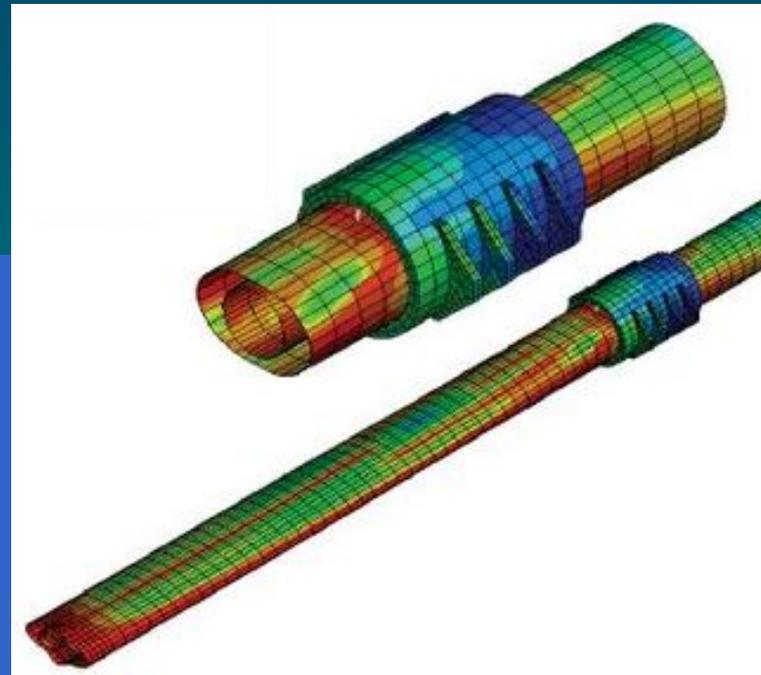
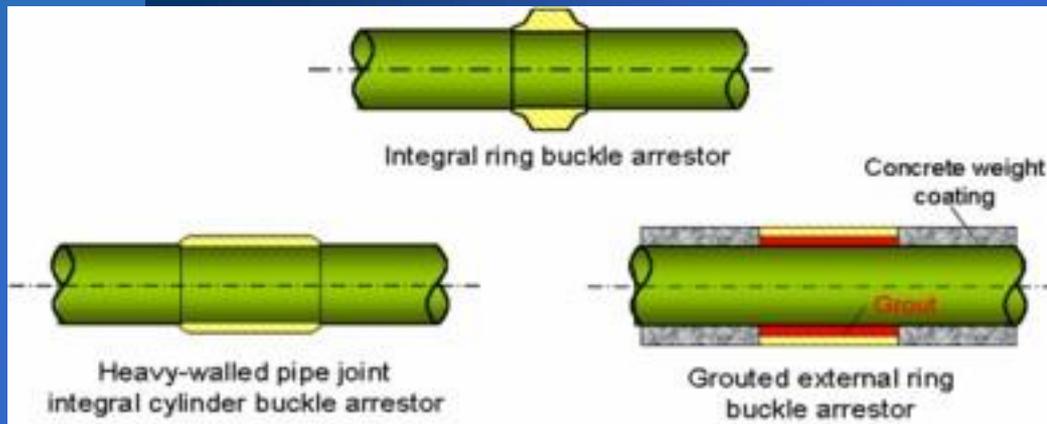
# DIMENSIONAMENTO QUANTO À PRESSÃO EXTERNA

## ■ Buckle Arrestor (Seção 5D502)

$$p_e \leq \frac{p_x}{1.1 \cdot \gamma_m \cdot \gamma_{sc}} \quad (5.17)$$

where the crossover pressure  $p_x$  is

$$p_x = p_{pr} + (p_{pr,BA} - p_{pr}) \cdot \left[ 1 - \text{EXP} \left( -20 \frac{t_2 \cdot L_{BA}}{D^2} \right) \right] \quad (5.18)$$



# RESUMO DE CÁLCULO DO DIMENSIONAMENTO MECÂNICO

---

- Análise dos dados de entrada;
- Determinação dos fatores de segurança;
- Determinação da espessura quanto à pressão interna;
- Determinação da espessura quanto à pressão externa (colapso e colapso propagante, buckle arrestor);
- Obtenção da espessura final.