



## Dimensionamento de oleodutos terrestres: pressão de projeto e espessura de tubos

Diego Moraes Antunes<sup>a</sup>

Walber Paschoal da Silva<sup>b</sup> <https://orcid.org/0000-0001-6000-4458>

Luís Fernando Gonçalves Pires<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Petrobras Transporte S.A - TRANSPETRO, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

<sup>b</sup> Universidade Federal Fluminense - UFF, Escola de Engenharia, Niterói, RJ, Brasil

<sup>c</sup> Pontifícia Universidade Católica – RJ – PUC-RJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

**Resumo:** O desenvolvimento do projeto de um oleoduto terrestre engloba diversas etapas, desde a identificação da oportunidade de negócio até a fase de descomissionamento do duto. Nesse processo, uma das principais tarefas é a determinação da pressão de projeto, fundamental para o cálculo e a seleção dos tubos que serão empregados. O objetivo desta pesquisa foi investigar e estruturar os procedimentos para dimensionamento da pressão de projeto e da espessura dos tubos, como parte integrante do desenvolvimento do projeto conceitual de um oleoduto terrestre. Para tanto, foi proposta e testada uma metodologia, estruturada por meio do detalhamento de suas etapas, e de fluxogramas de processo apresentando suas sequências e interdependências. Os resultados indicaram a efetividade dos procedimentos propostos, como ferramenta de auxílio aos projetistas.

**Palavras-chave:** oleodutos terrestres, dimensionamento mecânico, pressão de projeto.

**Abstract:** The development of a land pipeline project encompasses several stages, from identifying business opportunities to the decommissioning phase of the pipeline. In this process, one of the main tasks is determining the design pressure, which is essential for calculating and selecting the pipes to use. This research aimed to investigate and structure the procedures for designing the design pressure and thickness of the pipes as an integral part of the conceptual design of a land pipeline. To this end, a methodology was proposed and tested, structured by detailing its stages and process flowcharts showing their sequences and interdependencies. The results indicated the effectiveness of the proposed procedures as an aid tool for designers.

**Keywords:** onshore pipelines, mechanical design, design pressure.

**Como citar:** ANTUNES, D.M., SILVA, W.P., PIRES, L.F.G. **Dimensionamento de Oleodutos Terrestres: Pressão de Projeto e Espessura de tubos.** *Engevista*, vol. 22, n.1, Niterói, Rio de Janeiro, Brasil, 2024.

**Autor para contato:** Diego Moraes Antunes. E-mail: [diegomoraes@id.uff.br](mailto:diegomoraes@id.uff.br)

**Financiamento:** Nenhum.

**Conflito de interesse:** Nada a declarar.

## **1 INTRODUÇÃO**

O objetivo desta pesquisa foi investigar e estruturar os procedimentos para efetuar o cálculo da pressão de projeto e da espessura dos tubos, como parte integrante do dimensionamento conceitual de oleodutos terrestres, incluindo o sequenciamento das etapas de determinação da vazão de escoamento e perdas de carga impostas ao sistema. Cabe ressaltar que, após a delimitação da área de estudo, o dimensionamento de um oleoduto é precedido por levantamentos e estudos, onde são capazes de fornecer dados e informações técnicas do processo e da rota estabelecida. Destaca-se ainda que, embora esses procedimentos já façam parte do cotidiano dos projetistas de dutos, que usam como base seus conhecimentos técnicos, normas e experiência profissional, não há um documento formal que apresente tais procedimentos com essa sequência, de maneira estruturada, como proposto nesta pesquisa.

## **2 METODOLOGIA**

O dimensionamento hidráulico e mecânico se inicia após a delimitação da área de estudo, coleta dos dados do processo e das opções de traçado preliminar estudados. As equações para desenvolvimento do estudo hidráulico e para determinação da espessura mínima estão relacionadas a seguir.

Para o dimensionamento mecânico devem ser considerados os seguintes critérios: pressões máximas e mínimas; temperaturas máximas e mínimas; operação com coluna cheia; capacidade de escoamento; espessuras mínimas e sistema de alívio. Neste estudo, considerou-se que o escoamento é adiabático, que a operação de movimentação é realizada com coluna cheia.

Além disso, o projeto de dimensionamento resulta das condições impostas pela rota selecionada pelo projetista. No entanto, as condições de processo estabelecidas anteriormente, também influenciam diretamente o projeto conceitual.

Com relação a vazão de escoamento necessária, em atendimento as premissas impostas pelo empreendimento, deve-se observar que a velocidade média do escoamento de oleodutos ocupa uma faixa comumente utilizada, porém não obrigatória, que está entre 1 e 2 m/s (Bahadori, 2017). Esta faixa de velocidades é utilizada para possibilitar a seleção inicial dos

diâmetros que serão avaliados no projeto, e se apresentam na faixa de soluções de projetos de oleodutos típicos.

## 2.1 Capacidade de escoamento

O oleoduto deve ser dimensionado para uma capacidade de escoamento nominal equivalente a capacidade de escoamento mínima requerida e acrescida de uma folga de capacidade para recuperação de estoques.

Por sua vez, o fator de recuperação de estoques pode ser definido como a razão entre a capacidade de escoamento nominal e a capacidade de escoamento mínima requerida. Este fator deve ser definido pelo demandante e informado ao projetista.

Da mesma forma, a capacidade mínima requerida resulta da relação entre o volume total a movimentar, o tempo operacional indisponível e a disponibilidade do oleoduto. Considera-se como tempo operacional indisponível o período que o duto fica fora de operação, como o período do pico de consumo de energia ao longo do dia para uma determinada região e o tempo de partida e parada do sistema de bombeio.

Desta forma, a capacidade de escoamento nominal pode ser calculada pela Equação 1, da seguinte forma:

$$Q_{esc} = \frac{q_d F_{estq}}{\left(24 - \frac{T_{oper}}{7}\right) F_{disp}} \quad (1)$$

onde:  $q_d$  = vazão diária em m<sup>3</sup>/dia;  $F_{estq}$  = fator de recuperação de estoque;  $F_{disp}$  = fator de disponibilidade do sistema;  $T_{oper}$  = tempo operacional indisponível em horas por semana;  $Q_{esc}$  = capacidade de escoamento nominal em m<sup>3</sup>/h.

## 2.2 Velocidade média do escoamento e número de Reynolds

A ordem de grandeza da velocidade do escoamento é avaliada inicialmente, em função da vazão requerida pelo empreendimento e da área da seção interna, conforme apresentado na Equação 2.

$$V = \frac{Q}{A} \quad (2)$$

onde:  $Q$  = vazão volumétrica;  $V$  = velocidade do escoamento;  $A$  = área relativa ao diâmetro interno.

Após o cálculo da velocidade, calcula-se através da Equação (3), o número de Reynolds e, com este valor, é possível saber em qual regime o escoamento se encontra. Este regime pode ser classificado como laminar ( $Re < 2000$ ), transiente ( $2000 < Re < 4000$ ) ou turbulento ( $Re > 4000$ ).

$$Re = \frac{VD\rho}{\mu} \quad (3)$$

onde:  $Re$  = número de Reynolds;  $V$  = velocidade do escoamento;  $D$  = diâmetro interno;  $\rho$  = massa específica;  $\mu$  = viscosidade cinemática.

### 2.3 Perda de carga

No escoamento interno de um duto ocorrem perdas de carga do tipo local e distribuída. As perdas locais são decorrentes das resistências hidrodinâmicas, em geral associadas à forma e à dimensão do duto. Já as perdas distribuídas, correspondem às perdas causadas pelo atrito interno no fluido escoado, em geral, proporcionais ao comprimento deste.

Percebe-se que o número de Reynolds é função da velocidade, diâmetro, massa específica e da viscosidade cinemática. Esta relação também pode ser transformada para utilização da viscosidade absoluta.

Com o número de Reynolds e a rugosidade relativa, calculada através da Equação 4, é possível determinar o fator de atrito existente entre o fluido e a parede do duto.

$$\varepsilon = \frac{e}{D} \quad (4)$$

onde:  $\varepsilon$  = rugosidade relativa;  $e$  = rugosidade absoluta do tubo;  $D$  = diâmetro interno.

Para executar o cálculo do fator de atrito no regime laminar utiliza-se a Equação 5 e para o regime turbulento utiliza-se a Equação 6. Para a região de transição é complexo e não usual a utilização de fórmulas.

Na zona crítica, onde o número Reynolds está entre 2000 e 4000, não há uma fórmula geralmente aceita para determinar o fator de atrito. Isto porque o fluxo é instável nesta região e, portanto, o fator de atrito é indeterminado. A maioria dos usuários calcula o valor de  $f$  baseado sobre fluxo turbulento (Menon, p.44, 2004, tradução nossa).

$$f = \frac{64}{Re} \quad (5)$$

onde:  $f$  é o fator de atrito;  $Re$  é o número de Reynolds.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left[ \left( \frac{\varepsilon}{3,7D} \right) + \frac{2,51}{(Re\sqrt{f})} \right] \quad (6)$$

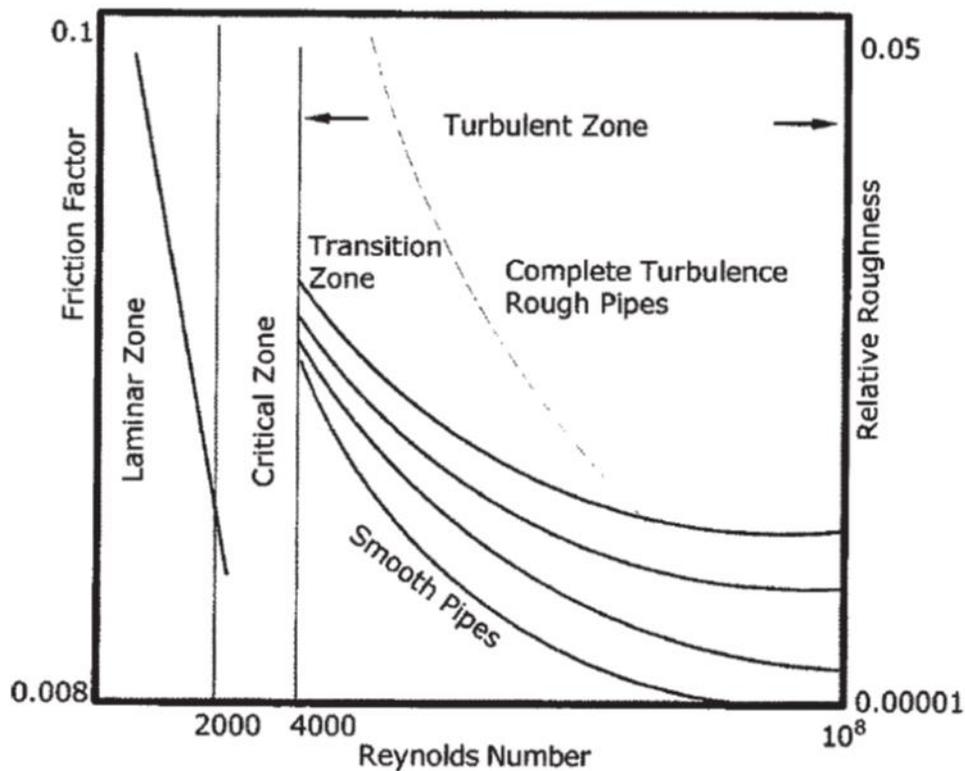
onde:  $f$  = fator de atrito;  $\varepsilon$  = rugosidade relativa;  $D$  = diâmetro interno;  $Re$  = número de Reynolds.

Essas relações são facilmente identificadas através do diagrama de Moody, conforme ilustrado na Figura 1.

Deste modo, inicia-se o cálculo da perda de carga ao longo do duto. O número de Reynolds e o fator de atrito são fundamentais para compor a perda de carga, sendo fundamental verificar se os dados encontrados estão condizentes com a ordem de grandeza esperada pelo projetista. A perda de carga para um produto incompressível, num escoamento isotérmico e horizontal é definido pela equação de Darcy, conforme apresentado na Equação 7.

$$h = f \left( \frac{L}{D} \right) \left( \frac{V^2}{2g} \right) \quad (7)$$

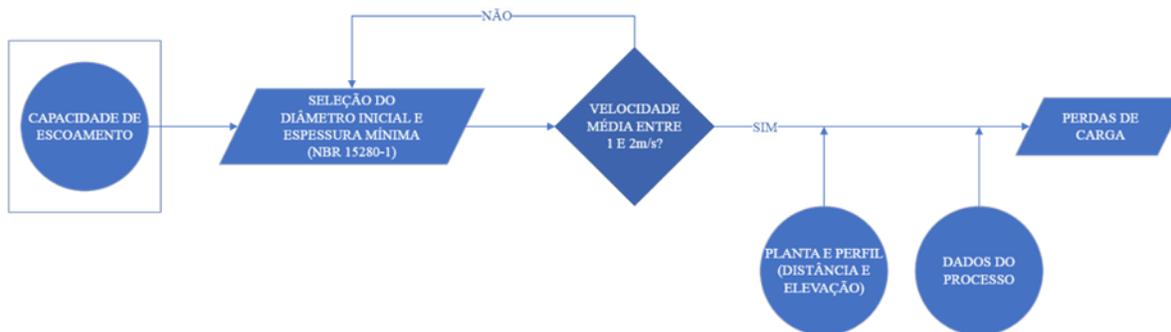
onde:  $h$  = perda de carga por atrito;  $f$  = fator de atrito;  $L$  = comprimento do duto;  $V$  = velocidade do fluxo;  $g$  = aceleração da gravidade.



**Figura 1.** Diagrama de Moody para o fator de atrito

Fonte: Menon (p.45, 2004).

Na Figura 2 encontra-se a sequência de atividades para efetuar o cálculo da perda de carga decorrente do escoamento. Ressalta-se que, em sua grande maioria, o escoamento em dutos opera em regime turbulento (SOUAS; MEDDUR, 2022).



**Figura 2.** Sequenciamento de atividades para determinar a perda de carga por atrito

Fonte: o autor.

No desenvolvimento do projeto conceitual não são consideradas as perdas atribuídas às válvulas e conexões flangeadas, pois tem pouca representatividade quando comparados com a perda do atrito ao longo de sua extensão.

“Na maioria das tubulações de longa distância, tais como linhas de tronco, a queda de pressão devida à fricção nos comprimentos retos dos tubos é significativa. As válvulas e acessórios contribuem muito pouco para a queda de pressão total em toda a tubulação” (MENON, 2014).

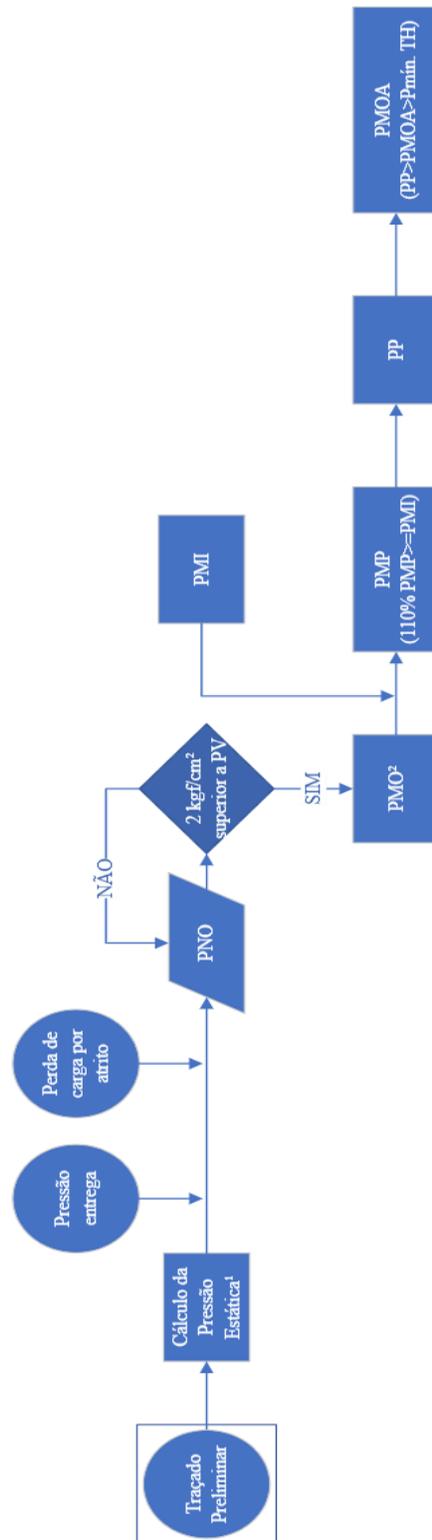
#### **2.4 Pressões desenvolvidas no sistema**

Pode-se definir pressão de projeto como sendo a pressão adotada para dimensionamento mecânico do tubo e componentes, conforme citado na NBR 15280 (ABNT, 2017). No entanto, devem ser levadas em consideração as definições e premissas relativas as parcelas que compõem a pressão de projeto, sendo que estas informações estão definidas e representadas no Anexo A e na Figura A.1 da NBR 15280 (Idem), respectivamente.

Antes de iniciar o cálculo da espessura do tubo, pode-se, com base nos dados pré-selecionados, calcular as pressões atuantes no sistema conforme indicado na Figura 3. A seleção da espessura não é trivial, visto que alterações no diâmetro e espessuras pré-selecionadas afetam todo o dimensionamento hidráulico e, conseqüentemente, o dimensionamento mecânico.

Optou-se por apresentar graficamente o impacto na mudança das variáveis pré-selecionadas, uma vez que não é possível apresentar uma solução definitiva considerando apenas a espessura nominal.

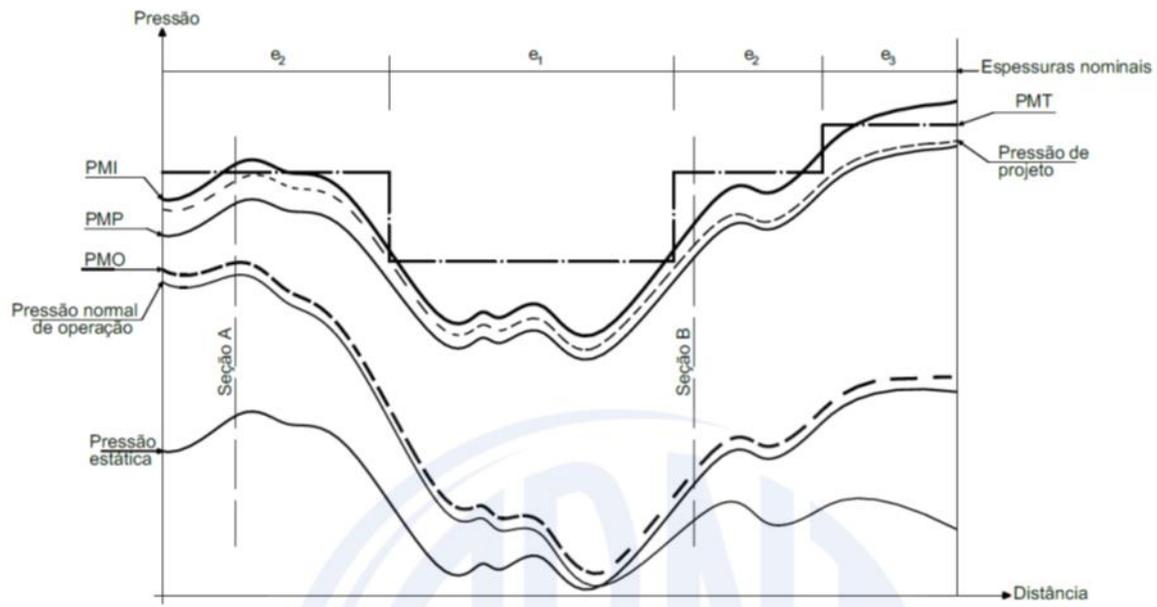
No entanto, conforme descrito por Mylapilli et al. (2015), o oleoduto está sujeito as variações de pressão decorrentes da partida e parada do sistema de bombeio ou das operações de abertura e fechamento de válvulas gerando pressões transientes. No entanto, estas pressões fazem parte da pressão normal de operação e devem ser consideradas pelo projetista para efetuar o dimensionamento mecânico do oleoduto.



**Figura 3.** Sequenciamento de cálculo das pressões

Fonte: o autor.

As definições sobre as diversas pressões atuantes no sistema estão disponíveis na NBR 15280-1 (ABNT, 2017). Para facilitar o entendimento, também é possível identificar graficamente, através da Figura 4, o desenvolvimento das pressões ao longo do perfil do duto, utilizando a figura A.1 presente na NBR-15280 (ABNT, p. 60, 2017).



**Figura 4.** Representação esquemática de pressões ao longo do duto

Fonte: Adaptado da NBR 15280-1 (ABNT, 2017).

No exemplo representado na Figura 4, pode-se observar que a pressão máxima incidental (PMI) é superior as demais pressões do sistema. Cabe salientar que a PMI pode ser inferior a PMO e, nesta situação, a PMP passará a ser a PMO.

A respeito das parcelas de pressão calculadas, cabe salientar que a pressão máxima operacional (PMO) pode ser ajustada, com cautela, para valores superiores à pressão normal de operação (PNO). No entanto, cabe ao projetista avaliar o impacto da mudança nas demais pressões.

A PMI é ocasionada pelo aumento na pressão oriunda da variação de velocidade do fluido no duto. As pressões desenvolvidas no sistema foram calculadas considerando fluxo constante sem variações ao longo do tempo, ou seja, sobre as variações na elevação somadas as perdas por atrito.

Além das pressões transientes, que compõem a parcela da pressão normal de operação, podem ocorrer variações de pressão incidentais decorrentes de fechamento súbito de válvulas de bloqueio, capazes de ocasionar danos críticos ao duto.

Estes picos de pressão podem ocorrer em todos os sistemas de tubulação de fluido e pode resultar em fadiga e falha de tubulações. Os efeitos do surto podem ser uma falha catastrófica do duto e seus sistemas ou falha por fadiga nos suportes, na instrumentação, nos equipamentos e demais itens (Idem, p. 1, 2015, tradução nossa).

Na Figura 5 é possível verificar a variação da pressão ao longo do tempo após o fechamento de uma das válvulas de um duto de diâmetro nominal de 12 polegadas, transportando uma mistura de condensado e betume ao longo de 250 quilômetros, representando o efeito do transiente.

Neste trabalho, para o cálculo da PMI, será utilizada a equação de Joukowski (Equação 8) onde a pressão máxima do transiente ( $P_{surge}$ ) é função da pressão máxima operacional, da massa específica do produto, da velocidade sônica no fluido e da diferença entre as velocidades de escoamento e de fechamento súbito da válvula.

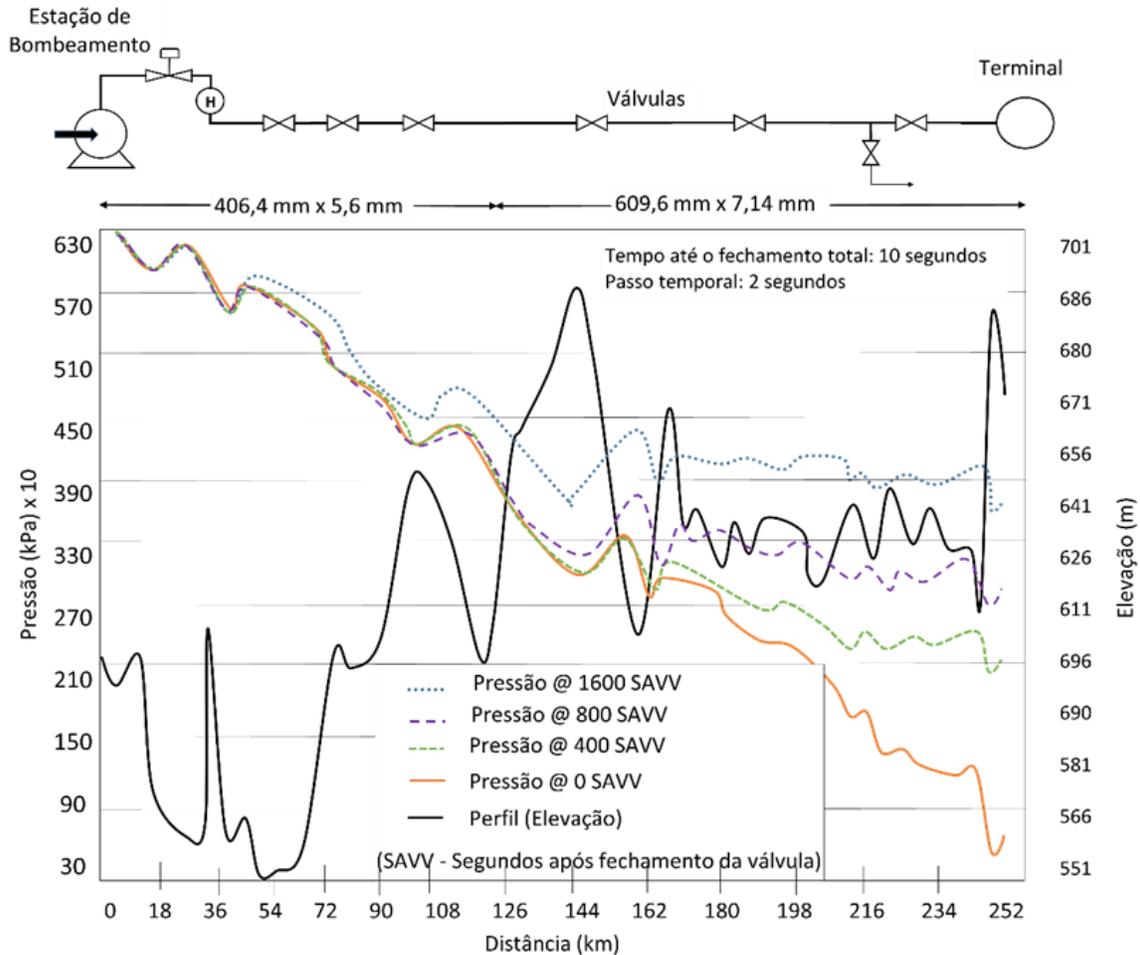
$$P_{surge} = P_{steady} + \rho c \frac{\Delta Q}{A} \quad (8)$$

onde:  $P_{surge}$  (PMI) = pressão máxima incidental;  $P_{steady}$  (PMO) = pressão máxima operacional;  $c$  = velocidade de propagação da onda no duto;  $\Delta Q$  = diferença de vazão decorrente do fechamento de uma válvula;  $\rho$  = massa específica do fluido;  $A$  = área da seção transversal interna do duto.

Além disso, esta associação só é válida quando o tempo de fechamento da válvula, representado na Equação 9 é inferior ao tempo de deslocamento da onda formada pelo fechamento súbito da válvula, conforme apresentado na Equação 10.

$$t \leq \Delta t_j \quad (9)$$

onde:  $t$  = tempo de fechamento da válvula;  $\Delta t_j$  = tempo de travessia da onda.



**Figura 5.** Perfil de pressão de oleoduto enterrado sujeito ao fechamento súbito de uma válvula

Fonte: Adaptado de Mohtipour et al. (2007).

$$\Delta t_j = \frac{2L}{c} \quad (10)$$

onde:  $L$  = comprimento total entre a válvula e o início do duto;  $c$  = velocidade sônica no fluido;  $\Delta t_j$  = tempo de travessia da onda.

## 2.5 Espessura nominal, calculada e mínima

Neste trabalho optou-se por utilizar as fórmulas e dados disponibilizados na NBR 15280-1 (ABNT, 2017) para o cálculo das espessuras.

A Equação 11, é usada para calcular a espessura total da parede, sendo equivalente a soma das parcelas relativas à espessura calculada e à espessura para compensar a corrosão.

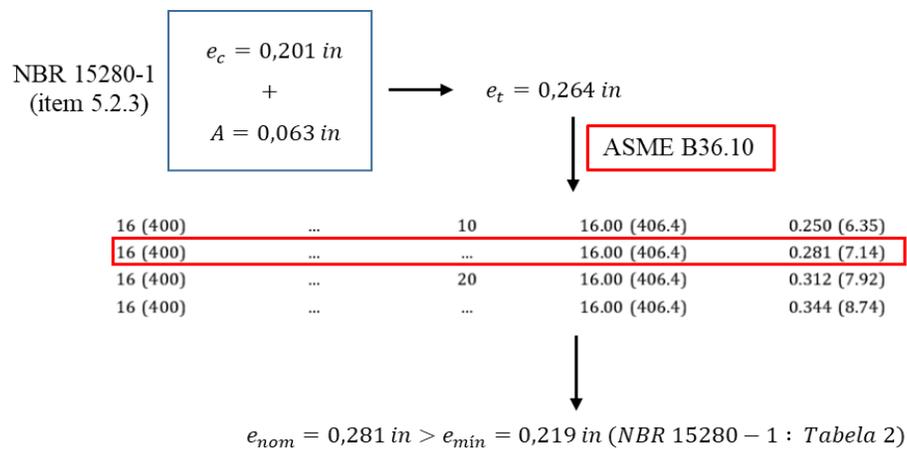
$$e_t = \frac{pD}{2SEF} + A \quad (11)$$

onde:  $e_t$  = espessura total calculada;  $p$  = pressão de projeto;  $D$  = diâmetro externo do duto;  $S$  = tensão de escoamento do tubo;  $E$  = fator de junta;  $F$  = fator de projeto;  $A$  = sobresspessura de corrosão.

A espessura adicional, para compensar a perda de espessura por corrosão, deve ser selecionada pelo projetista com base na taxa de corrosão anual para o produto que será movimentado.

Ressalta-se que a espessura nominal depende de uma análise do projetista com relação as espessuras mínimas informadas na NBR 15280-1 (ABNT, p. 24, 2017) e as espessuras indicadas na ASME B36.10 (ASME, 2022).

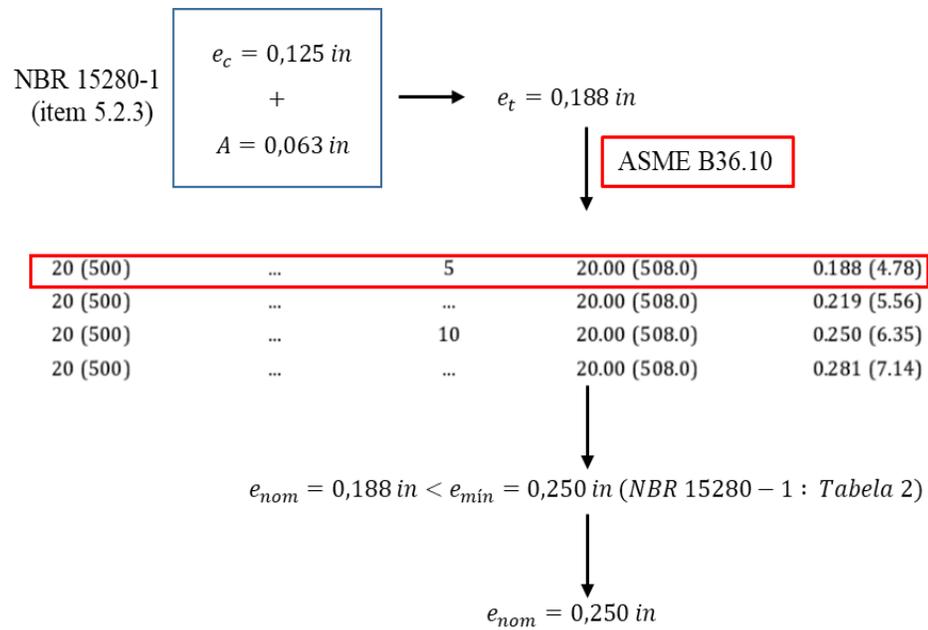
Para facilitar o entendimento, estão ilustrados dois exemplos de sequenciamento para cálculo das espessuras, conforme representado pela Figura 6 e pela Figura 7, considerando um diâmetro nominal de 16 polegadas e 20 polegadas.



**Figura 6.** Exemplo A: sequencial para cálculo de espessuras

Fonte: o autor.

Na Figura 7, a espessura nominal fica abaixo da mínima estabelecida pela NBR 15280-1 (ABNT, 2017), sendo necessário adotar a espessura indicada na Tabela 2 da referida norma.

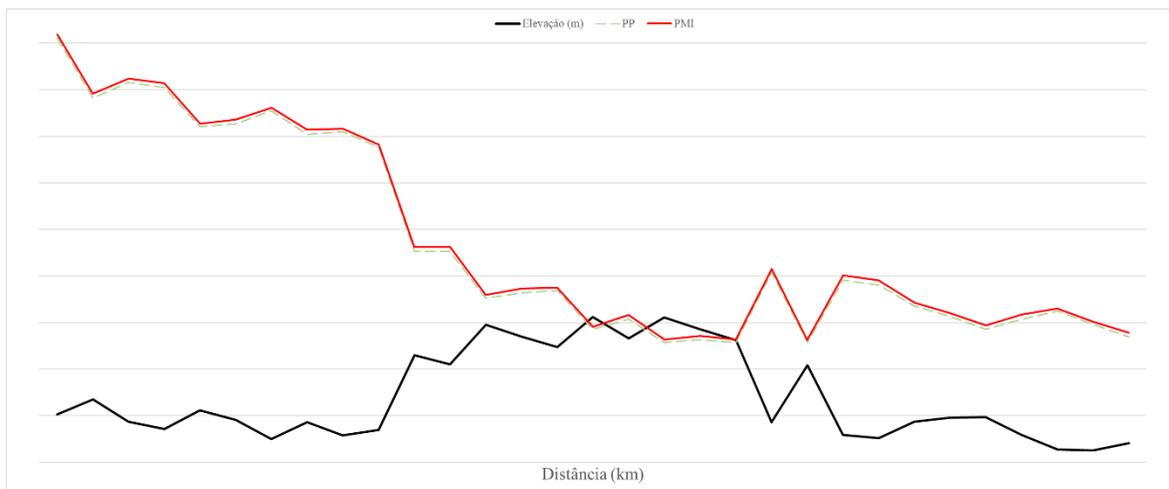


**Figura 7.** Exemplo B: sequencial para cálculos de espessura.

Fonte: o autor.

## 2.6 Representação das variações dos dados de projeto

Na Figura 8, estão representados o perfil do oleoduto e as pressões ao longo da rota, respectivamente.



**Figura 8.** Variação das pressões ao longo da rota.

Fonte: o autor.

## 5 CONCLUSÕES

O projeto de dutos terrestres apresenta diversas dificuldades técnicas que precisam ser superadas para garantir a eficiência e a segurança do sistema. Uma das principais dificuldades é determinar a espessura adequada do duto. A espessura deve ser suficiente para suportar a pressão de operação e resistir à corrosão ao longo do tempo. O cálculo da espessura envolve múltiplos fatores, como pressão de projeto, diâmetro externo, tensão de escoamento, fator de junta, fator de projeto e sobre-espessura para corrosão. Erros nesse cálculo podem comprometer a integridade estrutural do duto.

A pressão máxima operacional (PMO) e a pressão máxima incidental (PMI) devem ser cuidadosamente calculadas e controladas. A PMI, em particular, pode ser afetada por variações súbitas de velocidade do fluido, como aquelas causadas pelo fechamento rápido de válvulas. Esses picos de pressão podem levar a falhas catastróficas se não forem adequadamente mitigados.

Já a pressão de projeto deve ser estabelecida com margem de segurança para acomodar variações operacionais e eventos imprevistos.

Assim, como a pressão de projeto é variável ao longo do duto, a espessura de projeto também seria variável ao longo do duto, mas por questões econômicas e de fabricação, normalmente o projetista secciona o duto em trechos de espessuras iguais (Figura 3). A espessura selecionada em cada trecho deve ainda atender às espessuras disponíveis no mercado, normalmente baseadas na API SPEC 5L (API, 2018). Com essa espessura, a Equação 11 pode ser invertida e calculada a pressão nominal ( $P_n$ ) até a qual o tubo poderia trabalhar.

A decisão final entre as diversas alternativas de pressão de projeto, diâmetro, material e espessura é realizada pela análise econômica de cada uma das soluções apresentadas pelo projetista.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15280: Dutos terrestre. Parte 1: Projeto**. Rio de Janeiro, 2017.

API – AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **API SPECIFICATION 5L – Line Pipe**, Washington DC, NW, 2018.

BAHADORI, A. **Oil and Gas Pipeline and Piping Systems: Design, Construction, Management, and Inspection**. Massachusetts, USA: Gulf Professional Publishing, 2017.

MENON, E. SASHI. **Liquid Pipeline Hydraulic**. New York, USA: Marcel Dekker, 2004.

MENON, E. SASHI. **Transmission Pipeline Calculations and Simulations Manual**. Massachusetts, USA: Gulf Professional Publishing, 2015.

MYLIAPILLI, L. K., GOGULA, P. V. R., ARYA, A. K. **Hydraulic and Surge Analysis in a Pipeline Network using Pipeline Studio**, International Journal of Engineering Research & Technology, v.4, n.2, 2015.

MOHITPOUR, M., GOLSHA, H., MURRAY, A. **Pipeline Design & Construction: A Practical Approach**. New York, NY: ASME Press, 2007.

SOUS, F. e MEDDOUR, A. S. E. **Drag Reduction in Single-Phase Crude Oil Flow: A Mini-Review**, Journal of Pipeline Science and Engineering, v.2, n.2, 2022.

**Contribuição dos autores:** LC: conceituação, curadoria de dados, análise formal, metodologia, redação; MP: conceituação, supervisão, redação; MP: conceituação, supervisão, redação.

**Editores:** Bruno Campos Pedroza, Mayra Soares Pereira Lima Perlingeiro.