

OTIMIZAÇÃO DE ESPESSURAS DE ISOLAMENTO DE DUTOS DE PETRÓLEO EM CONDIÇÕES SUBMARINAS

Géssica Ramos da Silva¹, Leôncio Diógenes Tavares Câmara² e Antônio José da Silva Neto³

Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Instituto Politécnico, 28625-570 – Nova Friburgo, RJ, Brasil.

Palavras-chave: Ambientes *offshore*, Isolamento térmico, Dutos de petróleo.

Resumo. Com os avanços tecnológicos que ocorreram nos últimos anos, foi possível encontrar e explorar poços de petróleo em locais cada vez mais profundos e distantes do continente. Devido à grande distância entre os campos de petróleo e o continente, a indústria petrolífera passou a se deparar com mais um problema: a formação de hidratos e parafinas nos dutos de transporte de petróleo. Uma das formas mais viáveis de evitar esses problemas é através da utilização de um sistema de isolamento térmico adequado.

Neste trabalho, foi-se utilizada uma modelagem matemática simples que permite obter a espessura ótima de isolamento térmico ao longo da tubulação, de tal forma a evitar a formação de hidratos e parafinas. Para isto, foram impostos dois modelos de decaimento de temperatura que mostraram-se eficientes na representação do fenômeno de parafinação.

Endereços de e-mail: gessicamos.uerj@gmail.com, dcamara@iprj.uerj.br,
ajsneto@iprj.uerj.br.

1 INTRODUÇÃO

O petróleo é um dos recursos naturais não-renováveis mais empregados atualmente sendo utilizado desde combustível para uso doméstico, em automóveis, aviões a jato, etc. até na fabricação de asfalto e piche. No decorrer dos anos, os métodos utilizados na exploração e produção de petróleo foram sendo aperfeiçoados de tal forma a obter um maior aproveitamento e redução de custos envolvidos nos processos operacionais (Thomas, 2011).

Com os avanços tecnológicos, tornou-se possível descobrir e explorar poços de petróleo em locais cada vez mais profundos, conforme pode ser visto na Fig. 1. Em contrapartida, com os sistemas de transporte de petróleo sendo instalados a distâncias cada vez maiores, a formação de hidratos e parafinas tornou-se um grande problema. Ao escoar pelos dutos submarinos, manifolds e, inclusive, linhas de exportação, o óleo pode entrar em equilíbrio térmico com a água do mar e, inevitavelmente, as linhas de produção operarão perto ou dentro do envelope de formação de hidrocarbonetos (Forsdyke, 1997).

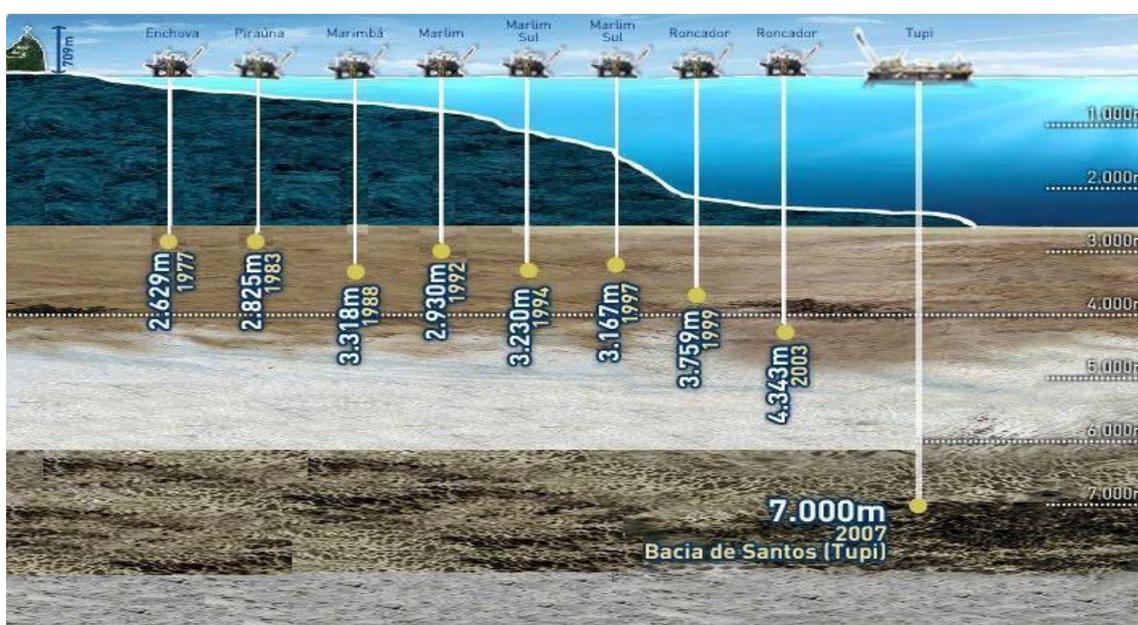


Figura 1 – Esquema de profundidades dos poços petrolíferos brasileiros.
Adaptado de [www.petrobras.com.br].

Na indústria petrolífera o transporte de petróleo do reservatório até o continente é frequentemente realizado através de dutos. O transporte dutoviário, que engloba os dutos terrestres e os dutos submarinos, apresenta grande confiabilidade operacional, alta economia no transporte, baixo consumo de energia e baixo impacto ambiental e, assim, vem sendo largamente empregado na indústria.

Segundo Milcent (2006), o petróleo, ao ser extraído do reservatório, pode atingir uma temperatura de até 130 °C. Devido ao gradiente de temperaturas entre o petróleo e a água no fundo do mar (que pode chegar, em média, a 4 °C), este vai perdendo calor e, caso a tubulação não esteja revestida com um isolante térmico adequado, pode ser atingida a temperatura inicial de aparecimento de cristais (T_{IAC}).

O presente trabalho teve como objetivo desenvolver um simulador computacional que permite obter a espessura ótima de isolamento térmico necessária às tubulações empregadas no transporte do petróleo em águas profundas, de tal forma a evitar

que seja atingida a temperatura inicial de aparecimento de cristais (T_{IAC}). Para tanto, foi utilizado o software de programação MATLAB[®], versão 7.1.

A vantagem em se obter uma espessura ótima de isolamento térmico para várias seções do duto está no fato de que haverá uma redução de custos no processo de fabricação do mesmo, não sendo necessário utilizar uma espessura única de isolante em todo o comprimento, além de reduzir o peso da tubulação.

2 MODELAGEM MATEMÁTICA

Devido ao longo tempo de duração do escoamento, levando-se em conta que um poço de petróleo opera durante vários anos, o projeto das linhas de produção é realizado considerando-se condição de regime permanente. Em condições operacionais até é possível encontrar situações que devem ser descritas como regime transiente, entretanto, essas alterações são relativamente insignificantes e não levam a uma descaracterização da hipótese de regime permanente (Saraceno, 2007).

Durante a operação das linhas de produção, o mecanismo de transferência de calor dominante é a convecção forçada entre o fluido e a parede do duto. Como o escoamento em um tubo é completamente confinado, um balanço de energia pode ser utilizado para determinar como a temperatura média $T_m(x)$ varia com a posição ao longo do tubo e como a transferência de calor por convecção total q_{conv} está relacionada à diferença entre as temperaturas na entrada e na saída do tubo (Incropera e DeWitt, 1992).

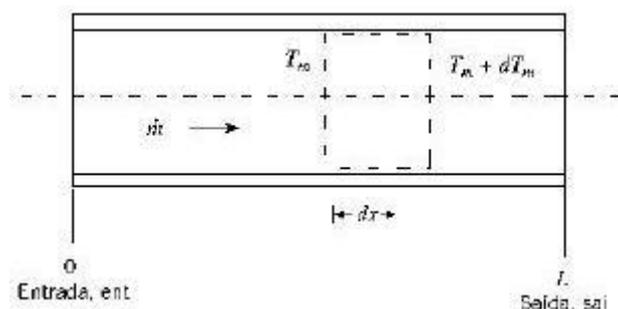


Figura 2 – Volume de controle infinitesimal para o escoamento interno em um tubo.

Como as variações da energia cinética e potencial do fluido são desprezíveis, assim como a transferência de calor por condução na direção axial, os únicos efeitos a serem considerados nos cálculos são as variações associadas à energia térmica e ao trabalho do fluido. Considerando que o fluido esco a uma vazão mássica constante \dot{m} e aplicando a equação da conservação de energia ao volume de controle infinitesimal mostrado na Fig. 2, tem-se que:

$$dq_{conv} = \dot{m} \cdot d(c_v \cdot T_m + p \cdot v) \quad (1)$$

Logo, a taxa de transferência de calor por convecção do fluido é igual à soma entre a taxa de aumento da energia térmica do fluido e a taxa líquida do trabalho realizado para deslocar o fluido através do volume de controle.

Considerando o petróleo como sendo um líquido incompressível, temos que $c_v = c_p$. Como o volume de controle analisado é muito pequeno (infinitesimal), podemos desprezar o termo $d(p \cdot v)$, por ser muito menor que $d(c_v \cdot T_m)$. Assim, a Eq. 1 assume a seguinte forma:

$$dq_{conv} = \dot{m} \cdot c_p \cdot dT_m \quad (2)$$

Como a Eq. 2 refere-se a um volume de controle infinitesimal, para obter a taxa de transferência de calor total no tubo, é necessário fazer a integração da entrada *i* do tubo até uma saída *o*, obtendo:

$$q_{conv} = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{m,o} - T_{m,i}) \quad (3)$$

Para calcular os valores da temperatura média $T_m(x)$ foram arbitrados dois padrões para o decaimento de temperatura do fluido ao longo da tubulação, sendo um linear e outro exponencial, utilizando como padrão de comparação a temperatura na qual o petróleo começa a virar parafina (T_{IAC}) e a temperatura na qual o petróleo sai do reservatório (Souza, 2012). Com isso, impomos as seguintes equações para o caso linear e exponencial, respectivamente:

$$T_{m,i}(x) = T_{pet} - (T_{pet} - T_{IAC}) \frac{x}{2L} \quad (4)$$

$$T_{m,i}(x) = T_{pet} \cdot \exp(-x/L) \quad (5)$$

Onde *x* é a posição, a partir da saída do reservatório, da temperatura que queremos encontrar em cada região do tubo. A partir das equações acima, é possível calcular a temperatura média do fluido em uma determinada seção de comprimento definido da seguinte forma:

$$T_{méd,i} = (T_{m,i} + T_{m,i-1}) / 2 \quad (6)$$

Considerando um tubo de parede muito fina, é possível estabelecer a seguinte relação:

$$q_{conv} = q_{cond} = q \quad (7)$$

A partir da relação estabelecida na Eq. 7, foi montado um circuito térmico equivalente para as camadas da tubulação, fazendo-se uma aproximação por parede plana. Na figura a seguir, é possível visualizar o circuito térmico equivalente para o caso analisado.

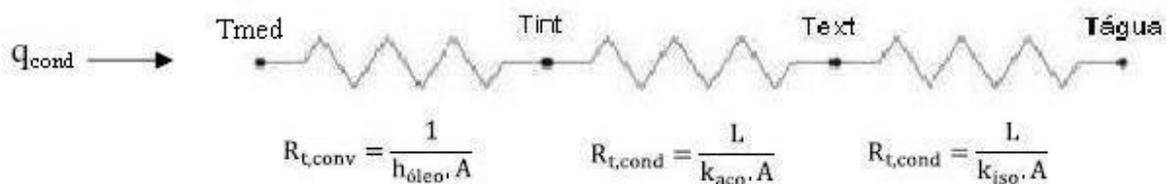


Figura 3 – Esquema do circuito térmico equivalente para aproximação por parede plana.

A partir da equação que calcula a temperatura média do fluido em uma determinada seção (Eq. 6) e da hipótese de que o fluxo de calor transmitido pelas camadas da tubulação é sempre igual (Eq. 7), podemos encontrar a temperatura da parede interna do tubo através do desenvolvimento da seguinte relação obtido pelo circuito térmico mostrado na Fig. 3:

$$q_{conv} = h_{oleo} \cdot \pi \cdot D_{int} \cdot L \cdot (T_{méd,i} - T_{int,i}) \quad (8)$$

Onde D_{int} representa o diâmetro interno do tubo, h_{oleo} o coeficiente de convecção do petróleo e $T_{int,i}$ a temperatura da parede interna do tubo. Desenvolvendo a Eq. 8 e isolando a temperatura da parede interna do tubo, obtemos a seguinte relação:

$$T_{int,i} = T_{méd,i} - q_{conv} / (h_{oleo} \cdot \pi \cdot D_{int} \cdot L) \quad (9)$$

De maneira análoga, é possível obter uma expressão para o fluxo de calor através da parede externa da tubulação e associá-la à temperatura da parede externa do tubo:

$$q_{cond} = (T_{int,i} - T_{ext,i}) \cdot k_{aço} \cdot \pi \cdot D_{méd} \cdot L / e_{aço} \quad (10)$$

Onde $T_{ext,i}$ representa a temperatura da parede externa do tubo, $k_{aço}$ o coeficiente de condução térmica da parede do aço e $e_{aço}$ a espessura entre a parede interna e a externa do aço. Reorganizando a Eq. 10, obtemos:

$$T_{ext,i} = T_{int,i} - q_{cond} \cdot e_{aço} / k_{aço} \cdot \pi \cdot D_{méd} \cdot L \quad (11)$$

Onde:

$$D_{méd} = (D_{int} + D_{ext}) / 2 \quad (12)$$

Dispondo da temperatura externa do tubo, é possível encontrar o valor da espessura ótima de isolamento em cada seção, de tal forma a manter o fluido acima de sua temperatura de cristalização (T_{IAC}). Realizando o balanço de energia, obtemos a seguinte relação:

$$q_{cond} = (T_{ext,i} - T_{água}) \cdot k_{iso} \cdot \pi \cdot D_{méd,iso} \cdot L / e_{iso} \quad (13)$$

Onde $T_{água}$ representa a temperatura da água no fundo do mar, k_{iso} o coeficiente de condução térmica do isolante e e_{iso} a espessura da camada de isolante. O diâmetro médio do isolante ($D_{méd,iso}$) é a média entre o diâmetro externo e do isolante, ou seja:

$$D_{méd,iso} = D_{ext} + e_{iso} \quad (14)$$

Reorganizando a Eq. 13 e utilizando a relação da Eq. 14, obtemos a expressão para o cálculo da espessura do isolante:

$$e_{iso} = \frac{(T_{ext,i} - T_{água}) \cdot k_{iso} \cdot \pi \cdot D_{ext} \cdot L}{[q_{cond} - (T_{ext,i} - T_{água}) \cdot k_{iso} \cdot \pi \cdot L]} \quad (15)$$

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A fim de mostrar que o simples balanço de energia utilizado neste trabalho é capaz de representar adequadamente o fenômeno de parafinação, inicialmente foram realizadas simulações cujos resultados foram comparados com dados do software comercial Olga[®] (Escobedo, 2005). Na tabela a seguir podem ser vistos os parâmetros adotados nas simulações computacionais para o escoamento de um gás em regime permanente.

Tabela 1 – Parâmetros adotados para as variáveis no escoamento do gás.

Parâmetro	Valor
Temperatura da água do mar	5 °C
Temperatura do petróleo na saída do reservatório	60 °C
Temperatura inicial de aparecimento de cristais	15 °C
Diâmetro externo da tubulação	0,2667 m
Diâmetro interno da tubulação	0,2540 m
Vazão mássica	23,2 kg/s
Calor específico do gás	2244 J/kg.K
Condutividade térmica do aço	50 W/m.K
Condutividade térmica da lã de vidro	0,38 W/m.K
Coefficiente de troca térmica por convecção	3,35 W/m ² .K
Espessura de isolamento térmico	20 cm

Para realizar a comparação entre os resultados do software Olga[®] e do MATLAB[®], foram realizadas simulações utilizando a taxa de decaimento linear de temperatura, cujos resultados demonstraram um melhor ajuste com os dados de Escobedo (2005) e, portanto, são apresentados na figura a seguir.

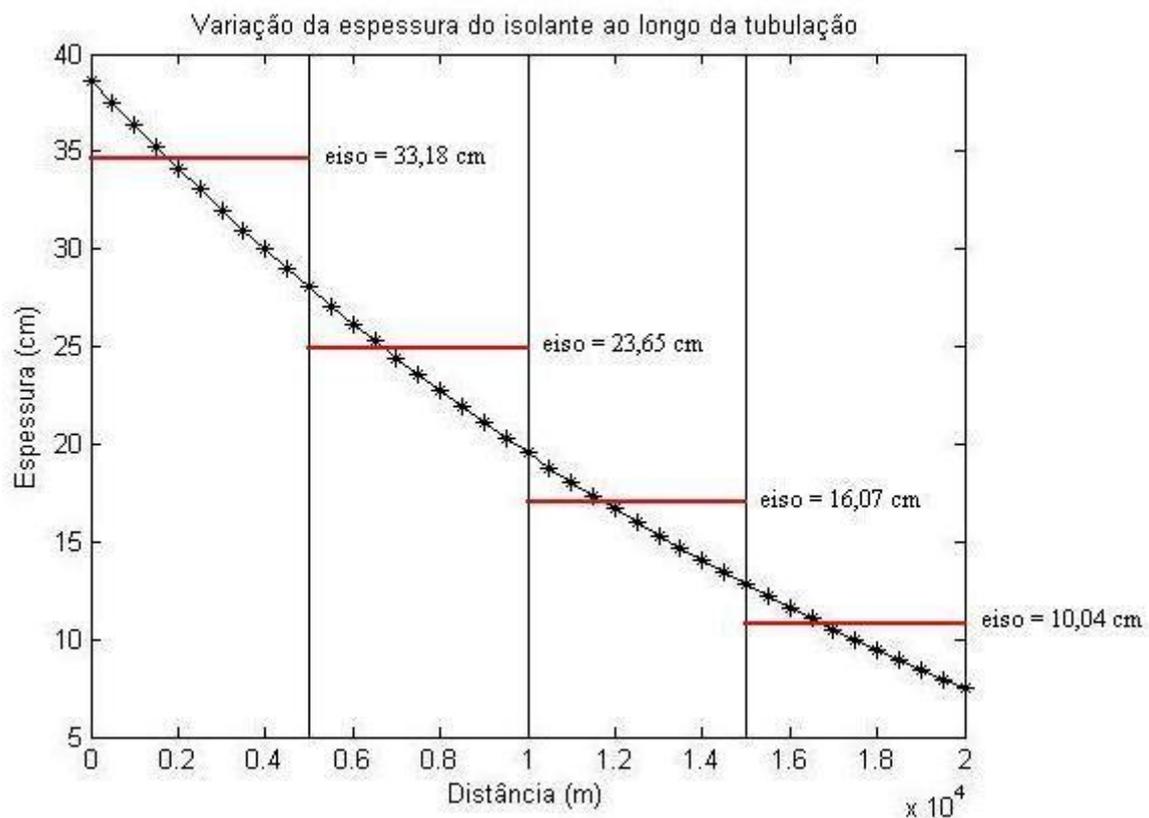


Figura 4 – Variação da espessura ótima de isolamento ao longo da tubulação para o escoamento de um gás em regime permanente.

Conforme pode ser visto na Fig. 4, foi feita uma divisão da tubulação em comprimentos iguais de 5000 metros e, para cada seção, foi calculada uma espessura média de isolamento. Fazendo uma média dentre esses valores encontrados, vemos que a condição de uma espessura constante igual a vinte centímetros, adotada por Escobedo (2005), é satisfeita também pelos resultados gerados pelo MATLAB®.

Após ser feita a validação do modelo matemático, alguns testes foram realizados a fim de verificar o quanto os resultados gerados pelo simulador computacional se aproximam de dados especificados em tabelas de fabricantes e fornecedores de isolantes térmicos, ou seja, o quanto os resultados simulados se aproximam dos valores comumente adotados na prática para o revestimento de tubulações. Para isto, os seguintes valores foram adotados nas simulações computacionais:

Tabela 2 – Variáveis adotadas para a comparação entre resultados simulados e espessuras tabeladas de silicato de cálcio.

Parâmetro	Valor
Temperatura da água do mar	4 °C
Temperatura do petróleo na saída do reservatório	80 °C
Temperatura inicial de aparecimento de cristais	24 °C
Diâmetro externo da tubulação	4,5 pol = 0,1143 m
Diâmetro interno da tubulação	3 pol = 0,0762 m
Vazão mássica	2,5 kg/s
Calor específico do óleo	2130 J/kg.K
Condutividade térmica do aço	63,9 W/m.K
Coefficiente de troca térmica por convecção	233,6 W/m ² .K

Com os valores adotados na Tabela 2, foram realizadas simulações utilizando os diferentes tipos de taxa de decaimento de temperatura. Na figura a seguir são apresentados os valores obtidos para a variação de espessura ótima ao longo da tubulação para uma taxa de decaimento linear, cujos valores mostraram-se mais próximos aqueles tabelados no catálogo da Neo Térmica (2013), para o caso analisado.

Conforme pode ser visto na Fig. 5, para os primeiros 750 metros da tubulação poderia ser utilizada uma espessura média de, aproximadamente, 27,32 milímetros de silicato de cálcio. Já nos 750 metros finais, poderia ser utilizada uma espessura média de 20,32 milímetros. Logo, caso fôssemos determinar uma espessura única e constante ao longo de toda tubulação, seria de aproximadamente 23,82 milímetros.

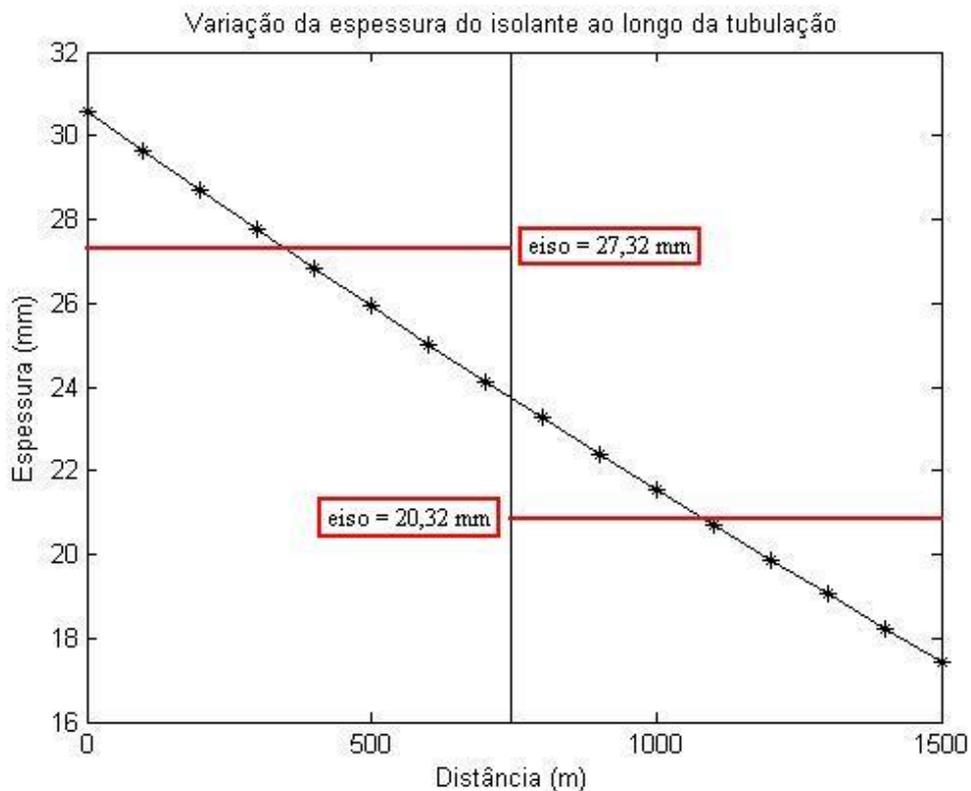


Figura 5 – Variação da espessura ótima de isolamento térmico ao longo de uma tubulação revestida com silicato de cálcio.

Esses resultados são coerentes com os valores de espessuras disponibilizados no catálogo da Neo Térmica (2013) para diferentes temperaturas de operação, cuja espessura sugerida para a condição de escoamento aqui analisada é de 25 milímetros.

6 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi desenvolvido um simulador computacional no software MATLAB®, versão 7.1, que permite obter a espessura requerida de isolamento térmico ao longo de uma tubulação de petróleo exposta à ambientes submarinos, de tal forma a evitar a formação de hidratos e parafinas.

A modelagem matemática desenvolvida neste trabalho foi baseada num simples balanço de energia em uma superfície de controle. As equações aqui utilizadas mostraram-se tão eficientes quanto as que são usadas em softwares comerciais sendo, porém, bem mais simples e necessitando de uma quantidade bem menor de parâmetros para representar o fenômeno do escoamento de petróleo ao longo da tubulação.

Vale ressaltar que a modelagem matemática aplicada foi feita considerando-se o escoamento de petróleo num tubo horizontal, ou seja, as propriedades físicas são constantes ao longo do comprimento da tubulação (como, por exemplo, a temperatura da água do mar). Caso uma tubulação inclinada fosse analisada, era de se esperar que a espessura de isolamento térmico requerida nas regiões mais próximas a superfície fosse menor, devido a menor diferença de temperatura entre o petróleo e a água do mar.

Além de apresentar um bom ajuste com resultados gerados por softwares comerciais, o modelo matemático permitiu que fossem obtidos resultados coerentes com valores tabelados

em catálogos de fabricantes e fornecedores de isolantes térmicos, que especificam qual o valor de espessura requerida para diferentes temperaturas de operação.

A grande vantagem em obter uma espessura ótima de isolamento térmico para seções de comprimento variáveis ao longo da tubulação está no fato de que pode ser calculada uma espessura média e constante para cada uma delas, garantindo uma economia razoável no projeto de revestimento de tubulações. Vale ressaltar também que a redução do peso da coluna (duto) é uma variável importante de projeto e isto pode ser conseguido pelo uso de uma quantidade menor de material no revestimento.

REFERÊNCIAS

[1] THOMAS, José Eduardo. *Fundamentos de engenharia de petróleo*. 2. ed. Rio de Janeiro, 2011. 271 p.

[2] FORSDYKE, I. N. *Flow assurance in multiphase environments*. In: SPE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON OILFIELD CHEMISTRY, 1997, Houston: p. 18-21.

[3] MILCENT, Paul Fernand. *Noções de isolamento térmico de tubulações*. 2. ed. Paraná: UFPR, 2006. 36 p.

[4] SARACENO, Alessandra da Silva Pinelli. *Estudo do fenômeno de parafinação a partir de um óleo cru*. 2007. 93 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

[5] INCROPERA, Frank P. et al. *Fundamentos de transferência de calor e de massa*. 6. ed. Rio de Janeiro, 2008. 657 p.

[6] SOUZA, Fernando Henrique Gomes. *Otimização do isolamento térmico em linhas de poços de produção de petróleo*. 2012. 72 f. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2012.

[7] ESCOBEDO, Jhoany Jhordann Barrera. *Modelagem transiente da transferência de calor em dutos de petróleo ou gás termicamente isolados*. 2005. 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.