

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO SUCKOW DA
FONSECA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**Gabriel José Valentim Alves
Miguel Oliveira Calçadas Gomes**

**ANÁLISE DE ISOLAMENTO TÉRMICO DE TUBULAÇÕES DE PETRÓLEO
OFFSHORE**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**Rio de Janeiro
2025**

Gabriel José Valentim Alves
Miguel Oliveira Calçadas Gomes

**ANÁLISE DE ISOLAMENTO TÉRMICO DE TUBULAÇÕES DE PETRÓLEO
OFFSHORE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, do Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca.

Orientador: Prof. Dr. Jonas Motta Quirino

Rio de Janeiro
2025

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

A474 Alves, Gabriel José Valentim
Análise de isolamento térmico de tubulações de petróleo offshore / Gabriel José Valentim Alves [e] Miguel Oliveira Calçadas Gomes – 2025.
54f : il. color. + anexo, enc.

Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2025.
Bibliografia : f. 53-54.
Orientadora: Jonatas Motta Quirino.

1. Engenharia mecânica. 2. Indústria offshore de petróleo.
3. Isolamento térmico. 4. Tubulação offshore. I. Gomes, Miguel Oliveira Calçadas. II. Quirino, Jonatas Motta (Orient.). III. Título.

CDD 620.1

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaríamos de dedicar esse trabalho aos nossos pais e familiares que sempre estiveram ao nosso lado, motivando, apoiando e acreditando em nós, desde o nosso primeiro dia de vida nesse planeta até os dias de hoje. Agradecemos por todos os sacrifícios que eles tiveram que fazer, e tudo que eles tiveram que abrir mão, para que nós tivéssemos uma boa infância e uma boa base educacional que possibilitaram que nós chegássemos até aqui e fazem com que possamos construir um belo futuro, tanto pessoal quanto profissional.

Gostaríamos de agradecer aos amigos que fizemos ao longo do curso, que por vários anos trilharam esse caminho com a gente e que nos momentos bons e, principalmente, nos momentos difíceis sempre estiveram lá para nos motivar.

Ainda, gostaríamos de agradecer aos nossos professores e coordenadores que, ao longo desses mais de cinco anos de curso, sempre estiveram disponíveis para nos ensinar e tirar nossas dúvidas. No intuito de nos moldar na melhor versão dos engenheiros que viremos ser.

Por fim, gostaríamos muito de agradecer ao nosso orientador Jonatas Motta Quirino por estar disposto a fazer parte desse momento tão importante da nossa vida acadêmica e profissional. E por nos motivar e incentivar a concluir esse trabalho, apesar de todas as adversidades que passamos durante esses dois últimos períodos.

No mais, agradecemos à Deus, que sempre nos guarda e nos ilumina, que sempre nos deu força para superarmos as dificuldades e todos os momentos difíceis que passamos durante as nossas vidas.

“Um processo não pode ser compreendido parando-o. O entendimento deve se mover com o fluxo do processo, deve se juntar a ele e fluir com ele.”
(HERBERT ,Frank,1965)

RESUMO

Durante a realização da manutenção o sistema de exploração de petróleo tem que ser paralisado, fazendo com que o óleo que sai, em elevada temperatura, dos reservatórios do Pré-Sal se encontre parado dentro de dutos que estão submersos em águas de temperaturas extremamente baixas.

Esse trabalho estuda a troca de calor realizada entre linhas submarinas de extração de petróleo e a água do mar localizada no Pré-Sal, durante momento de shutdown da linha para a realização de manutenção, até alcançar a temperatura crítica em que se inicia o processo de formação de hidratos.

O foco central é a análise dos efeitos dos tipos de materiais comumente utilizados como isolantes térmico e da sua espessura na diminuição dessa troca de calor que ocorre entre o petróleo dentro do tubo, à 60°C, com a água a temperaturas extremamente baixas do fundo do mar, que atingem temperaturas de 4°C.

Para a realização dessa análise será desenvolvido um modelo matemático no software MATLAB, com base nos conceitos de Transferência de Calor, como Condução, Convecção, Resistência Térmica e Difusão Térmica, assim como nos dados relacionados às características do local de extração selecionado.

Esse modelo irá, a partir dos parâmetros Tempo, Temperatura e Espessura, fornecer resultados de previsões de perdas de calor e de desempenhos de materiais diferentes de isolamento térmico. Possibilitando assim, a definição de estratégias operacionais que minimizem o risco de cristalização de parafinas, garantindo a confiabilidade e a eficiência de sistemas submarinos de produção.

ABSTRACT

During maintenance operations, the oil exploration system must be shutdown, causing the oil, which exits the Pre-Salt reservoirs at a high temperature, to remain stagnant inside pipelines submerged in extremely low-temperature waters.

This study investigates the heat exchange between subsea oil extraction pipelines and seawater in the Pre-Salt region during a shutdown period for maintenance, until reaching the critical temperature at which hydrate formation begins.

The central focus is the analysis of the effects of commonly used thermal insulation materials and their thickness in reducing heat exchange between the oil inside the pipe, at 60°C, and the extremely cold seawater at the seabed, which reaches temperatures of 4°C.

To conduct this analysis, a mathematical model will be developed using MATLAB software, based on Heat Transfer concepts such as Conduction, Convection, Thermal Resistance and Thermal Diffusion, as well as data related to the characteristics of the selected extraction site.

This model will use parameters of Time, Temperature and Thickness to provide predictions of heat loss and the performance of different thermal insulation materials. This will enable the definition of operational strategies to minimize the risk of paraffin crystallization, ensuring the reliability and the efficiency of subsea production systems.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação Da Profundidade Do Pré-Sal	11
Figura 2 - Representação Da Distribuição De Temperatura Em Uma Parede Plana	18
Figura 3 - Sistema Cilíndrico Com Transferência De Calor Unidimensional	21
Figura 4 - Exemplo De Circuito Térmico Para Sistema De Paredes Planas	22
Figura 5 - Exemplo De Circuito Térmico Para Sistema Cilíndrico	22
Figura 6 - Volume De Controle Infinitesimal	23
Figura 7 - Condições De Contorno Para Equação Da Difusão.....	24
Figura 8 - Depósito De Parafina Precipitado Na Parede Do Tubo	26
Figura 9 - Sistema Submarino De Produção De Petróleo	28
Figura 10 - Representação Do Volume De Controle	33
Figura 11 - Representação Gráfica Do Circuito Térmico.....	33
Figura 12 - Gráfico Da Influência Da Espessura No Tempo Até A Temperatura De Cristalização Para Diferentes Velocidades Da Água.....	39
Figura 13 - Gráfico Da Influência Da Espessura No Tempo Até A Temperatura De Cristalização Para Diferentes Velocidades Da Água Em Maior Escada	40
Figura 14 - Gráfico Da Variação Da Temperatura No Ponto Mais Frio Em Espessuras Diferentes.....	42
Figura 15 - Gráfico Da Diferença De Tempo Entre Últimos Pontos De Espessuras Consecutivas.....	43
Figura 16 - Gráfico Do Perfil Térmico Radial Em Espessuras Diferentes	44
Figura 17 - Gráfico Do Perfil Térmico Em Espessuras Diferentes Em Maior Escala.	45
Figura 18 - Gráfico Da Influência Da Espessura Até A Temperatura De Cristalização Para Materiais Diferentes	46
Figura 19 - Gráfico Do Perfil Térmico Radial Para Materiais Diferentes	47
Figura 20 - Gráfico Do Perfil Radial Para Materiais Diferentes Ponto De Contato Entre Tubo E Material Isolante	49
Figura 21 - Gráfico Do Perfil Radial Para Materiais Diferentes Ponto Final	50
Figura 22 - Gráfico De Variação De Temperatura No Ponto Mais Frio Para Materiais Diferentes.....	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros Do Caso.....	37
Tabela 2 - Resistências Térmicas Para Cada Velocidade De Corrente Ao Variar A Espessura	41
Tabela 3 - Resistência Térmica De Condução De Acordo Com O Aumento Da Espessura	44
Tabela 4 - Influência Da Espessura Até A Temperatura De Cristalização Para Materiais Diferentes	46
Tabela 5 - Perfil Térmico Radial Para Materiais Diferentes.....	48
Tabela 6 - Variação De Temperatura No Ponto Mais Frio Para Materiais Diferentes	51

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	11
1.1 MOTIVAÇÃO	11
1.2 OBJETIVO	12
2 TRANSFERÊNCIA DE CALOR.....	13
2.1 CONDUÇÃO	13
2.1.1 Número de Fourier.....	14
2.2 CONVECÇÃO.....	15
2.2.1 Camada-Limite.....	16
2.2.2 Convecção Forçada.....	16
2.2.3 Convecção Natural	17
2.3 RESISTÊNCIAS TÉRMICAS	18
2.4 EQUAÇÃO DA DIFUSÃO TÉRMICA.....	23
3 SISTEMAS SUBMARINOS DE EXPLORAÇÃO DE PETRÓLEO E SEU ISOLAMENTO TÉRMICO.....	25
3.1 MANUTENÇÃO	25
3.2 TEMPERATURA DE INÍCIO DO APARECIMENTO DE CRISTAIS	26
3.3 SISTEMAS SUBMARINOS DE EXTRAÇÃO DE PETRÓLEO.....	27
3.4 ISOLAMENTO TÉRMICO EM TUBULAÇÕES	28
4 ESTUDO DE CASO.....	32
4.1 SISTEMA	32
4.2 TAXA DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR	33
4.2.1 Energia Necessária.....	35
4.2.2 Fórmula Final.....	36
4.3 CASO ANALISADO	37
5 RESULTADOS.....	39
5.1 VELOCIDADE DE CORRENTE.....	39
5.2 EFEITO DA UTILIZAÇÃO DE ESPESSURAS DIFERENTES	42
5.2.1 Temperatura na Superfície do Isolamento	42
5.2.2 Perfil Térmico Radial.....	44
5.2.3 Influência da Espessura Até a Temperatura de Cristalização	46
5.2.4 Perfil Térmico Radial.....	47
5.2.5 Temperatura no Ponto Mais Frio	51
6 CONCLUSÃO.....	53

1 INTRODUÇÃO

A exploração de petróleo é uma das atividades mais importantes para a economia brasileira. Segundo a Proper Marine, uma empresa que realiza consultoria em engenharia, o petróleo é responsável por 31,1% da matriz energética nacional em 2022. Além disso, de acordo com o economista e professor da FGV Igor Barenboim, em 2023 a exploração de petróleo sozinha é responsável por 13% do PIB do país.

O petróleo extraído no Brasil está localizado em uma camada submarina chamada Pré-Sal, que se estende do litoral do Espírito Santo até o litoral de Santa Catarina e pode atingir até sete mil metros abaixo da superfície do mar, como representada na Figura 1. A exploração e produção de petróleo localizado em águas profundas e ultra profundas enfrenta grandes desafios como altas pressões hidrostáticas e temperaturas extremamente baixas.

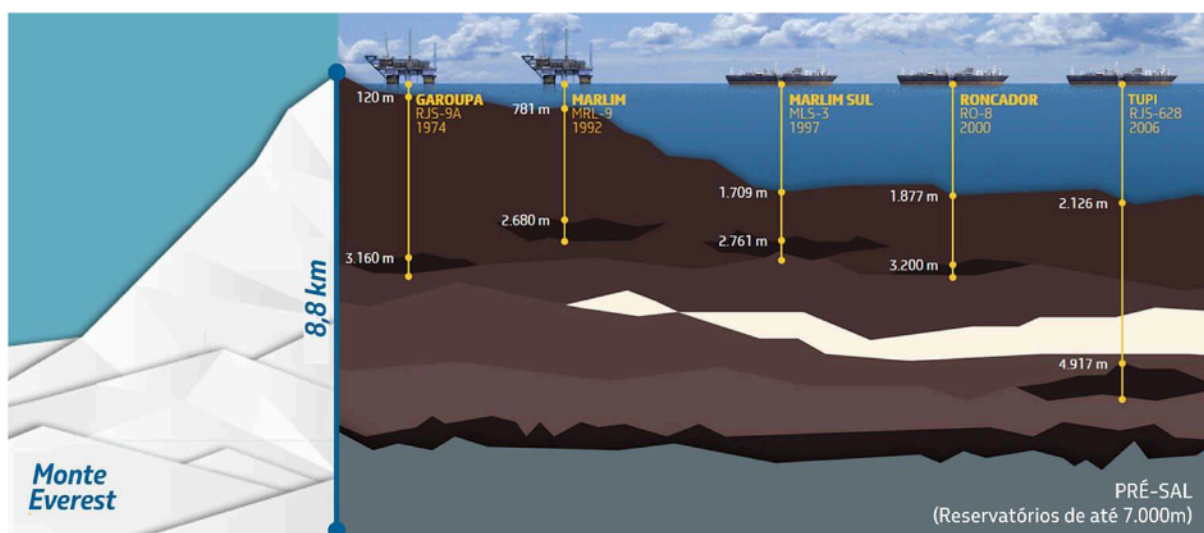


Figura 1 - Representação Da Profundidade Do Pré-Sal
Fonte: Petrobrás

1.1 MOTIVAÇÃO

Segundo (MATHEUS, 2012), produção de petróleo é um processo que ocorre de maneira contínua e ininterrupta. Visando impedir a ocorrência de falhas, prejuízos econômicos e acidentes, se faz necessário a realização de manutenções corretivas, preditivas e preventivas do sistema. Para que a manutenção das tubulações submarinas sejam feitas são planejadas paralizações da extração do óleo. Uma grande dificuldade encontrada na hora de se cumprir a manutenção é que se essa paralização demorar muito tempo pode causar a formação de hidratos.

Durante o período de *Shutdown* do sistema, o petróleo com alta temperatura se encontra parado dentro da linha submersa em águas ultra profundas de temperaturas extremamente baixas e começa a perder calor, reduzindo a sua temperatura. As parafinas podem precipitar quando ocorre mudança de composição do óleo pela quebra do equilíbrio termodinâmico (ADRIANA, 2005).

Ainda de acordo com (ADRIANA, 2005), a formação dos cristais parafínicos pode causar diversos problemas operacionais como: o óleo pode assumir características de fluido não-newtoniano, apresentando dificuldades de escoamento devido à viscosidade elevada adquirida; deposição nas paredes internas dos dutos por onde escoar o óleo, diminuindo a capacidade de escoamento ou, eventualmente, bloqueando totalmente; super dimensionamento de bombas de exportação e linhas de escoamento; elevação nos custos de aquecimento e isolamento térmico das linhas de produção e transporte.

Assim, com o intuito de impedir essa troca de calor entre o petróleo, parado dentro da linha submarina, e a água do mar se realiza o estudo do tempo máximo de *Shutdown* de uma linha a partir da análise da temperatura de início de aparecimento dos cristais parafínicos, especialmente em locais como o apresentado, onde o isolamento térmico desempenha um papel crítico.

1.2 OBJETIVO

Esse trabalho consiste na elaboração de um modelo matemático, utilizando o *software Matlab*, levando em consideração os conceitos de transferência de calor (como condução, convecção, resistência térmica e difusão térmica), os dados característicos do local onde ocorre a exploração do petróleo e as propriedades térmicas de diferentes materiais isolantes.

O objetivo é que esse modelo possibilite realizar a análise, através dos parâmetros tempo, temperatura e raio, do comportamento do óleo, parado dentro dos tubos submarinos durante o período de parada para manutenção, até ele atingir a temperatura crítica, em que se inicia o processo de formação de hidratos.

Nesse modelo será possível analisar de maneira gráfica e numérica a influência da variação da velocidade da água no tempo necessário para o fluido atingir a temperatura de cristalização, os efeitos da utilização de isolantes térmicos, de tanto espessuras variadas quanto materiais diferentes, no perfil radial térmico e na temperatura da superfície de isolamento, além influência da espessura na temperatura de cristalização para materiais diferentes.

2 TRANSFERÊNCIA DE CALOR

A prevenção da cristalização de parafinas em sistemas submarinos de extração de petróleo é um desafio crítico para a garantia da eficiência operacional e da continuidade da produção. A manutenção da temperatura do fluido acima do ponto de aparecimento de parafinas (*WAT - Wax Appearance Temperature*) depende diretamente da eficácia do controle térmico, no qual os mecanismos de transferência de calor, como condução e convecção, desempenham um papel fundamental. A condução térmica no isolamento das tubulações determina a taxa de perda de calor para o ambiente externo, enquanto a convecção, influenciada pela velocidade da corrente marítima e pelas propriedades termofísicas do fluido, regula a troca de calor na interface entre a tubulação e o meio circundante. Este capítulo aborda a aplicação dos princípios de transferência de calor utilizados para descrever esse sistema.

2.1 CONDUÇÃO

No contexto da transferência de calor, o conceito de condução é explicado pela Lei de Fourier, que estabelece que o calor é transferido de uma região de maior temperatura para uma de menor temperatura. Em sistemas submarinos de extração de petróleo o isolamento térmico das tubulações é essencial para minimizar a perda de calor do petróleo durante operações e, principalmente, em períodos de "*shutdown*". A condução de calor através do material isolante é um fator crítico que influencia a taxa de resfriamento do petróleo. A Lei de Fourier foi desenvolvida a partir de observações experimentais, e não por derivação de princípios fundamentais. Segundo (INCROPERA, 2014), a taxa de condução de calor (q_x) é proporcional à área transversal (A) através da qual o calor flui, inversamente proporcional à distância (Δx) que o calor percorre, e diretamente proporcional à diferença de temperatura (ΔT) entre as extremidades do meio condutor.

Matematicamente, a equação da taxa de transferência de calor através da condução unidimensional é expressa como:

$$q_x = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.1)$$

onde:

- q_x – Taxa de transferência de calor (W);
- k – Condutividade térmica do material, uma propriedade intrínseca que depende do tipo de material (W/m · K);
- A – Área transversal (m²);
- $\frac{\partial T}{\partial x}$ – Gradiente de temperatura ao longo da direção de fluxo de calor.

Por exemplo, considerando um isolante com condutividade térmica k , espessura L , e uma diferença de temperatura ΔT entre o petróleo e o ambiente externo, a taxa de transferência de calor pode ser calculada pela Equação (2.1),

onde A é a área superficial da tubulação. Um isolante com baixa condutividade térmica reduzirá significativamente a taxa de resfriamento, mantendo o petróleo em temperaturas acima da temperatura de cristalização de parafinas para evitar a diminuição da área de seção transversal da tubulação.

Ao dividir a taxa de transferência de calor (q_x) pela área transversal (A) através da qual o calor flui, obtém-se o fluxo de calor (q''_x), que é a quantidade de calor que passa por unidade de área. O fluxo de calor é dado pela equação:

$$q''_x = \frac{q_x}{A} = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.2)$$

O sinal negativo reflete o fato de que o calor flui na direção da diminuição da temperatura. A condução térmica é, portanto, impulsionada pelo gradiente de temperatura, e o fluxo de calor ocorre perpendicularmente às superfícies de temperatura constante.

A Lei de Fourier é aplicada de maneira geral, tanto para sólidos quanto para fluidos, independentemente do estado da matéria, e define a condutividade térmica como a propriedade chave que quantifica a capacidade de um material de conduzir calor.

2.1.1 Número de Fourier

O Número de Fourier é um número adimensional utilizado na análise de transferência de calor, particularmente em problemas de condução de calor transiente (ou não estacionário). Ele relaciona a taxa de difusão de calor de um material com o tempo e as dimensões do sistema.

Matematicamente o Número de Fourier é definido como:

$$F_o = \frac{\alpha \cdot t}{L^2} \quad (2.3)$$

Onde:

- F_o – Número de Fourier;
- $\alpha = \frac{k}{\rho \cdot c_p}$ – Difusividade Térmica do Material; (2.4)
- k – Condutividade Térmica;
- ρ – Massa Específica;
- c_p – Calor Específico;
- t – Tempo Decorrido;
- L – Dimensão característica: diâmetro externo do tubo ou largura de uma superfície retangular em contato com o escoamento;

A Equação (2.3) também é muito utilizada para a realização simplificações de volumes de controle. Dessa maneira, quando o valor do Número de Fourier for elevado, ou seja $F_o > 1$, o regime pode ser considerado estacionário.

2.2 CONVECÇÃO

O modo de transferência de calor por convecção ocorre com o contato entre um fluido em movimento e uma superfície, estando os dois a diferentes temperaturas. No caso das linhas submarinas de exploração de petróleo, elas estão localizadas em águas ultra profundas, onde as temperaturas são muito baixas, porém o óleo presente em seu interior se encontra em uma elevada temperatura. Com isso, água do mar dissipa, através da convecção, o calor dos dutos.

O coeficiente de transferência de calor por convecção é um parâmetro fundamental na análise de sistemas como dutos submarinos. Ele quantifica a eficiência que o calor é transferido entre uma superfície sólida (no caso o tubo) e um fluido (água do mar) devido ao movimento do fluido. A velocidade do fluido é um dos fatores que mais influenciam o coeficiente de transferência de calor por convecção, porque o coeficiente aumenta com a velocidade do fluido. Isso acontece, pois, a turbulência gerada pelo movimento do fluido melhora a sua mistura, aumentando a transferência de calor

A convecção abrange dois mecanismos. Além de transferência de energia devido ao movimento molecular aleatório (difusão), energia também é transferida através do movimento global, ou macroscópico, do fluido. Onde, em um instante qualquer, um grande número de moléculas estão se movendo coletivamente, ou como agregados, na presença de um gradiente de temperatura, contribuindo para a transferência de calor (INCROPERA, 2014).

A relação entre a convecção e a camada-limite é fundamental para entender como o calor é transferido entre uma superfície sólida e um fluido em movimento. A camada-limite térmica é a região próxima a uma superfície onde ocorrem gradientes significativos de temperatura devido a transferência de calor entre a superfície e o fluido.

Sua espessura é definida como a distância da superfície até o ponto onde a temperatura do fluido atinge a temperatura do fluxo livre e ela influencia diretamente no processo de convecção. Uma camada-limite atua como uma resistência ao fluxo de calor. Em uma camada-limite mais fina a resistência térmica diminui e a taxa de transferência de calor aumenta, já em uma camada-limite mais espessa maior será a resistência térmica e a taxa de transferência de calor diminui.

A convecção influencia diretamente no tempo disponível para manutenção das linhas submarinas. Quanto maior a taxa de resfriamento devido a convecção, menor será o tempo seguro de *shutdown* antes que problemas térmicos, como formação de hidratos e acúmulo de parafina, ocorram.

Independentemente da natureza do processo de transferência de calor por convecção, a equação da taxa de transferência pode ser representada pela Lei de Resfriamento de Newton:

$$q'' = h(T_s - T_\infty) \quad (2.5)$$

Na qual:

- q'' – Fluxo de calor por convecção (W/m^2);
- h – Coeficiente de transferência de calor por convecção ($W/m^2 \cdot K$);

- T_s – Temperatura de superfície (K);
- T_∞ – Temperatura do fluido (K);

Quando a Equação (2.5) é usada, o fluxo de calor por convecção é considerado positivo se o calor é transferido a partir da superfície ($T_s > T_\infty$) e negativo se o calor é transferido para a superfície ($T_s < T_\infty$).

2.2.1 Camada-Limite

O conceito de camada-limite é muito importante para a compreensão das transferências de calor e de massa por convecção entre uma superfície e um fluido em escoamento em contato com esta superfície (INCROPERA, 2014).

A superfície irá interagir com as partículas do fluido que escoam em contato com ela, causando algumas alterações nas suas características originais. As partículas em direto contato com a superfície irão sofrer uma maior influência e influenciarão também, com um menor efeito, as suas adjacentes. Assim à medida que as partículas estão mais afastadas da superfície elas sofrem menos influência, até um ponto que essa influência é desprezível. É chamada de camada-limite toda essa região que sofre efeito da superfície.

A camada-limite é classificada em três tipos: Camada-Limite de Velocidade, Camada-Limite Térmica e Camada-Limite de Concentração. E as suas principais manifestações são, respectivamente, o atrito superficial, a transferência de calor por convecção e a transferência de massa por convecção. Os seus parâmetros-chave são, por sua vez, o coeficiente de atrito, o coeficiente de calor por convecção e o coeficiente de massa por convecção, respectivamente.

Uma Camada-Limite Térmica deve se desenvolver se houver diferença entre as temperaturas do fluido na corrente livre e da superfície (INCROPERA, 2014). As propriedades da camada-limite variam significativamente com a profundidade e a velocidade da água, influenciando diretamente o comportamento térmico. Assim, a escolha de materiais isolantes deve considerar as condições específicas da camada-limite.

Com o aumento da vazão da água o escoamento tende a se tornar mais turbulento causando uma diminuição na espessura da camada-limite, com isso a taxa de transferência de calor entre a água e a superfície do material aumenta. Já em águas mais profundas, a camada-limite tende a ser mais espessa devido a menor influência da turbulência superficial.

2.2.2 Convecção Forçada

A convecção é classificada como forçada, quando o escoamento do fluido é causado por um ou mais agentes externos artificiais, como um ventilador ou uma bomba, ou naturais, como os ventos atmosféricos e a velocidade de corrente da água marinha (MACHADO JUNIOR, 2008).

O coeficiente de transferência de calor proveniente da Convecção Forçada pode ser calculado da seguinte forma:

$$h = \frac{Nu \cdot k_{\text{fluido}}}{D} \quad (2.6)$$

Sendo:

- k_{fluido} – Condutividade térmica do fluido escoado;
- $Nu = 0,027 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,33}$ – Número de Nusselt; (2.7)

- $Re = \frac{\rho \cdot V \cdot D}{\mu}$ – Número de Reynolds; (2.8)

- ρ – Densidade do fluido;

- V – Velocidade média de escoamento do fluido;

- D – Diâmetro externo do tubo;

- μ – Viscosidade dinâmica do fluido;

- $Pr = \frac{\mu \cdot C_p}{k_{\text{fluido}}}$ – Número de Prandtl; (2.9)

- C_p – Calor específico do fluido;

2.2.3 Convecção Natural

Segundo Paulo Machado Junior em sua dissertação “Isolamento Térmico Submarinos de Exploração e Produção de Óleo e Gás” a convecção é considerada natural quando o escoamento do fluido, sendo ele líquido ou gasoso, ocorre como resultado de forças de empuxo impostas a ele quando sua densidade, em proximidade com a superfície de transferência de calor, muda.

O coeficiente de transferência de calor proveniente da Convecção Natural pode ser calculado da seguinte forma:

$$h = \frac{Nu \cdot k_{\text{fluido}}}{D} \quad (2.10)$$

Sendo:

- k_{fluido} – Condutividade térmica do fluido;
- $Nu = C \cdot (Ra)^n$ – Número de Nusselt; (2.11)

- $Ra = Gr \cdot Pr$ – Número de Rayleigh, (2.12)

- $Gr = \frac{g \cdot \beta \cdot (\Delta T) \cdot L^3}{\nu^2}$ – Número de Grashof; (2.13)

- g – Aceleração gravitacional;

- β – Coeficiente de expansão térmica volumétrica;

- ΔT – Gradiente de temperatura;

- L – Dimensão característica: diâmetro externo do tubo ou largura de uma superfície retangular em contato com o escoamento;

- ν – Viscosidade cinemática do fluido;

As constantes C e n foram obtidas de maneira empírica. E segundo (INCROPERA, 2014), seus valores para cilindros circulares horizontais são apresentados a seguir:

- Para $R_a = 10^{-10}$ a 10^{-2} – $C = 0,675$ e $n = 0,058$;
- Para $R_a = 10^{-2}$ a 10^2 – $C = 1,020$ e $n = 0,148$;
- Para $R_a = 10^2$ a 10^4 – $C = 0,850$ e $n = 0,188$;
- Para $R_a = 10^4$ a 10^7 – $C = 0,480$ e $n = 0,250$;
- Para $R_a = 10^7$ a 10^{12} – $C = 0,125$ e $n = 0,333$;

2.3 RESISTÊNCIAS TÉRMICAS

Em sistemas submarinos de extração de petróleo, o cálculo das resistências térmicas é essencial para projetar um isolamento eficiente, que minimize a perda de calor e evite problemas como a formação de hidratos durante operações de "shutdown".

Considerando uma parede com um comprimento qualquer (L), representada na Figura 2, em regime estacionário, com transferência de calor unidimensional no eixo x é possível concluir que a temperatura varia linearmente ao longo da espessura (INCROPERA, 2014). Além disso, se o valor da condutividade térmica do material for constante, a temperatura é representada pela função abaixo.

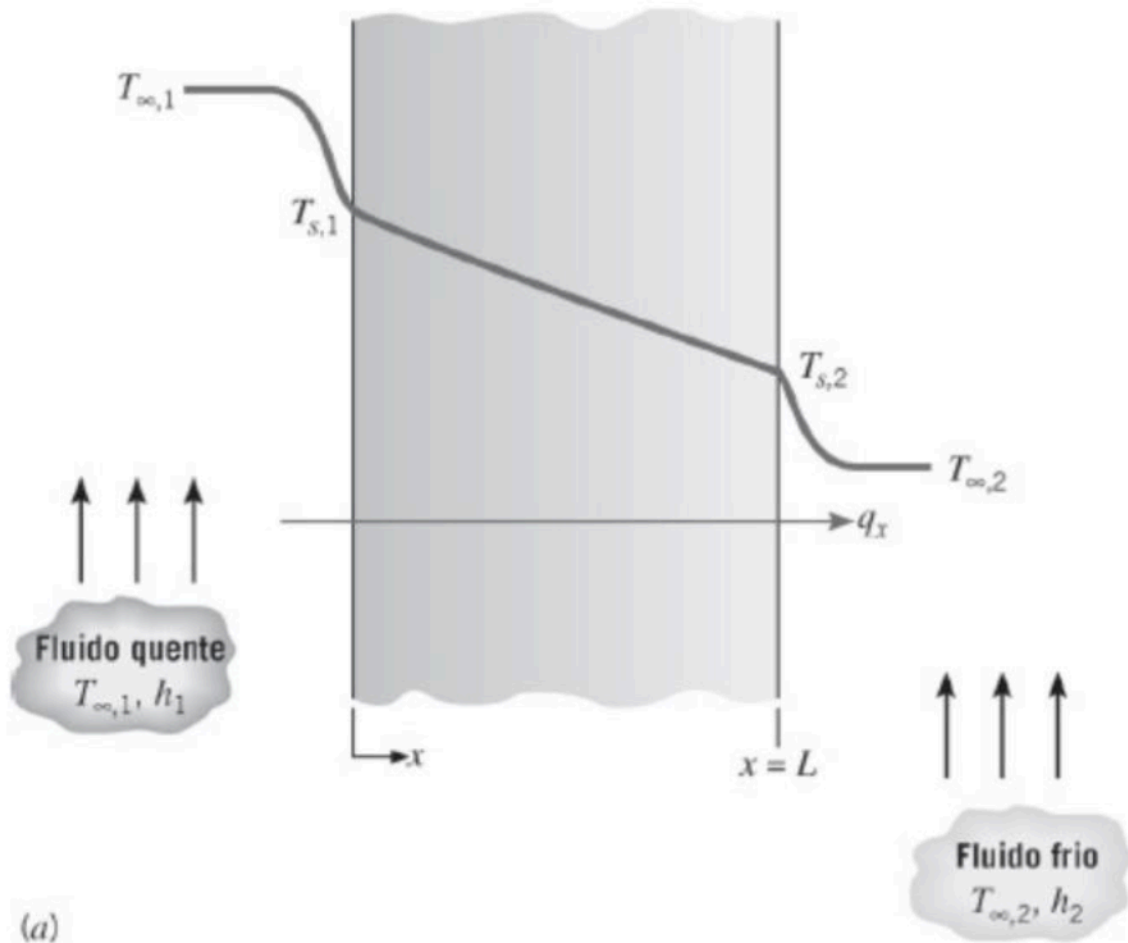


Figura 2 - Representação Da Distribuição De Temperatura Em Uma Parede Plana

$$T(x) = (T_{s,2} - T_{s,1}) \frac{x}{L} + T_{s,1} \quad (2.14)$$

Conhecendo o perfil de distribuição de temperatura ao longo da parede é possível utilizar a Lei de Fourier (Equação 2.1) para encontrar a taxa de transferência de calor.

$$q_x = -kA \frac{dT}{dx} = \frac{kA}{L} (T_{s1} - T_{s2}) \quad (2.15)$$

Levando em conta as considerações atreladas ao sistema apresentado é possível associar a transferência de calor à ideia de resistência térmica, de forma similar ao que ocorre em circuitos elétricos. Essa analogia baseia-se na relação entre um gradiente de temperatura e o fluxo de calor, que se comporta de maneira semelhante ao fluxo de corrente elétrica em função da diferença de potencial. Assim, assimila-se a resistência térmica como a razão entre a diferença de temperatura e a taxa de condução de calor.

A resistência térmica de uma parede plana, por exemplo, pode ser expressa pela equação:

$$R_{\text{cond}} = \frac{L}{kA} \quad (2.16)$$

onde:

- L – Espessura da parede (m);
- k – Condutividade térmica (W/m · K);
- A – Área perpendicular ao fluxo de calor (m²);

Essa expressão mostra que, quanto maior a espessura da parede e menor a condutividade térmica, maior será a resistência ao fluxo de calor.

A analogia com a resistência elétrica fica clara ao ser comparada com a Lei de Ohm, onde a resistência elétrica é a razão entre a diferença de potencial e a corrente elétrica. Na condução de calor, a diferença de temperatura faz o papel de "força motriz", enquanto a resistência térmica controla a taxa de transferência de calor.

$$R_e = \frac{E_{s,1} - E_{s,2}}{I} = \frac{L}{\sigma A} \quad (2.17)$$

Além da condução, o conceito de resistência térmica também se aplica à transferência de calor por convecção. Nesse caso, a equação que descreve a taxa de transferência de calor convectiva, conhecida como Lei do Resfriamento de Newton, é:

$$q = h(T_s - T_\infty) \quad (2.18)$$

Onde:

- h – Coeficiente de transferência de calor por convecção (W/m² · K);

- A – Área da superfície (m^2);
- T_s – Temperatura da superfície (K);
- T_∞ – Temperatura do fluido ao redor (K);

A resistência térmica associada à convecção, então, é definida como:

$$R_{\text{conv}} = \frac{1}{hA} \quad (2.19)$$

Em sistemas práticos, como uma parede submetida à convecção em ambos os lados, o modelo de resistências térmicas pode ser representado como um circuito em série. Nessa abordagem, a taxa de transferência de calor total pode ser obtida somando as resistências térmicas de cada parte do sistema e utilizando a seguinte equação. No entanto, essa modelagem assume que o fluxo de calor ocorre apenas na direção radial, desconsiderando efeitos longitudinais. Essa hipótese é válida para trechos muito longos, onde os gradientes térmicos na direção axial são desprezíveis. Contudo, em casos em que há gradientes térmicos significativos ao longo do comprimento da tubulação ou parede, como em sistemas com aquecimento ou resfriamento assimétrico, essa simplificação pode se tornar limitada, exigindo uma análise mais complexa que considere a transferência de calor multidimensional.

$$q = \frac{T_{\infty,1} - T_{\infty,2}}{R_{\text{tot}}} \quad (2.20)$$

Onde:

- R_{tot} – Soma das resistências condutivas e convectivas;

Esse modelo permite simplificar a análise de sistemas mais complexos de transferência de calor, fornecendo uma maneira prática de calcular o fluxo de calor através de diferentes materiais e superfícies. No caso de sistemas submarinos, a resistência térmica total do isolamento é um fator crítico para determinar o tempo de resfriamento do petróleo durante o "*shutdown*" já que é possível analisar a contribuição do isolamento térmico e das características exteriores da tubulação para a mudança de temperatura no sistema, como é feito mais a frente neste trabalho.

Segundo (INCROPERA, 2014), considerando um cilindro cujas superfícies interna e externa estão expostas a fluidos com diferentes temperaturas, Figura 3, à transferência de calor por condução de maneira logarítmica ao longo da espessura como mostra a equação abaixo.

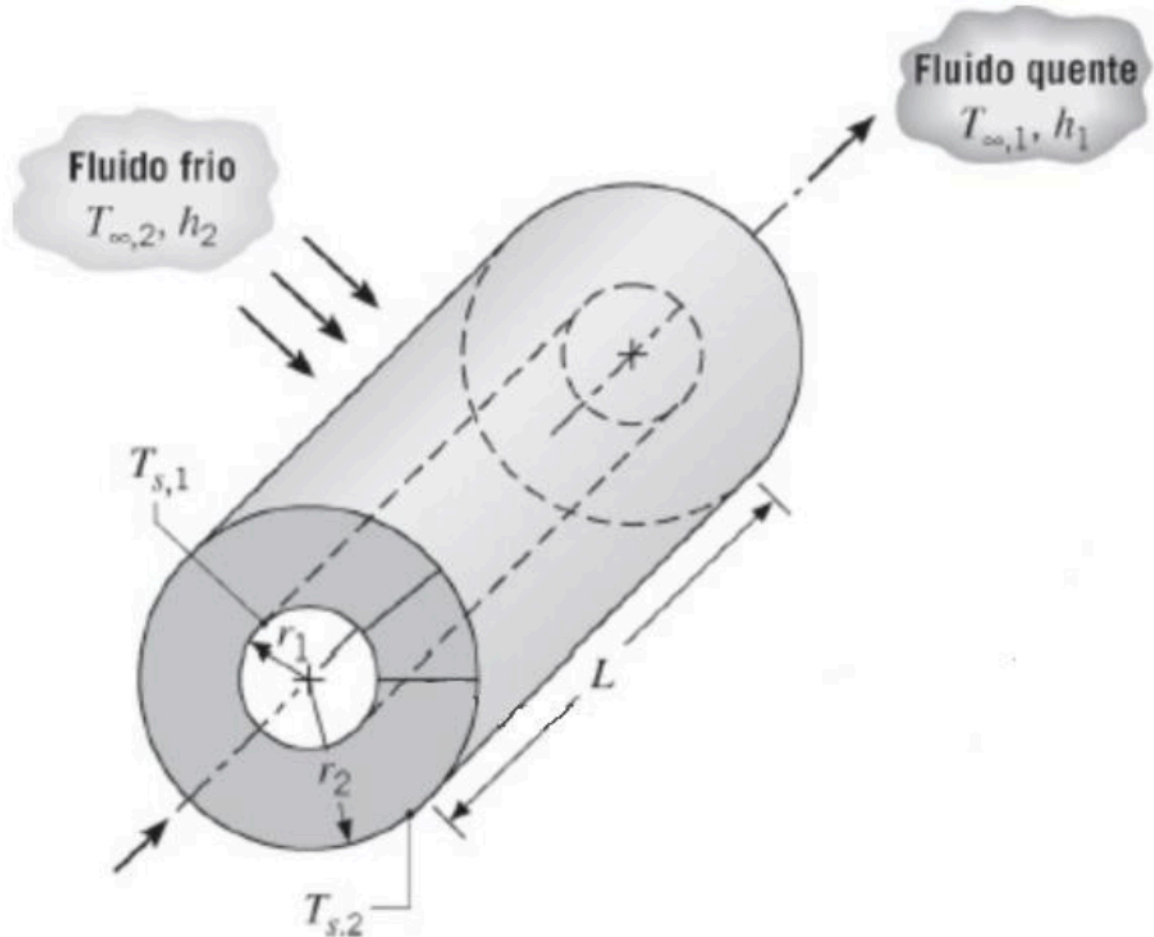


Figura 3 - Sistema Cilíndrico Com Transferência De Calor Unidimensional

$$T(r) = \frac{T_{s,1} - T_{s,2}}{\ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right)} \ln\left(\frac{r}{r_2}\right) + T_{s,2} \quad (2.21)$$

Se o sistema estiver em regime estacionário sem geração de energia, a transferência de calor for unidimensional e o coeficiente de condução (k) for constante ao longo da espessura, é possível aplicar o mesmo raciocínio utilizado no sistema de paredes planas para encontrar equações que definam as resistências térmicas de condução e convecção. Logo, as respectivas equações encontram-se abaixo:

$$R_{t,cond} = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi Lk} \quad (2.22)$$

Sendo:

- r_2 – Raio interno do cilindro (m);
- r_1 – Raio externo do cilindro (m);
- L – Comprimento do cilindro (m);

- k – Coeficiente de condução ($\text{W/m} \cdot \text{K}$);

$$R_{t,\text{conv}} = \frac{1}{2\pi r_n L h_n} \quad (2.23)$$

Sendo:

- r_n – Raio da superfície (m);
- L – Comprimento da superfície (m);
- h_n – Coeficiente de convecção ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$);

Assim como em circuitos elétricos, é possível representar as resistências térmicas graficamente em um circuito térmico. O circuito térmico referente a Figura 2, encontra-se abaixo na Figura 4, e o circuito térmico referente a Figura 3, encontra-se abaixo na Figura 5.



Figura 4 - Exemplo De Circuito Térmico Para Sistema De Paredes Planas

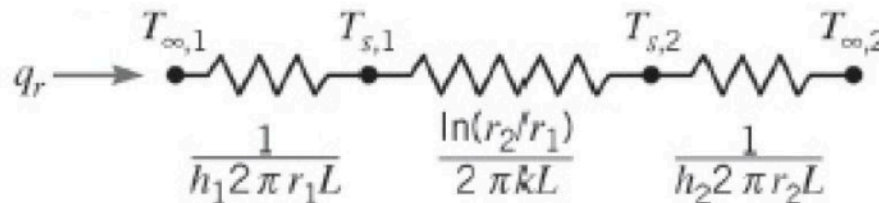


Figura 5 - Exemplo De Circuito Térmico Para Sistema Cilíndrico

A resistência térmica entre um material isolante em contato com um fluido é ditada pela condução do isolante e a convecção do fluido. Ao aplicar essas resistências na equação (2.20) é possível associar essas resistências a taxa de transferência de calor. Ao minimizar o valor da resistência térmica total, derivando a equação (2.20) com relação a r , encontra-se a equação (2.25) que é conhecida como raio crítico e representa a espessura mínima a partir da qual o isolamento térmico diminui a transferência de calor.

$$\frac{dR_{tot}}{dr} = 0 \quad (2.24)$$

$$r_{crit} = \frac{k}{h} \quad (2.25)$$

2.4 EQUAÇÃO DA DIFUSÃO TÉRMICA

Ao considerar um meio homogêneo no qual a distribuição de temperaturas $T(x, y, z)$ está representada em coordenadas cartesianas é possível definir um volume de controle infinitesimal $dx \cdot dy \cdot dz$, o qual está representado na Figura 6. Assumindo que não há movimento mecânico no volume de controle, na presença de um gradiente de temperatura haverá transferência de calor por condução em cada uma das superfícies de controle. A taxa referente a essa transferência nas superfícies opostas podem ser expressas como expansão em Série de Taylor e, ao desconsiderar os termos de ordem superior, encontram-se as equações abaixo:

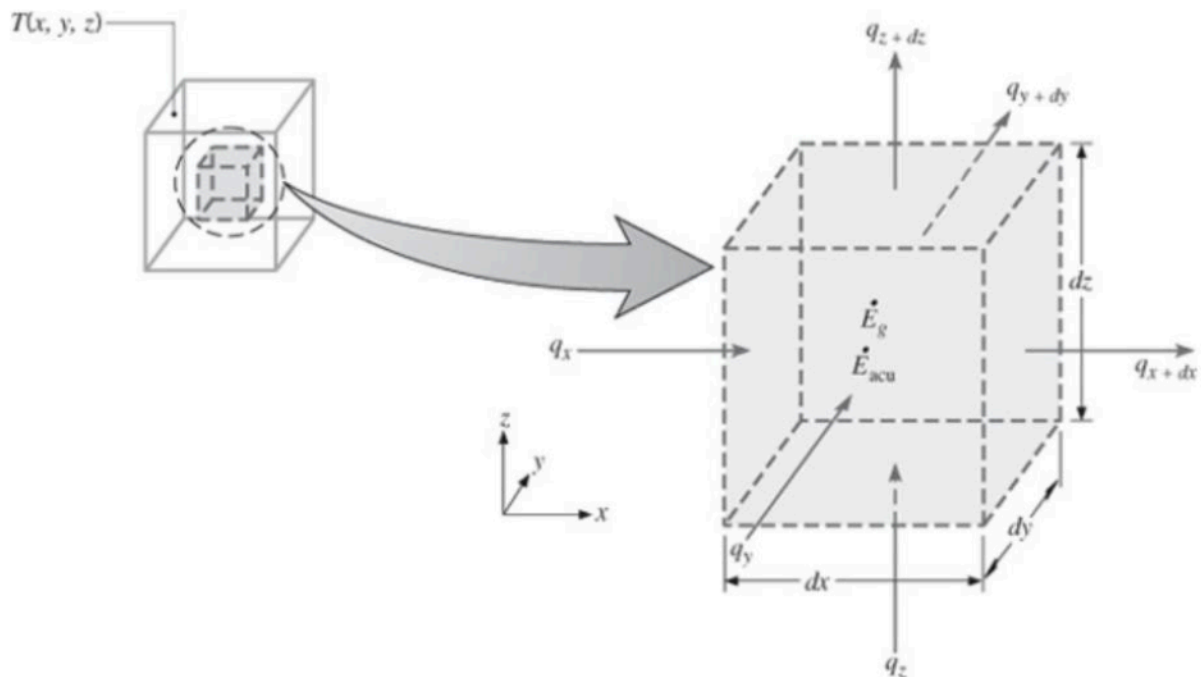


Figura 6 - Volume De Controle Infinitesimal

$$q_{x+dx} = q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx \quad (2.26)$$

$$q_{y+dy} = q_y + \frac{\partial q_y}{\partial y} dy \quad (2.27)$$

$$q_{x+dx} = q_z + \frac{\partial q_z}{\partial z} dz \quad (2.28)$$

Além disso, a geração de energia no meio e o acúmulo de energia podem ser representados pela equação (2.29) e a equação (2.30) respectivamente:

$$\dot{E}_g = \dot{q} \cdot dx dy dz \quad (2.29)$$

$$\dot{E}_{acu} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} dx dy dz \quad (2.30)$$

Por fim, ao realizar o balanço de energia representado pela equação (2.31), na qual a energia que entra é representada pelas taxas de transferência de calor q_x , q_y e q_z , determinadas pela Lei de Fourier (equação 2.1) somadas a geração de energia

(equação 2.29) e a energia que sai é determinada pelas taxas das equações (2.26, 2.27 e 2.28) encontra-se a equação (2.32) conhecida como equação da difusão.

$$\dot{E}_{\text{ent}} + \dot{E}_g - \dot{E}_{\text{sai}} = \dot{E}_{\text{acu}} \quad (2.31)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \dot{q}_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.32)$$

A equação da difusão, também conhecida como equação do calor, pode ser simplificada dependendo do caso em que está sendo aplicado. Por exemplo, considerando-se a transferência de calor unidimensional e a condutividade térmica constante, a equação se apresenta da seguinte forma:

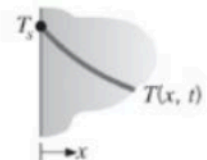
$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.33)$$

Para encontrar uma função que descreva a distribuição de temperatura ao longo do tempo em um corpo é necessário solucionar a equação da difusão. Para isso, tornam-se necessárias definir as condições de contorno. Em relação ao espaço, a equação de calor é de segunda ordem e, em relação ao tempo, é de primeira ordem.

Logo, são necessárias duas condições de contorno devem ser definidas para cada coordenada espacial e apenas uma condição inicial deve ser definida para o tempo. Dentre as condições de contorno existentes, pode-se destacar 3, estas estão apresentadas na Figura 7.

1. Temperatura na superfície constante

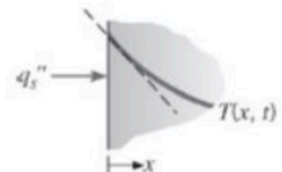
$$T(0, t) = T_s \quad (2.31)$$



2. Fluxo térmico na superfície constante

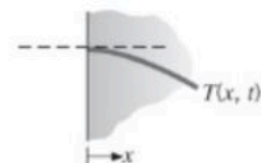
(a) Fluxo térmico diferente de zero

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = q_s^* \quad (2.32)$$



(b) Superfície adiabática ou isolada termicamente

$$\frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0 \quad (2.33)$$



3. Condição de convecção na superfície

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = h[T_\infty - T(0, t)] \quad (2.34)$$

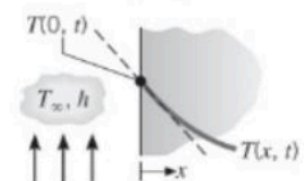


Figura 7 - Condições De Contorno Para Equação Da Difusão

3 SISTEMAS SUBMARINOS DE EXTRAÇÃO DE PETRÓLEO E SEU ISOLAMENTO TÉRMICO

As paradas técnicas em sistemas submarinos de extração de petróleo representam um desafio operacional significativo, especialmente no que diz respeito ao controle térmico e à prevenção da cristalização de parafinas. Durante esses períodos de interrupção do fluxo, a temperatura do petróleo nas tubulações pode cair abaixo do ponto de aparecimento de parafinas (*WAT - Wax Appearance Temperatura*), resultando na formação de depósitos sólidos que comprometem a eficiência e a segurança do sistema. A cristalização de parafinas é um fenômeno crítico que pode levar ao entupimento de tubulações, aumento da pressão de operação e elevados custos de intervenção. Este capítulo aborda os impactos das paradas técnicas em sistemas submarinos, com foco na análise térmica e nas estratégias para mitigar a cristalização de parafinas. São discutidos métodos de monitoramento de temperatura, técnicas de isolamento térmico e procedimentos para manter o fluido em condições operacionais adequadas durante e após as paradas.

3.1 MANUTENÇÃO

De acordo com a norma ABNT 5462, manutenção é a “combinação de todas as ações técnicas e administrativas, incluindo ações de supervisão, destinadas a manter ou recolocar um item em um estado no qual ele possa desempenhar uma função requerida”. Pode-se destacar os seguintes tipos de manutenção:

Manutenção corretiva: Feita após a ocorrência da falha com o objetivo de restaurar o funcionamento do item para que ele possa desempenhar sua função

Manutenção preditiva: Feita após a identificação de anomalias através do monitoramento e análise contínua das condições de operação com o objetivo de corrigi-las antes que se tornem falhas.

Manutenção preventiva: Feita em intervalos predeterminados ou de acordo com critérios prescritos para que a probabilidade de falha ou degradação de um item seja diminuída. Também chamada de manutenção programada.

Como plataformas de petróleo possuem uma infraestrutura extremamente complexa, funcionamento contínuo e ininterrupto, torna-se necessária a manutenção de todos os equipamentos envolvidos. Manutenções preventivas, preditivas e corretivas tornam-se essenciais para preservar a integridade dos sistemas, evitar prejuízos econômicos e garantir a segurança de todos os envolvidos. Em muitos casos, a realização de paradas programadas da planta é necessária para garantir seu funcionamento. (MATHEUS, 2012).

A interrupção da operação de parte do sistema submarino de produção de petróleo é chamado de *Shut Down* (Machado, 2008) e pode ocorrer devido a paradas programadas para manutenção preventiva ou corretiva, emergências causadas por falha ou vazamentos e condições extremas. Durante esse processo ocorre o

resfriamento do sistema devido a troca de calor com o ambiente marinho, a duração desse processo é denominada *Cooldown Time*. Uma medida comumente utilizada para mitigar essa troca é a adoção de isolamentos térmicos.

O *Shut Down* em plataformas de petróleo, seja por manutenção programada ou emergencial, implica no resfriamento das tubulações submarinas. Durante esse processo, a temperatura do petróleo pode cair abaixo de um limiar crítico, levando à cristalização de parafinas e hidratos, que podem obstruir as *flowlines* e comprometer a operação. O uso de isolamento térmico nas tubulações é essencial para retardar o resfriamento, mantendo o petróleo em temperaturas adequadas por mais tempo e minimizando o risco de cristalização. Dessa forma, o isolamento térmico não apenas preserva a integridade do sistema, mas também reduz custos operacionais.

3.2 TEMPERATURA DE INÍCIO DO APARECIMENTO DE CRISTAIS

Em sistemas de coleta de petróleo é necessário manter a garantia de escoamento. Esse conceito refere-se à capacidade de garantir que o petróleo extraído seja transportado de maneira contínua e eficiente. Dentre todos os parâmetros que envolvidos nesse conceito pode-se destacar a cristalização de parafinas. Quando o petróleo atinge a Temperatura de Aparecimento de Cristais, a qual é próxima a temperatura ambiente, inicia-se um processo de solidificação de parafina em regiões mais frias, nesse caso a parede interna da tubulação, o que diminui a área de seção transversal impedindo um fluxo aceitável de fluido como mostra a Figura 8.



Figura 8 - Depósito De Parafina Precipitado Na Parede Do Tubo
Fonte: Lemos 2018

Logo, determinar a TIAC é fundamental para manter a garantia de escoamento. Existem duas formas de determinar essa temperatura, através de modelos analíticos termodinâmicos e de análises experimentais (ADRIANA, 2005). Em seu trabalho, ela afirma que os métodos experimentais mais utilizados são os seguintes:

Calorimetria diferencial de varredura (DSC): Determina a temperatura em que ocorre a mudança da fase líquida para a sólida através da detecção da liberação de calor latente. Este método é considerado o mais preciso.

Reologia (método de variação de viscosidade- MVV): Detecção das mudanças de propriedades reológicas dos petróleos causadas pela cristalização de parafinas.

Microscopia óptica de luz polarizada (MOLP): O princípio da microscopia óptica de luz polarizada baseia-se na propriedade de anisotropia óptica dos materiais cristalinos que não possuem geometria cúbica. Esses materiais são capazes de alterar o plano da luz polarizada, um fenômeno observado nos cristais de parafina. Quando visualizados entre dois prismas de Nicol cruzados, os cristais aparecem como pontos luminosos sobre um fundo escuro.

Método de variação de densidade (MVD): Detecção da temperatura em que a mudança da densidade do petróleo causada pela cristalização de parafinas é iniciada.

Para determinação analítica da Temperatura de início de aparecimento de cristais é utilizada a equação de equilíbrio sólido líquido (FILIPAKIS, 2011). Porém para uma boa representação das não-idealidades do sistema são adotados modelos que podem utilizar tanto a teoria da solução sólida quanto a de múltiplas fases sólidas. Enquanto o primeiro considera a formação de uma única fase sólida o segundo considera a formação de diversas fases sólidas puras.

Logo, para que seja possível garantir o escoamento foram desenvolvidos métodos para evitar/mitigar a cristalização de parafina. Abaixo, encontram-se alguns exemplos:

Inibidor de deposição de parafina: Consiste na adição de compostos químicos em que uma parte é semelhante a parafina (apolar) permite a cristalização enquanto a outra parte (polar) altera a morfologia dos cristais o que impede o crescimento específico.

Isolamento térmico: Consiste na adição de uma camada de material isolante térmico na parte externa da tubulação para que a troca térmica entre o petróleo e o meio externo seja desacelerada tornando mais difícil para a TIAC ser atingida.

Pigging: Consiste na inserção de um objeto cilíndrico na tubulação (*PIG - Pipeline Inspection Gauge*) que percorre o caminho do fluido, através do diferencial de pressão, removendo os detritos cristalizados na parede interna.

3.3 SISTEMAS SUBMARINOS DE EXTRAÇÃO DE PETRÓLEO

De acordo com (MONTEIRO; CHAVES, [s.d.]), “O sistema submarino de produção tem como objetivo assegurar o escoamento do óleo, controlar e monitorar parâmetros como pressão, temperatura, vazão, além de fornecer energia elétrica e hidráulica para o funcionamento do sistema como um todo”. A composição desse sistema está destacada na Figura 9. Nele, pode-se destacar os componentes abaixo:

Manifolds: É um arranjo de tubulações e válvulas com o objetivo de distribuir, controlar e em alguns casos monitorar o fluxo de petróleo referente a 2 ou mais poços. Além disso, também pode ser utilizado para injetar água no poço.

Árvore de Natal: É um conjunto de válvulas, conexões e sensores instalado no poço com o objetivo de controlar, monitorar e, em alguns casos, isolar o fluxo de petróleo e gás. Além disso, permite a injeção de fluidos, como água ou produtos químicos, para manutenção do reservatório ou do próprio poço.

Flowlines: São tubulações que conectam os poços (através das árvores de Natal) aos *manifolds* ou diretamente às instalações de processamento e armazenamento. Seu objetivo é transportar petróleo, gás, água ou fluidos de injeção de maneira segura e eficiente. Além disso, podem ser utilizadas para o retorno de fluidos de tratamento ou reinjeção nos reservatórios.

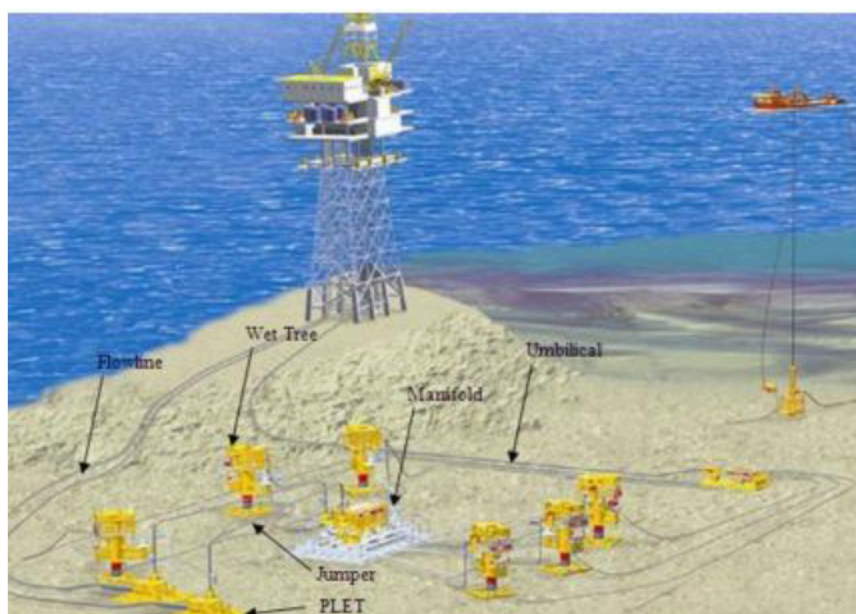


Figura 9 - Sistema Submarino De Produção De Petróleo

3.4 ISOLAMENTO TÉRMICO EM TUBULAÇÕES

Existem diversos métodos que podem ser utilizados para manter, por um maior período de tempo, a temperatura do petróleo presente dentro das linhas submarinas, a fim de evitar a formação de hidratos e acúmulo de parafina dentro da tubulação, como utilização de isolamento térmico, injeção de inibidores e aquecimento ativo.

Entre esses métodos, o método de utilização de isolantes térmicos se torna mais vantajoso por alguns motivos:

- **Eficiência Energética:**

Métodos como aquecimento ativo necessitam do consumo constante de energia, enquanto o isolamento térmico funciona passivamente reduzindo a troca de calor com a água do mar;

- **Menor Custo Operacional:**

Os isolantes térmicos não necessitam do uso contínuo insumos, enquanto a injeção de inibidores precisa regularmente da reposição de inibidores químicos e sistemas de aquecimento ativo consomem eletricidade ou combustível;

- **Sustentabilidade:**

O uso de isolamentos térmicos reduz o consumo de energia, diminuindo a emissão de carbono e o impacto ambiental, evita a utilização excessiva de produtos químicos;

- **Durabilidade e Confiabilidade:**

O isolamento térmico reduz o risco de falhas operacionais e problemas como congelamento sem a necessidade de intervenção contínua. Um bom isolamento pode durar décadas sem a necessidade de substituição significativa, enquanto o aquecimento elétrico pode falhar devido a cortes de energia, falhas nos cabos ou curtos-circuitos e a injeção de inibidores pode ser afetada por falhas de dosagem ou problemas de compatibilidade química;

Todos os isolamentos térmicos têm por finalidade geral reduzir as trocas de calor da tubulação para o meio ambiente, ou vice-versa (TELLES, 2012). Eles se distinguem duas classes:

- Isolamento Para Linhas Quentes: uma tubulação que possua uma temperatura de operação superior a temperatura do ambiente;
- Isolamento Para Linhas Frias: uma tubulação que possua uma temperatura de operação inferior a temperatura do ambiente;

De acordo com (MACIEL, 2015), para qualquer uma dessas duas classes o isolamento térmico pode ser usado por diversas razões, dentre elas:

1. Motivo Econômico ($T > 80^{\circ}\text{C}$ e $T < 0^{\circ}\text{C}$): As perdas ou ganhos de calor para o exterior representam um desperdício de energia que deverá ser empregada no aquecimento ou resfriamento do fluido contido na tubulação.
2. Motivo de Serviço (aplicado a qualquer temperatura): Muitas vezes o isolamento térmico deve ser aplicado devido à natureza do serviço, seja para manter o fluido em uma determinada temperatura, seja para conseguir que o fluido possa chegar ao destino com a temperatura desejada. A manutenção de um fluido em uma determinada temperatura pode ser necessária, entre outras razões, para evitar o congelamento, a vaporização, a polimerização ou transformações químicas do fluido.
3. Proteção Pessoal (PETROBRAS N-550: $T > 60^{\circ}\text{C}$ e $T < 0^{\circ}\text{C}$, em tubulações a menos de 2 metros de altura ou a menos de 1 metro de distância de qualquer piso de operação): O isolamento térmico pode ser necessário para evitar acidentes (segurança), caso alguém

encoste na tubulação, ou para evitar o desconforto da excessiva irradiação térmica.

No caso das tubulações submarinas de petróleo, o isolamento térmico utilizado será o isolamento para linhas quentes, sendo seu principal motivo minimizar as perdas de calor das linhas de tubulação, evitando que elas atinjam a temperatura de aparecimento dos cristais, impedindo assim, a formação de hidratos e incrustações de parafina.

Existe uma variedade de opções de materiais utilizados para realização do isolamento térmico das tubulações submarinas. Dentre elas, as principais são:

- Hidrossilicato de Cálcio:

É um material composto principalmente de silicato de cálcio hidratado. Muito utilizado na indústria petroquímica para isolamento térmico de tubulações, caldeiras, tanques e reatores.

Suas principais características são: possui uma baixa condutividade térmica, pode operar de forma eficiente em temperaturas que variam entre -50°C e 1000°C, além de ser incombustível, possuir baixa densidade e boa durabilidade.

- Polipropileno Expandido:

É um material feito a partir de polipropileno, um polímero termoplástico, processado para formar uma espuma de baixa densidade, sendo ele leve e versátil.

Possui como principais características a baixa condutividade térmica, alta resistência ao impacto, boa elasticidade, resistência a umidade e a água salgada, baixa densidade e boa durabilidade.

- Aerogel:

É um material sólido e poroso derivado de um gel, no qual o componente líquido do gel foi substituído por gás. Ele é um ótimo isolante térmico por ser capaz de anular totalmente duas das três formas de calor (convecção e condução).

Suas principais características são: densidades baixíssimas (em torno de 0,003 e 0,5 g/cm^3), alta área específica, alta porosidade e baixa condutividade térmica.

A maior aplicação do material, em isolamento térmico, consiste na utilização de aerogéis de sílica em mantas de isolamento de dutos submarinos na indústria de petróleo e gás.

- Novolastic:

É um material a base de silicone RTV, desenvolvido com uma fórmula proprietária da TMC Technologies, que pode ser moldado no local ou pré-moldado. Trata-se de um isolante térmico altamente flexível, aplicado a componentes submetidos a serviços de imersão em águas profundas.

Pode ser utilizado em Árvores de Natal, *Manifolds*, tubulações *Jumper* e componentes similares como isolamento térmico para inibir e/ou retardar a formação hidratos e o depósito de parafina. O sistema Novolastic consiste em uma camada.

- Hyperlastic Syntatic:

O Hyperlastic Syntatic DW 512/300E é uma mistura de polioli à base de poliéter que reage com o Hyperlastic LE 5046 para produzir um poliuretano sintético com alta resistência à compressão.

O material é projetado para suportar profundidades de até 3000 metros de lâmina d'água e para temperaturas de operação de até 115°C (em condições secas) e foi desenvolvido para ser aplicado por meio de um processo de moldagem.

- Fibra de Vidro:

A Fibra de Vidro é um material formado por finos filamentos de vidro flexíveis que são transformados em fibras. Essas fibras, compostas principalmente por sílica, são combinadas com resinas plásticas ou outros materiais para criar produtos leves, duráveis e resistentes. É um material amplamente utilizado em diversas aplicações, podendo ser moldado em diferentes tamanhos e formas, devido às suas propriedades únicas, como resistência mecânica, a umidade, a fogo e a corrosão, além de ser de fácil instalação e muito leve.

Outro uso muito recorrente da Fibra de Vidro é como isolantes térmicos. É utilizada tanto em aplicações residenciais, onde é utilizada na forma de Lã de Vidro, quanto industriais em ambientes onde é necessário reduzir a transferência de calor.

- Lã de Rocha:

A Lã de Rocha é um material produzido a partir de rochas vulcânicas, como basalto e calcário, destacando-se por suas propriedades isolantes térmicas e acústicas. Essas rochas são fundidas a altas temperaturas (cerca de 1500°C) e transformadas em fibras finas, que são unidas para formar mantas, painéis, tubos e flocos.

Esse material é amplamente utilizado em diversos segmentos, como construção civil, naval, em indústrias e em usinas, porque além de um ótimo isolamento térmico também desempenha um papel importante na resistência ao fogo, à água e à corrosão.

4 ESTUDO DE CASO

Este capítulo propõe o desenvolvimento de um modelo analítico para a análise de parâmetros críticos, modelo considera a distribuição de temperatura ao longo da tubulação, integrando os efeitos da condução no isolamento térmico e da convecção no ambiente externo. O objetivo é fornecer uma ferramenta robusta para a previsão de perdas de calor, a seleção de materiais isolantes e a definição de estratégias operacionais que minimizem o risco de cristalização de parafinas, garantindo a confiabilidade e a eficiência de sistemas submarinos de produção.

4.1 SISTEMA

O Sistema consiste em uma *flowline* de petróleo durante uma parada de produção para manutenção do sistema de bombeamento. Nesse caso, é necessário dimensionar um isolamento térmico que permita que um fluido fique uma quantidade de horas em repouso sem atingir a temperatura de cristalização de parafina. Para isso, será feito um modelo matemático que relacione a espessura do isolamento térmico e as horas de manutenção.

Para o desenvolvimento do modelo, considerou-se um volume de controle, conforme ilustrado na Figura 10. Para este, as considerações iniciais e as condições de contorno foram descritas abaixo.

- **Geração de Calor:**
Não há geração de calor interna
- **Regime:**
Apesar do valor do número de Fourier desse volume de controle, calculado para um período de 10 horas ser 0,45, ou seja $F_o < 1$, para simplificação do modelo será considerado um regime transiente por partes.
- **Transferência de Calor:**
A transferência de calor é unidimensional radial e ocorrerá através da parede da tubulação e da camada de isolante.
- **Resistência de Contato:**
A resistência de contato foi considerada desprezível.
- **Condutividades Térmicas:**
As condutividades térmicas foram consideradas uniformes.
- **Radiação Solar:**
Devido a profundidade em que o volume de controle se encontra, o efeito da radiação solar foi considerada desprezível.
- **Sistema:**
O sistema é fechado.

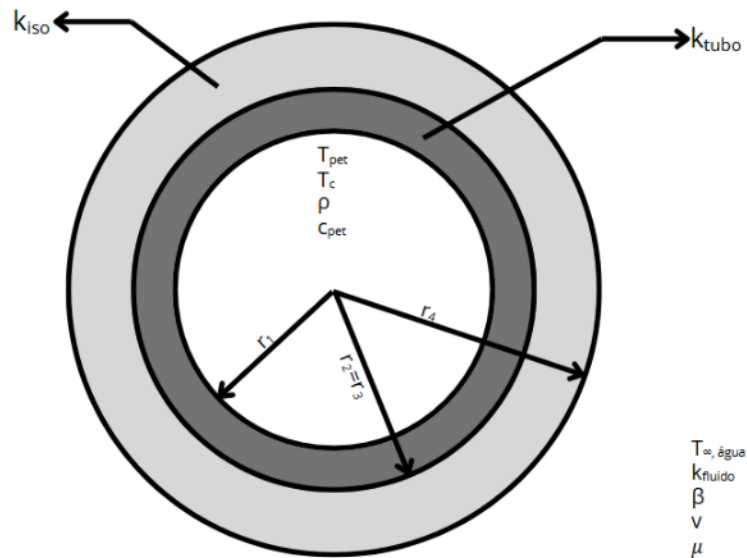


Figura 10 - Representação Do Volume De Controle

4.2 TAXA DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Conforme (INCROPERA,2014) “Da mesma maneira que uma resistência elétrica está associada a condução de eletricidade, uma resistência térmica pode ser associada à condução de calor.”. Como a transferência de calor foi considerada unidimensional, para encontrá-la, esse sistema pode ser simplificado na forma de um circuito térmico radial equivalente de paredes compostas. Nesse modelo, a taxa é uma relação entre as temperaturas globais e a resistência total (INCROPERA,2014).

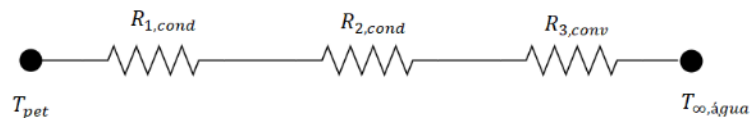


Figura 11 - Representação Gráfica Do Circuito Térmico

A Figura 11 representa o circuito térmico de paredes compostas equivalente à tubulação em análise. Neste, existe a condução entre o petróleo em repouso e a tubulação, onde a temperatura da face interna da tubulação é a mesma do petróleo, a condução entre a tubulação e o revestimento térmico e a convecção entre o revestimento térmico e o oceano. Aplicando a Equação (2.16) e (2.17) encontra-se as equações abaixo:

$$R_{1,cond} = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot k_{\text{tubo}}} \quad (4.1)$$

Sendo:

- $R_{1,cond}$ – Resistência térmica por condução do tubo;
- L – Comprimento da superfície (m);
- k_{tubo} – Condutividade térmica do tubo ($W/m \cdot K$);
- r_1 – Raio interno do tubo (m);
- r_2 – Raio externo do tubo (m);

$$R_{2,cond} = \frac{\ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot k_{iso}} \quad (4.2)$$

Onde:

- $R_{2,cond}$ – Resistência térmica por condução do isolamento;
- k_{iso} – Condutividade térmica do isolamento ($W/m \cdot K$);
- r_4 – Raio externo do isolamento (m);
- r_3 – Raio interno do isolamento (m);

$$R_{3,conv} = \frac{1}{2 \cdot r_4 \cdot L \cdot h_4} \quad (4.3)$$

Considerando que:

- $R_{3,conv}$ – Resistência térmica por convecção da água;
- r_4 – Raio externo do isolamento (m);
- L – Comprimento da superfície (m);
- h_4 – Coeficiente de convecção ($W/m^2 \cdot K$);

Com as resistências definidas, é possível encontrar a resistência total equivalente para, em seguida, encontrar a taxa de transferência de calor através da Equação 4.5.

$$R_{tot} = \frac{1}{\frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot k_{tubo}} + \frac{\ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot k_{iso}} + \frac{1}{2 \cdot r_4 \cdot L \cdot h_4}} \quad (4.4)$$

Onde:

- R_{tot} – Resistência térmica total;

$$q'_x = \frac{T_{\text{pet}} - T_{\infty, \text{água}}}{\frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot k_{\text{tubo}}} + \frac{\ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot k_{\text{iso}}} + \frac{1}{2 \cdot r_4 \cdot L \cdot h_4}} \quad (4.5)$$

Considerando que:

- q'_x – Taxa de transferência de calor (W);
- T_{pet} – Temperatura do petróleo (K);
- $T_{\infty, \text{água}}$ – Temperatura da água (K);

4.2.1 Energia Necessária

Como o objetivo é evitar a cristalização de hidratos de hidrocarboneto, podemos definir a temperatura de cristalização como a temperatura final do fluido. Além disso, a quantidade de calor é a energia total trocada entre dois corpos devido sua diferença de temperatura (YOUNG & FREEDMAN, 2008) (HALIDAY VOLUME 2), ao aplicar a Equação (4.6) encontra-se a energia que deve ser perdida através da taxa de transferência de calor.

$$Q = mc(T_c - T_{\text{pet}}) \quad (4.6)$$

Sendo:

- Q – Capacidade térmica (W);
- m – Massa (kg);
- c – Calor específico (J/kg · K);
- T_c – Temperatura de cristalização (K);

Porém, para que essa fórmula seja mais generalizada, é necessário associar a massa à parâmetros que podem ser encontrados com mais facilidade. Neste modelo, serão a massa específica e o volume.

$$Q = (\rho V)c_{\text{pet}}(T_c - T_{\text{pet}}) \quad (4.7)$$

Onde:

- ρ – Massa específica (kg/m³);
- V – Volume (m³);
- c_{pet} – Calor específico do petróleo (J/kg · K);

Como volume é o produto da área pelo comprimento e a tubulação é de seção circular, tem-se:

$$Q = \left(\rho \cdot \frac{\pi \cdot r_1^2}{2} \cdot L \right) \cdot c_{\text{pet}} \cdot (T_c - T_{\text{pet}}) \quad (4.8)$$

4.2.2 Fórmula Final

Como q'' é a energia transferida por segundo e a capacidade térmica é a energia total necessária para atingir uma variação de temperatura definida, ambas podem ser relacionadas como mostra a fórmula (4.9). Porém, para a análise desse volume de controle, é mais interessante que o tempo seja apresentado em horas como mostra a fórmula (4.10).

$$q' \cdot t = Q \quad (4.9)$$

$$q' \cdot \frac{h}{3600} = Q \quad (4.10)$$

Ao aplicar as fórmulas encontradas anteriormente para o fluxo de calor, Equação (4.5), e a capacidade térmica, Equação (4.8), encontra-se:

$$\frac{T_{\text{pet}} - T_{\infty, \text{água}}}{\frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot k_{\text{tubo}}} + \frac{\ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot k_{\text{iso}}} + \frac{1}{2 \cdot r_4 \cdot L \cdot h_4}} \cdot \frac{h}{3600} = \left(\rho \cdot \frac{\pi \cdot r_1^2}{2} \cdot L \right) \cdot c_{\text{pet}} \cdot (T_c - T_{\text{pet}}) \quad (4.11)$$

Para que esse modelo possa ser aplicado com mais facilidade em diversos problemas, é necessário deixá-lo mais geral. Para isso, é possível dividir ambos os lados da equação pelo comprimento, para que seja o fluxo e a capacidade térmica por unidade de comprimento da tubulação.

$$\frac{T_{\text{pet}} - T_{\infty, \text{água}}}{\frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2 \cdot \pi \cdot k_{\text{tubo}}} + \frac{\ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)}{2 \cdot \pi \cdot k_{\text{iso}}} + \frac{1}{2 \cdot r_4 \cdot h_4}} \cdot \frac{h}{3600} = \left(\rho \cdot \frac{\pi \cdot r_1^2}{2} \right) \cdot c_{\text{pet}} \cdot (T_c - T_{\text{pet}}) \quad (4.12)$$

Por fim, para que seja possível visualizar com mais facilidade os valores associados a espessura de isolamento, reorganizou-se a equação da seguinte forma:

$$\ln(r_4) - \ln(r_3) = \frac{6\pi^3 k_{\text{iso}} k_{\text{tubo}} h_4 (T_{\text{pet}} - T_{\infty, \text{água}}) h}{(4\pi^2 k_{\text{tubo}} h_4 + 6\pi^3 \ln(r_2/r_1) k_{\text{iso}} h_4 + 4\pi^2 k_{\text{iso}} k_{\text{tubo}}) \cdot \left(\rho \cdot \frac{\pi \cdot r_1^2}{2} \right) \cdot c_{\text{pet}} \cdot (T_c - T_{\text{pet}}) \cdot 3600} \quad (4.13)$$

4.3 CASO ANALISADO

O caso analisado consiste em um duto localizado no Campo de Tupi, que pertence ao Bloco BM-11, na porção central da Bacia de Santos, a cerca de 280 quilômetros da costa do estado do Rio de Janeiro e em águas com profundidade de 2149 metros. Esse duto de aço é utilizado para levar o óleo, retirado do Pré-Sal à elevada temperatura, até a plataforma.

Em um determinado momento foi necessário a paralização do sistema para que fosse realizada a sua manutenção. Enquanto isso, o óleo presente dentro da tubulação se encontra parado perdendo calor devido as extremamente baixas temperaturas atingidas pela água do mar naquela profundidade.

A *Flowline* analisada neste caso consistem em um tubo Schedule SCH 40 de diâmetro nominal 6" que estará exposto a temperatura da água marinha de 4°C. Os parâmetros correspondentes do local, do duto e do material isolante utilizados para a realização do estudo da perda de calor do petróleo presente no interior do duto, podem ser observados na tabela 1.

Parâmetros	Valor	Unidade
Condutividade Térmica do Tubo	43	W/m · K
Raio Interno do Tubo	0,084	m
Raio Externo do Tubo	0,077	m
Condutividade Térmica do Isolamento	0,167	W/m · K
Temperatura da Água	277	K
Condutividade Térmica da Água Marinha	0,607	W/m · K
Viscosidade Cinemática da Água Marinha	$1,55 \cdot 10^{-6}$	m ² /s
Viscosidade Dinâmica da Água Marinha	$1,6 \cdot 10^{-3}$	P _a · s
Calor Específico da Água Marinha	4181,7	J/kg · K

Tabela 1 - Parâmetros Do Caso

Segundo (CORRÊA, 2013) o óleo oriundo do Pré-sal na Bacia de Santos possui uma temperatura (T_{pet}) de 60°C ou 333K. Já de acordo com a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, o petróleo proveniente do Pré-Sal possui um API médio de 28,1, sendo 2,3% da produção considerada óleo leve (≥ 31 API), 91,2% óleo médio (≥ 22 API e < 31 API) e 6,5% óleo pesado (< 22 API). Com essa informação pode-se utilizar a fórmula (4.14) de classificação do API de um óleo.

$$API = 141,5/\rho - 131,5 \quad (4.14)$$

Considerando API = 28,1, temos que $\rho = 0,887$ g/cm³. Alterando a sua unidade no intuito de facilitar as futuras contas, encontra-se que o valor da massa específica (ρ) é 887 kg/m³.

Em relação ao valor do calor específico do petróleo, foi utilizado a tabela da Empresa Sucrana – Soluções em Engenharia que fornece os valores de calor específico para diversos líquidos, sendo um deles o petróleo, apresentando um calor específico (c_{pet}) com o valor de $2130 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$.

5 RESULTADOS

5.1 VELOCIDADE DE CORRENTE

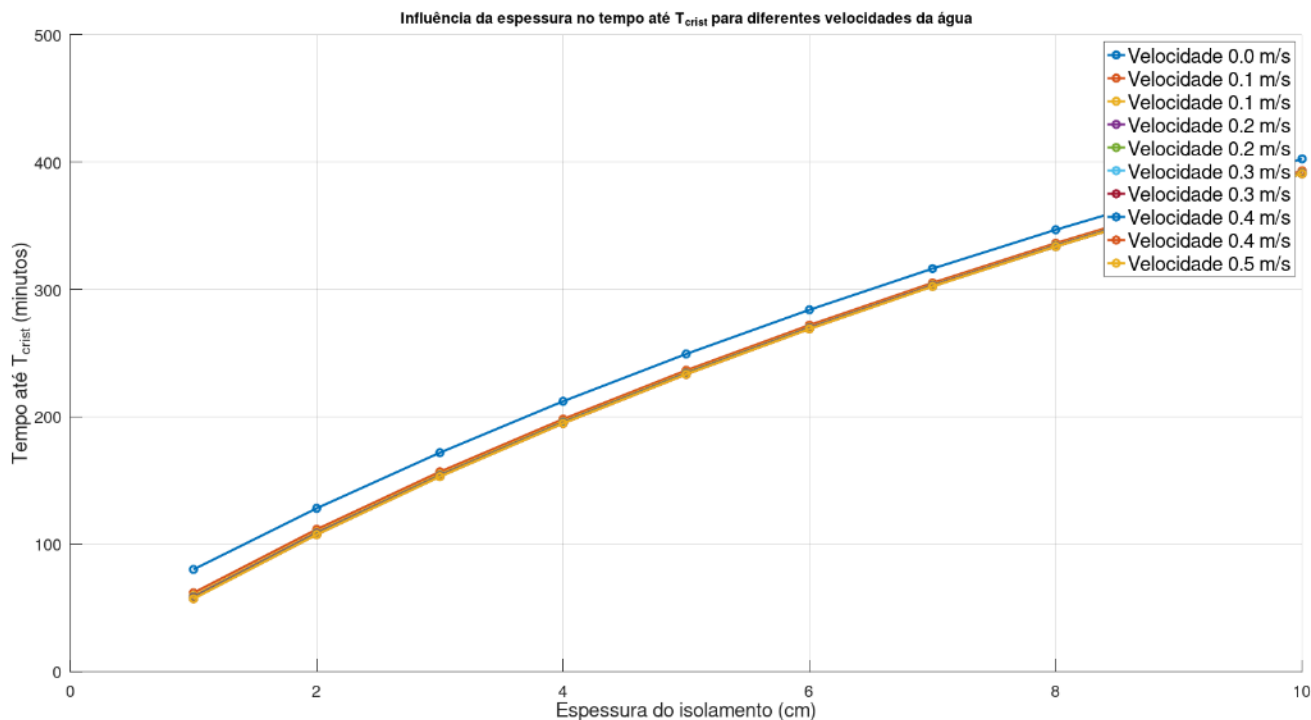


Figura 12 - Gráfico Da Influência Da Espessura No Tempo Até A Temperatura De Cristalização Para Diferentes Velocidades Da Água

A Figura 12 apresenta o gráfico do tempo necessário para o fluido atingir a temperatura de cristalização em função da espessura do isolamento térmico considerando diferentes velocidades da corrente marítima, as quais variam de 1,0 m/s a 5,0 m/s com incrementos de 0,5 m/s. A análise do gráfico revela que não há diferenças significativas no comportamento do tempo de cristalização em relação às variações da velocidade da corrente marítima para as espessuras de isolamento estudadas. Isso sugere que, dentro do intervalo de velocidades analisado, a influência da velocidade da corrente no tempo de cristalização é pouco expressiva, indicando que outros fatores, como a espessura do isolamento, podem desempenhar um papel mais relevante no processo.

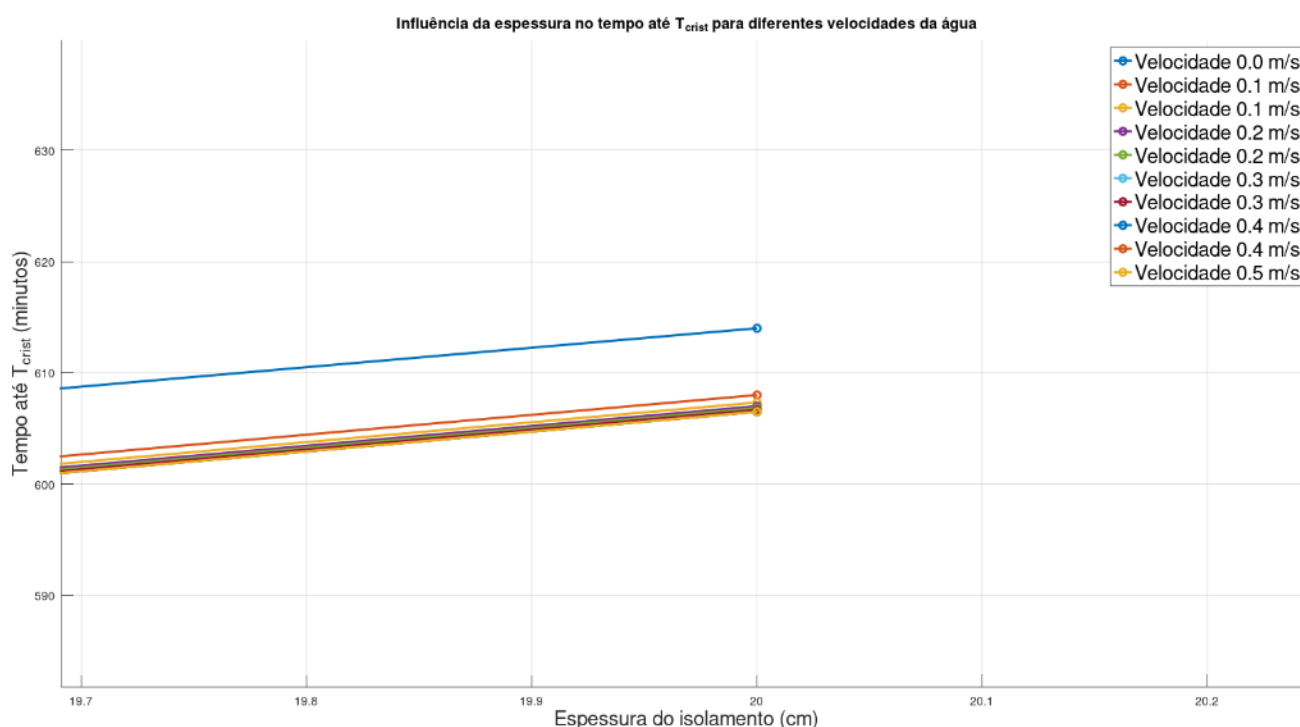


Figura 13 - Gráfico Da Influência Da Espessura No Tempo Até A Temperatura De Cristalização Para Diferentes Velocidades Da Água Em Maior Escada

A Figura 13 apresenta o comportamento da temperatura no ponto mais frio do sistema de 1 a 20 centímetros, com passo de 1 centímetro, até entrar em equilíbrio térmico com o ambiente, considerando a velocidade da corrente marítima constante para o material 1. É possível notar que com o aumento da espessura de isolante existe um aumento no tempo exigido para atingir o equilíbrio térmico com o ambiente, porém esse aumento não é constante. Entre 1 cm e 2 cm existe um aumento de 83% no tempo, já entre 19 cm e 20 cm existe um aumento de 2%. Percebe-se que a partir de um ponto é necessário considerar se o ganho de tempo compensa o aumento do isolamento visto que essa relação está amentando com o tempo.

Esse resultado pode ser explicado pelo fato de que o regime de transferência de calor no sistema é dominado pela condução térmica no isolamento, que atua como o principal limitador do fluxo de calor. Embora o aumento da velocidade da corrente marítima eleve o coeficiente de transferência de calor por convecção (h) na superfície externa da tubulação, conforme descrito pela correlação de Nusselt, equação (2.7), para escoamento externo, esse efeito é pouco expressivo no tempo de cristalização, pois a resistência térmica do isolamento é significativamente maior que a resistência convectiva externa como é possível observar na Tabela 2.

Tabela 2 - Resistências Térmicas Para Cada Velocidade De Corrente Ao Variar A Espessura

Velocidade (m/s)	Espessura (m)	$R_{2,cond}$ (K/W)	$R_{3,conv}$ (K/W)
0.1	0.010	0.001072	0.000073
0.1	0.050	0.004451	0.000051
0.1	0.100	0.007473	0.000037
0.5	0.010	0.001072	0.000020
0.5	0.050	0.004451	0.000014
0.5	0.100	0.007473	0.000010
1.0	0.010	0.001072	0.000012
1.0	0.050	0.004451	0.000008
1.0	0.100	0.007473	0.000006
1.5	0.010	0.001072	0.000008
1.5	0.050	0.004451	0.000006
1.5	0.100	0.007473	0.000004
2.0	0.010	0.001072	0.000007
2.0	0.050	0.004451	0.000005
2.0	0.100	0.007473	0.000003
2.5	0.010	0.001072	0.000006
2.5	0.050	0.004451	0.000004
2.5	0.100	0.007473	0.000003
3.0	0.010	0.001072	0.000005
3.0	0.050	0.004451	0.000003
3.0	0.100	0.007473	0.000002
3.5	0.010	0.001072	0.000004
3.5	0.050	0.004451	0.000003
3.5	0.100	0.007473	0.000002
4.0	0.010	0.001072	0.000004
4.0	0.050	0.004451	0.000003
4.0	0.100	0.007473	0.000002
4.5	0.010	0.001072	0.000003
4.5	0.050	0.004451	0.000002
4.5	0.100	0.007473	0.000002
5.0	0.010	0.001072	0.000003
5.0	0.050	0.004451	0.000002
5.0	0.100	0.007473	0.000002

Isso se dá, pois, a resistência térmica de convecção diminui quando a velocidade da água aumenta já que a resistência térmica de convecção é inversamente proporcional a h , como mostrado na equação (4.3). Já a condução no isolamento depende da espessura e da baixa condutividade térmica do material, enquanto a convecção é altamente influenciada pela dinâmica do fluido. Portanto, embora o aumento da velocidade da água reduza a resistência de convecção seu impacto global no sistema é menor, já que a resistência dominante é a de condução no isolamento.

Portanto, a espessura do isolamento térmico desempenha o papel mais relevante no processo, enquanto a variação da velocidade da corrente tem impacto limitado. Esse comportamento sugere que, para otimizar o tempo de cristalização, a seleção da espessura do isolamento deve ser priorizada em relação ao controle das condições de escoamento externo. Essa conclusão pode guiar decisões práticas, como a escolha de materiais isolantes com menor condutividade térmica ou o aumento da espessura do isolamento em projetos de tubulações submarinas.

5.2 EFEITO DA UTILIZAÇÃO DE ESPESSURAS DIFERENTES

5.2.1 Temperatura na Superfície do Isolamento

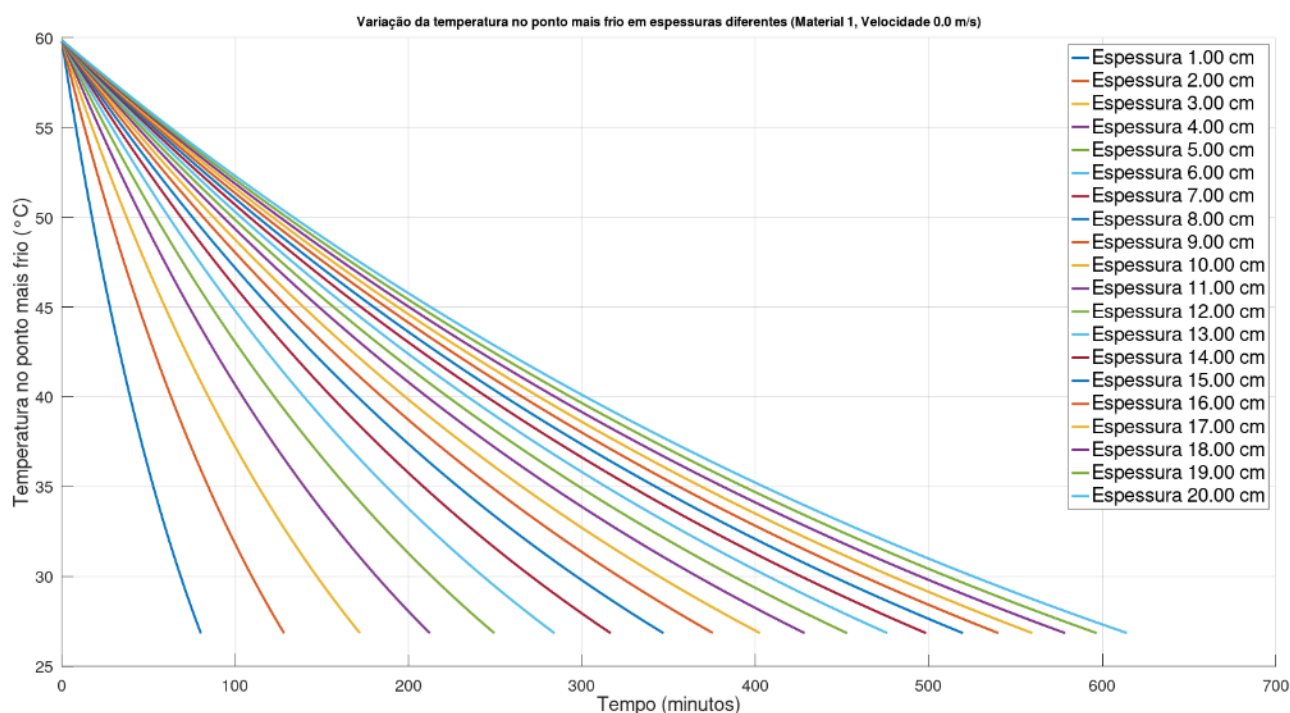


Figura 14 - Gráfico Da Variação Da Temperatura No Ponto Mais Frio Em Espessuras Diferentes

A Figura 14 apresenta o gráfico do comportamento da temperatura no ponto mais frio do sistema de 1 a 20 centímetros, com passo de 1 centímetro, até entrar em equilíbrio térmico com o ambiente, considerando a velocidade da corrente marítima constante para o material 1. É possível notar que com o aumento da espessura de isolante existe um aumento no tempo exigido para atingir o equilíbrio térmico com o ambiente, porém esse aumento não é constante. Entre 1 cm e 2 cm existe um

aumento de 83% no tempo, já entre 19 cm e 20 cm existe um aumento de 2%. Percebe-se que a partir de um ponto é necessário considerar se o ganho de tempo compensa o aumento do isolamento visto que essa relação está amentando com o tempo.

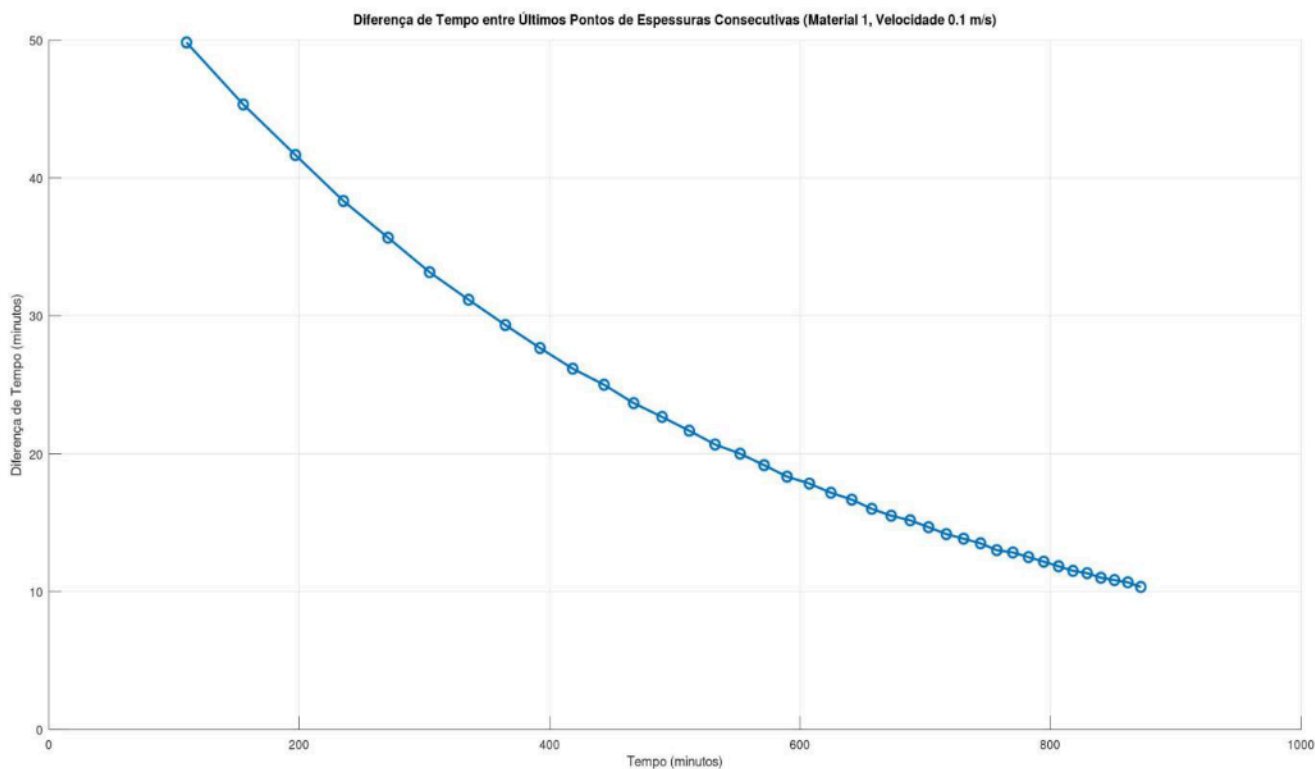


Figura 15 - Gráfico Da Diferença De Tempo Entre Últimos Pontos De Espessuras Consecutivas

Se os dados do gráfico anterior forem reorganizados de modo que mostre a diferença do tempo necessário para a superfície do isolamento atingir o equilíbrio térmico com o ambiente seguinte, é possível notar que a ao longo do tempo a diferença vai se aproximando a zero.

Ao analisar dos valores da Tabela 4 é possível notar que ao aumentar excessivamente a espessura do isolamento, sua efetividade diminui. Ao analisar os termos da equação (4.2) é possível perceber que, conforme a espessura do isolamento cresce, a resistência termica de condução referente a isolamento térmico diminui, isso se dá devido ao termo $\ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)$.

Tabela 3 - Resistência Térmica De Condução De Acordo Com O Aumento Da Espessura

Espessura (m)	$\ln(r_4/r_3)$	$2\pi/k$ (m-K/W)	$R_{2,cond}$ (K/W)
0.010	0.101096	37.623864	0.001072
0.020	0.091808	37.623864	0.002035
0.030	0.084083	37.623864	0.002910
0.040	0.077558	37.623864	0.003712
0.050	0.071973	37.623864	0.004451
0.060	0.067139	37.623864	0.005137
0.070	0.062914	37.623864	0.005777
0.080	0.059189	37.623864	0.006376
0.090	0.055880	37.623864	0.006940
0.100	0.052922	37.623864	0.007473
0.110	0.050262	37.623865	0.007977
0.120	0.047856	37.623866	0.008456
0.130	0.045670	37.623867	0.008912
0.140	0.043675	37.623868	0.009348
0.150	0.041847	37.623869	0.009764
0.160	0.040166	37.623870	0.010163
0.170	0.038615	37.623871	0.010545
0.180	0.037179	37.623872	0.010913
0.190	0.035846	37.623873	0.011268
0.200	0.034606	37.623874	0.011609

5.2.2 Perfil Térmico Radial

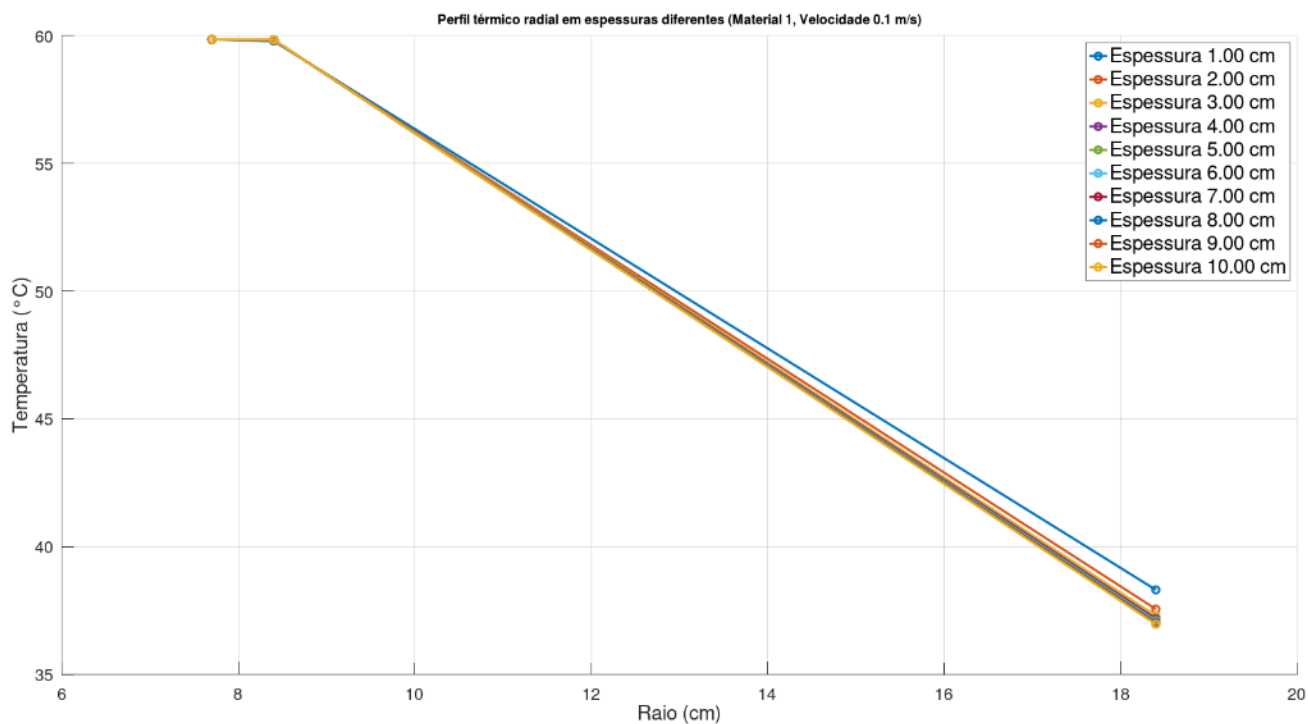


Figura 16 - Gráfico Do Perfil Térmico Radial Em Espessuras Diferentes

O gráfico ilustra o perfil térmico para diversas espessuras, evidenciando a variação da temperatura em função da espessura do material. Observa-se que, com o aumento da espessura, a temperatura atinge um comportamento característico, estabilizando-se após um determinado ponto. Esse ponto é definido como o raio crítico, a partir do qual incrementos na espessura passam a proporcionar benefícios térmicos mais significativos. Antes do raio crítico o isolamento térmico não garante um ganho benéfico para o sistema podendo até ser prejudicial facilitando a troca de calor.

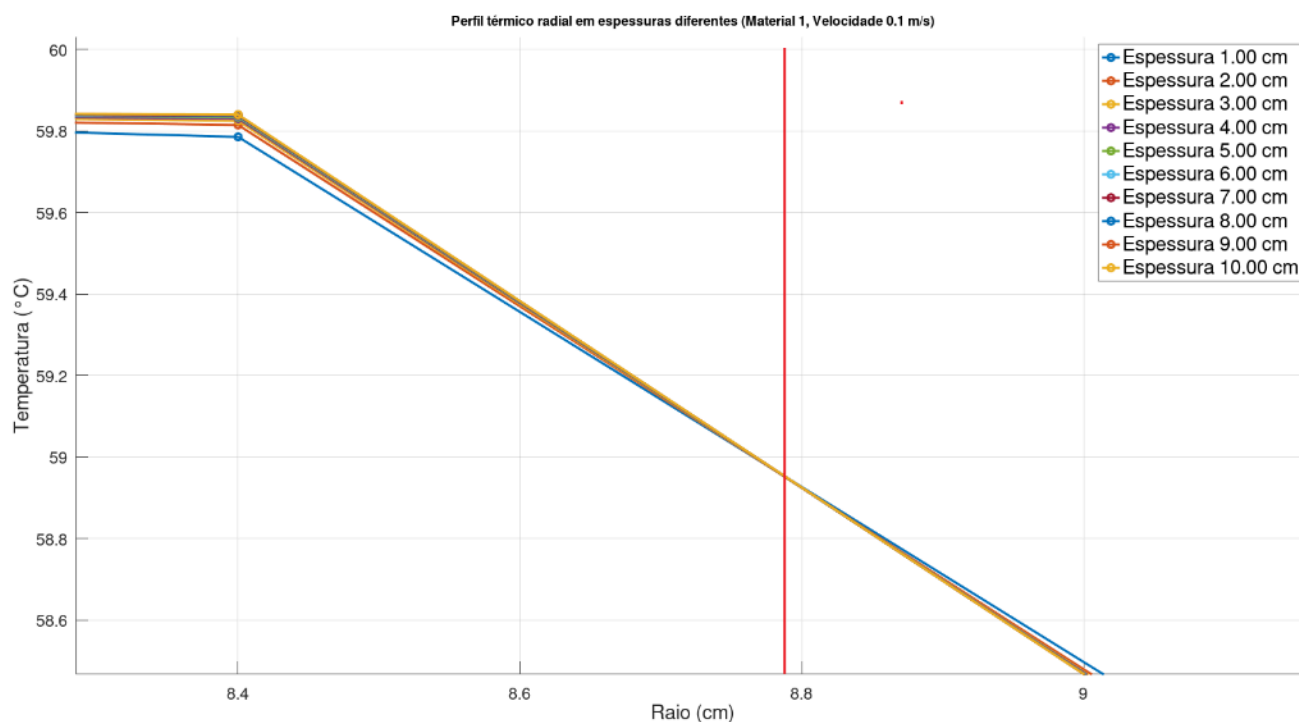


Figura 17 - Gráfico Do Perfil Térmico Em Espessuras Diferentes Em Maior Escala

Ao aproximar a Figura 17 que ilustra o perfil térmico radial, é possível identificar com maior clareza o ponto correspondente ao raio crítico, que se situa aproximadamente em 8.78 cm no eixo radial. Esse valor equivale a 33 mm de espessura de isolamento, marcando o limite a partir do qual a adição de mais material isolante passa a oferecer ganhos térmicos significativos feitos do uso de Materiais diferentes

5.2.3 Influência da Espessura Até a Temperatura de Cristalização

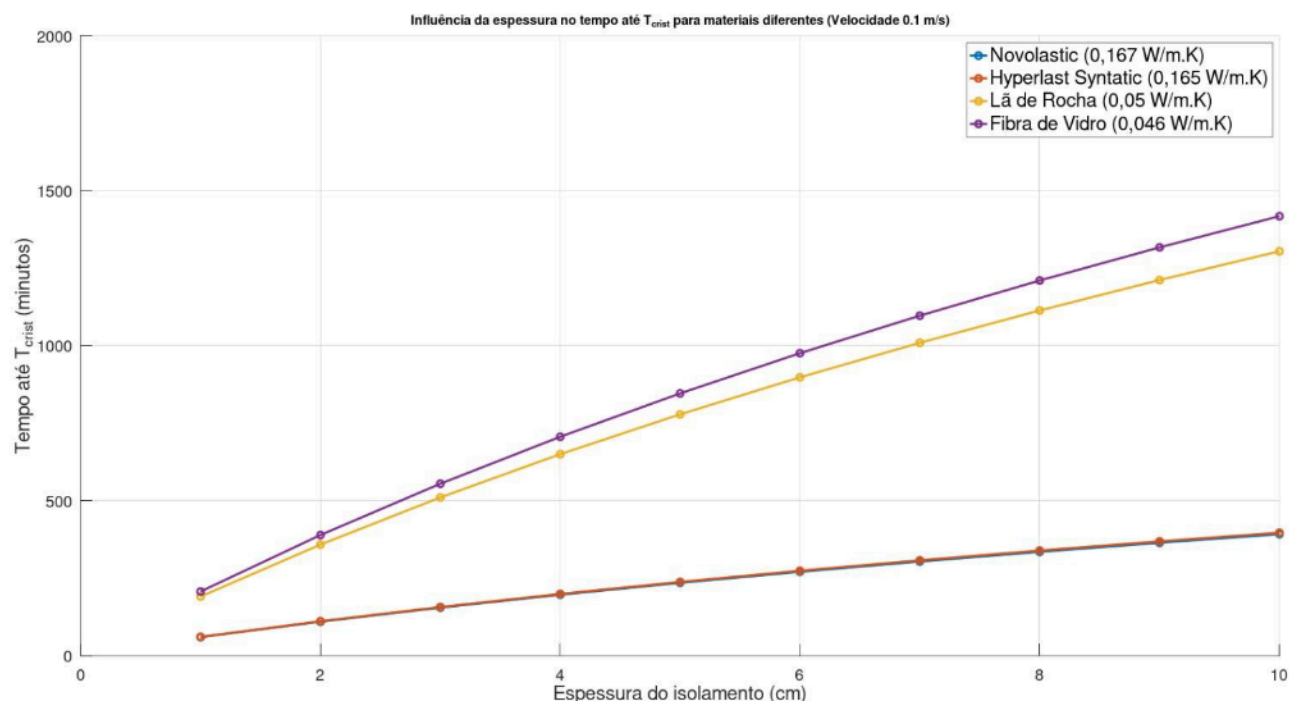


Figura 18 - Gráfico Da Influência Da Espessura Até A Temperatura De Cristalização Para Materiais Diferentes

Tabela 4 - Influência Da Espessura Até A Temperatura De Cristalização Para Materiais Diferentes

Espessura do Isolante	Fibra de Vidro	Lã de Rocha	Hyperlastic Syntatic	Novolastic
1 cm	207,2 min	190,8 min	60,7 min	60,0 min
2 cm	389,3 min	358,5 min	111,2 min	109,8 min
3 cm	554,8 min	510,7 min	157,0 min	155,2 min
4 cm	706,3 min	650,2 min	199,2 min	196,8 min
5 cm	846,2 min	778,7 min	238,0 min	235,2 min
6 cm	976,0 min	898,2 min	274,0 min	270,8 min
7 cm	1.097,0 min	1.009,5 min	307,7 min	304,0 min
8 cm	1.210,5 min	1.113,8 min	339,2 min	335,2 min
9 cm	1.317,3 min	1.212,0 min	368,8 min	364,5 min
10 cm	1.418,0 min	1.304,8 min	396,8 min	392,2 min

Ao se analisar o gráfico referente a influência do tipo de material isolante e a sua espessura no tempo que leva para se atingir a temperatura de cristalização, representado pela figura 17, e a Tabela 6, que contém os valores numéricos das informações apresentadas no gráfico, é possível notar que os materiais Fibra de Vidro e Lã de Rocha são capazes de manter por mais tempo a temperatura do petróleo presente dentro do tubo, superior a temperatura de cristalização.

Isso faz com que o tempo seguro shutdown alcance valores de 190,8 minutos para Lã de Rocha e 207,2 minutos para Fibra de Vidro na espessura de 1 centímetro, até 1304,8 minutos para Lã de Rocha e 1418 minutos para Fibra de Vidro, na espessura de 10 centímetros. Já o tempo de shutdown do Novolastic e do Hyperlastic Syntatic alcançam, respectivamente, valores de aproximadamente 60,0 minutos e 60,7 minutos na espessura de 1 centímetro, até aproximadamente 392,2 minutos para o Novolastic e 396,8 minutos para o Hyperlastic Syntatic, na espessura de 10 centímetros. Essas variações correspondem a um aumento total no tempo seguro para manutenção de 684% para a Fibra de Vidro, 684% para a Lã de Rocha, 654% para o Novolastic e 661% para o Hyperlastic Syntatic.

Além disso, é possível observar que com o aumento da espessura a diferença entre o tempo seguro de shutdown aumenta consideravelmente. É possível compreender algebricamente isso realizando uma nova análise na equação de resistência térmica cilíndrica de condução (4.2). O coeficiente de condução é multiplicado pelo comprimento da superfície, nesse caso a espessura de isolamento. E essa multiplicação é inversamente proporcional a resistência térmica de condução. Dessa maneira, como a Fibra de Vidro e a Lã de Rocha possuem condutividades térmicas ($0,046 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ e $0,05 \text{ W/m} \cdot \text{K}$, respectivamente) inferiores ao Novolastic ($0,167 \text{ W/m} \cdot \text{K}$) e Hyperlastic Syntatic ($0,165 \text{ W/m} \cdot \text{K}$), com o aumento da espessura a diferença entre esses valores vai aumentando as suas respectivas resistências térmicas.

5.2.4 Perfil Térmico Radial

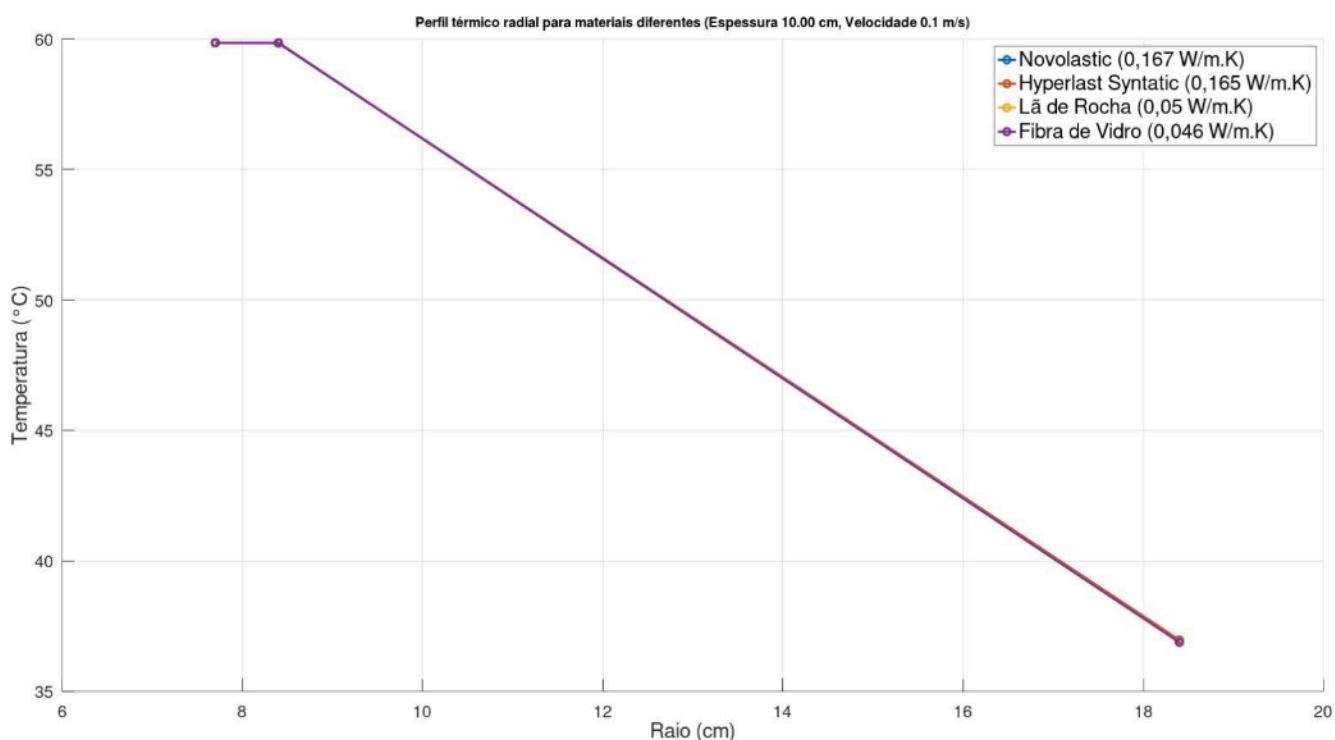


Figura 19 - Gráfico Do Perfil Térmico Radial Para Materiais Diferentes

Tabela 5 - Perfil Térmico Radial Para Materiais Diferentes

Raio	Fibra de Vidro	Lã de Rocha	Hyperlastic Syntatic	Novolastic
7,7 cm	59,850°C	59,850°C	59,850°C	59,850°C
8,4 cm	59,847°C	59,847°C	59,840°C	59,840°C
9,4 cm	57,550°C	57,551°C	57,552°C	57,552°C
10,4 cm	55,254°C	55,255°C	55,263°C	55,264°C
11,4 cm	52,957°C	52,958°C	52,975°C	52,976°C
12,4 cm	50,660°C	50,662°C	50,687°C	50,688°C
13,4 cm	48,363°C	48,365°C	48,398°C	48,401°C
14,4 cm	46,066°C	46,069°C	46,110°C	46,113°C
15,4 cm	43,770°C	43,773°C	43,822°C	43,825°C
16,4 cm	41,473°C	41,476°C	41,533°C	41,537°C
17,4 cm	39,176°C	39,180°C	39,245°C	39,249°C
18,4 cm	36,879°C	36,884°C	36,957°C	36,961°C

O estudo do gráfico do perfil térmico radial dos materiais diferentes, mostrado na Figura 18, e da Tabela 7, que apresenta os seus valores numéricos, demonstra o efeito da condutividade dos materiais. Um efeito que deve ser levado em consideração na hora de escolha do material.

Apesar de Novolastic, Hyperlastic Syntatic, Lã de Rocha e Fibra de Vidro apresentarem diferentes valores de condutividade térmica ($0,167 \text{ W/m} \cdot \text{K}$, $0,165 \text{ W/m} \cdot \text{K}$, $0,05 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ e $0,046 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ respectivamente) ao se observar o gráfico é possível se concluir que essa diferença, neste caso, é irrisória na alteração de seus respectivos perfis, ficando na maior parte do tempo sobrepostos. Porém, no intuito de melhor observar o efeito, foram realizadas duas ampliações em diferentes pontos da espessura.

No primeiro momento ao se ampliar a imagem do gráfico no ponto de contato entre o tubo e o material isolante, como feito na Figura 19 abaixo, é possível notar que os materiais Lã de Rocha e Fibra de Vidro se encontram com uma temperatura, minimamente superior, de aproximadamente $59,847^\circ\text{C}$. Enquanto isso, o Novolastic e o Hyperlastic Syntatic apresentam uma temperatura de aproximadamente $59,840^\circ\text{C}$. Nesse instante, a temperatura da Lã de Rocha e da Fibra de Vidro é $0,0117\%$ maior do que a temperatura do Novolastic e do Hyperlastic Syntatic.

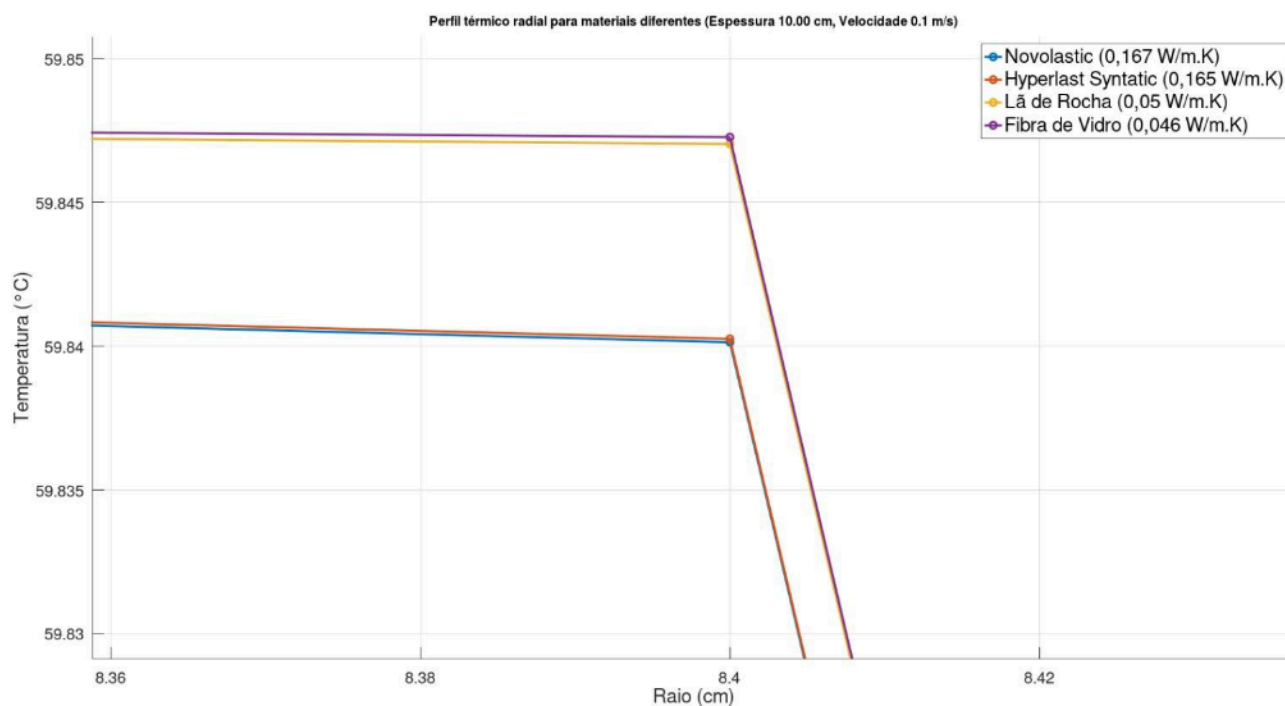


Figura 20 - Gráfico Do Perfil Radial Para Materiais Diferentes Ponto De Contato Entre Tubo E Material Isolante

Realizando uma nova ampliação da imagem, mas agora um ponto final do isolamento, ilustrado na Figura 20 abaixo, é possível perceber que houve uma inversão e agora o Novolastic e o Hyperlastic Syntatic se encontram com uma temperatura, ainda minimamente superior, de aproximadamente $36,961^{\circ}\text{C}$ para o Novolastic e $36,957^{\circ}\text{C}$ para o Hyperlastic Syntatic. E a Lã de Rocha e a Fibra de Vidro apresentam uma temperatura de aproximadamente $36,884^{\circ}\text{C}$ e $36,879^{\circ}\text{C}$, respectivamente. Nesse segundo momento, a temperatura do Novolastic e do Hyperlastic Syntatic é $0,2165\%$ superior à temperatura da Lã de Rocha e da Fibra de Vidro.

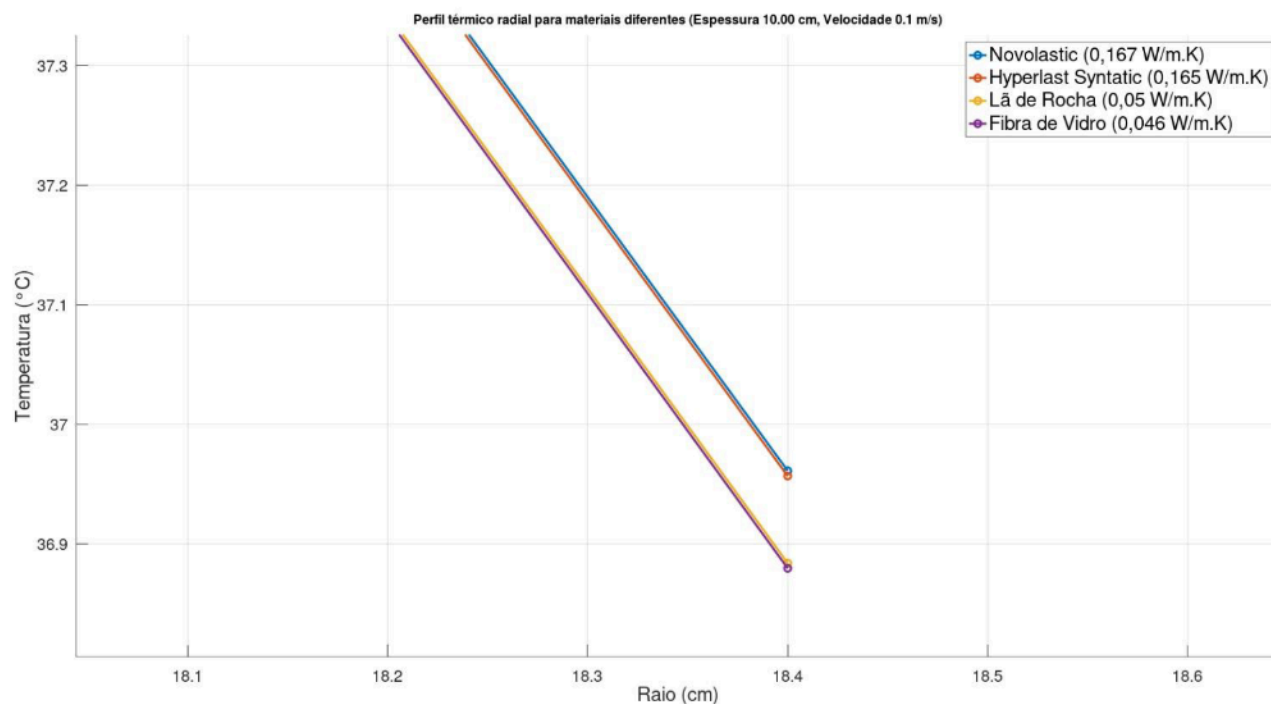


Figura 21 - Gráfico Do Perfil Radial Para Materiais Diferentes Ponto Final

Observando esses dois pontos extremos pode-se concluir que o Novolastic e o Hyperlastic Syntatic possuem uma variação menor de temperatura, ao longo toda a sua espessura, ou seja, eles são menos capazes de reter calor. Isso faz sentido uma vez que eles apresentando uma maior condutividade, logo, a troca de calor vai ocorrer com uma maior facilidade.

5.2.5 Temperatura no Ponto Mais Frio

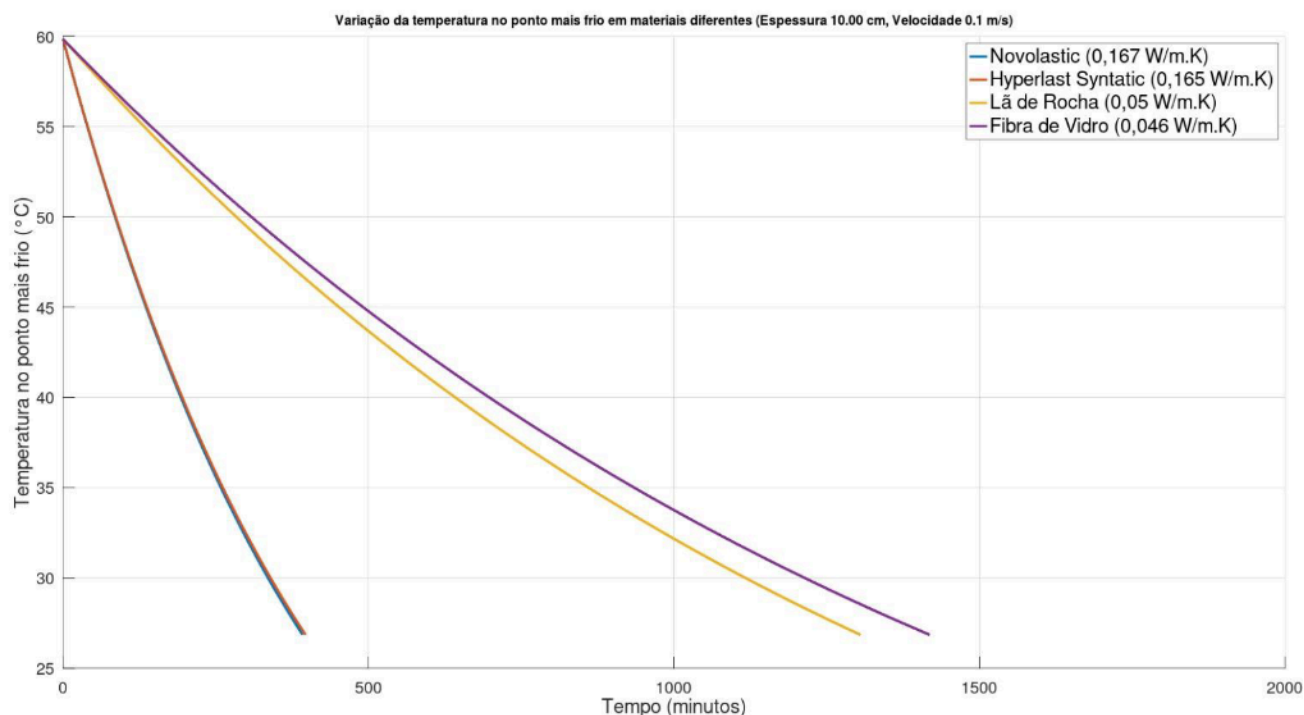


Figura 22 - Gráfico De Variação De Temperatura No Ponto Mais Frio Para Materiais Diferentes

Tabela 6 - Variação De Temperatura No Ponto Mais Frio Para Materiais Diferentes

Temperatura	Fibra de Vidro	Lã de Rocha	Hyperlastic Syntatic	Novolastic
59,8°C	1,4 min	1,3 min	0,4 min	0,4 min
56,8°C	89,2 min	82,1 min	25,0 min	24,7 min
53,8°C	182,2 min	167,6 min	51,0 min	50,4 min
50,8°C	280,9 min	258,4 min	78,6 min	77,7 min
47,8°C	386,1 min	355,3 min	108,0 min	106,8 min
44,8°C	498,8 min	458,9 min	139,6min	137,9 min
41,8°C	620,0 min	570,5 min	173,5 min	171,4 min
38,8°C	751,2 min	691,2 min	210,2 min	207,7 min
35,8°C	894,2 min	822,8 min	250,2 min	247,3 min
32,8°C	1051,4 min	967,4 min	294,2 min	290,7 min
29,8°C	1225,7 min	1127,8 min	343,0 min	338,9 min
26,84°C	1418,0 min	1304,8 min	396,8 min	392,2 min

O gráfico do comportamento da temperatura no ponto mais frio (superfície externa) para materiais isolantes diferentes, representado na Figura 21, junto com a Tabela 8, que exibe os seus valores numéricos, torna possível a observação do comportamento da perda de calor em um único ponto específico, no caso o ponto extremo do isolamento.

Primeiramente, é possível notar que à medida que a temperatura no ponto mais fino diminui ela irá demorar cada vez mais tempo para que ela volte a reduzir. Isso acontece porque com a queda da temperatura os materiais isolantes irão entrar, cada vez mais, em equilíbrio térmico com o meio, no caso, a água do mar.

Ainda, é possível observar a contribuição dos materiais isolantes na troca de calor, uma vez que quanto maior a condutividade maior será a troca de calor e mais rápido haverá a queda da temperatura. Pode-se confirmar isso lembrando a equação da taxa de calor por condução (2.2). Nela, constata-se que a taxa de transferência de calor por condução é diretamente proporcional ao coeficiente de transferência de calor por condução. Dessa maneira, o material que apresenta maiores coeficientes de condução irá apresentar a maior taxa.

Essas análises relativas ao efeito da mudança de material isolante evidencia a importância da escolha correta do material para o projeto do sistema, uma vez que se considerarmos um isolamento de 10 centímetros de espessura e compararmos o material com melhor desempenho (Fibra de Vidro) e o material de pior desempenho (Novolastic) pode-se perceber que a diferença entre o tempo seguro de manutenção é de 3,6 vezes.

Além disso, a partir dessa análise, do estudo dos preços de cada material e do tempo médio necessário para realização da manutenção do sistema, é possível se estipular qual é a escolha que apresenta o melhor custo-benefício para cada caso específico.

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo principal desenvolver um modelo matemático para analisar o comportamento térmico de tubulações submarinas de petróleo durante períodos de parada para manutenção, visando evitar a formação de hidratos e o acúmulo de parafina. Através da análise de transferência de calor por condução e convecção, foi possível estabelecer um modelo que relaciona a espessura do isolamento térmico com o tempo máximo de parada (*Shutdown*) antes que a temperatura do petróleo atinja o ponto crítico de cristalização.

A aplicação do modelo desenvolvido, utilizando dados referentes a uma *flowline* localizada no Campo de Tupi, permitiu quantificar a relação entre a espessura do isolamento e o tempo necessário para atingir a temperatura crítica, fornecendo uma ferramenta valiosa para a tomada de decisões em projetos de engenharia *offshore*.

Os resultados obtidos demonstraram que a espessura do isolamento térmico é um fator crucial para prolongar o tempo de *Shutdown*, permitindo que a tubulação permaneça operacional por um período mais longo sem riscos de obstrução. Além disso, foi observado que a velocidade da corrente marítima tem uma influência mínima no tempo de cristalização, o que sugere que a escolha do material isolante e sua espessura são os parâmetros mais relevantes para o projeto.

Ainda sobre a escolha do material isolante, se tornou evidente, a partir da análise dos resultados, o grau de influência que a escolha do material pode afetar no tempo seguro de *shutdown* para que não ocorra formação de hidratos. Em particular, para uma espessura de camada isolante de 10 centímetros, quanto utilizado o material isolante Novolastic esse tempo atinge o valor de 392,2 minutos, já quando utilizado o material isolante Fibra de Vidro esse tempo atinge o valor de 1418 minutos, representando um aumento de 3,6 vezes.

Em conclusão, este trabalho contribui para o avanço do conhecimento na área de isolamento térmico de tubulações submarinas, oferecendo uma metodologia robusta para a seleção de materiais e dimensionamento de espessuras de isolamento. Futuros estudos podem explorar a aplicação deste modelo em diferentes cenários operacionais, bem como a integração de novas tecnologias de isolamento térmico para otimizar ainda mais a eficiência dos sistemas de extração de petróleo em águas profundas e análises numéricas mais profundas para avaliar com de maneira mais precisa as trocas de calor.

REFERÊNCIAS

1. ADRIANA, E. **Avaliação da temperatura de cristalização da parafina em sistemas: parafina, solvente e tensoativo**. 21 jul. 2005.
2. BAI, Yong. **Subsea Structural Engineering Handbook** [Livro]. - [s.l.] : GPP, 2010.
3. BARENBOIM, Igor. **Qual a importância do petróleo para a economia do Brasil?**. 2023. Disponível em: <https://igorbarenboim.com.br/pt-br/qual-a-importancia-do-petroleo-para-a-economia-do-brasil/> Acesso em: 23/12/2024.
4. CALDAS, Juliana Leão. **Coeficiente Local de Transferência de Calor na Superfície de um Cilindro Sob escoamento Cruzado de Ar**. 2019.
5. CORRÊA, AC de F. **A extração do petróleo da camada pré-Sal brasileira: desafios e oportunidades**. 2013.
6. FILIPAKIS, S. **Estudo termodinâmico da precipitação de parafinas em petróleos brasileiros**. Universidade do Estado do Rio de Janeiro: [s.n.].
7. HOLMAN, J.P. **Heat Transfer**, 9a ed., Ed. Mc Graw Hill, 2002.
8. **Importância do setor de petróleo e gás para a economia do Brasil**, Proper Marine, 2022. Disponível em: <https://www.propermarine.com/importancia-do-setor-de-petroleo-e-gas-para-a-economia-do-brasil/> Acesso em: 26/12/2024.
9. INCROPERA, Frank P.; BERGMAN, Theodore L.; LAVINE, Adrienne; DEWITT, David P. **Fundamentos De Transferência De Calor E Massa**. LTC, 2014.
10. KALIKOSKI, Renan Rodrigues. **Aerogéis híbridos de sílica e suas possíveis aplicações para Isolamento térmico: uma revisão da literatura**. 2020.
11. LEMOS, B. **Síntese e estudo de estrutura/atividade de novos ésteres naftoquinônicos com atividade inibidora de deposição de parafina e depressora de fluidez em petróleos**. [s.l: s.n.].
12. MACHADO JUNIOR, Paulo. **Isolamento Térmico De Equipamentos Submarinos De Exploração E Produção De Óleo E Gás**. 2008.
13. MACIEL, Danilo Albuquerque. **Avaliação do tempo de shutdown em linhas submarinas de dutos para transporte de petróleo**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso.
14. MATHEUS, F. **Estrutura organizacional integrada e flexível: estudo de caso sobre projetos offshore de manutenção em paradas programadas**. [s.l: s.n.].

15. MONTEIRO, D.; CHAVES, G. **Análise da localização de manifolds em sistemas de produção segundo dois critérios: índice de produtividade e proximidade.** [s.l: s.n.].
16. **Pré-sal produz 2,806 MMboe/d em julho e volta a bater recorde**, Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, 2022. Disponível em: https://www.gov.br/anp/pt-br/canais_atendimento/imprensa/noticias-comunicados/pre-sal-produz-2-806-mmboe-d-em-julho-e-volta-a-bater-recorde Acesso em: 11/01/2025.
17. SANTOS, Maria Fernanda Oliveira; FREITAS, Flávio Gustavo Ribeiro. **Modelagem analítica da transferência de calor em regime permanente em flowlines.**
18. TELLES, Pedro. **Tubulações industriais: materiais, projeto e montagem.** 10. Ed., Rio de Janeiro: LTC, 2012.
19. **Tupi: conheça 8 curiosidades sobre o campo mais produtivo do pré-sal**, Nossa Energia Petrobrás, 2024. Disponível em: <https://nossaenergia.petrobras.com.br/w/nossas-atividades/tupi-conheca-8-curiosidades-sobre-o-campo-mais-produtivo-do-pre-sal-1> Acesso em: 23/12/2024.
20. YOUNG, H. D.; FREEDMAN, R. A. **Termodinâmica e ondas.** [s.l: s.n.].



Presidência da República
Casa Civil
Subchefia para Assuntos Jurídicos

LEI Nº 9.610, DE 19 DE FEVEREIRO DE 1998.

Mensagem de veto

Altera, atualiza e consolida a legislação sobre direitos autorais e dá outras providências.

O PRESIDENTE DA REPÚBLICA Faço saber que o Congresso Nacional decreta e eu sanciono a seguinte Lei:

Título I

Disposições Preliminares

Art. 1º Esta Lei regula os direitos autorais, entendendo-se sob esta denominação os direitos de autor e os que lhes são conexos.

Art. 2º Os estrangeiros domiciliados no exterior gozarão da proteção assegurada nos acordos, convenções e tratados em vigor no Brasil.

Parágrafo único. Aplica-se o disposto nesta Lei aos nacionais ou pessoas domiciliadas em país que assegure aos brasileiros ou pessoas domiciliadas no Brasil a reciprocidade na proteção aos direitos autorais ou equivalentes.

Art. 3º Os direitos autorais reputam-se, para os efeitos legais, bens móveis.

Art. 4º Interpretam-se restritivamente os negócios jurídicos sobre os direitos autorais.

Art. 5º Para os efeitos desta Lei, considera-se:

I - publicação - o oferecimento de obra literária, artística ou científica ao conhecimento do público, com o consentimento do autor, ou de qualquer outro titular de direito de autor, por qualquer forma ou processo;

II - transmissão ou emissão - a difusão de sons ou de sons e imagens, por meio de ondas radioelétricas; sinais de satélite; fio, cabo ou outro condutor; meios óticos ou qualquer outro processo eletromagnético;

III - retransmissão - a emissão simultânea da transmissão de uma empresa por outra;

IV - distribuição - a colocação à disposição do público do original ou cópia de obras literárias, artísticas ou científicas, interpretações ou execuções fixadas e fonogramas, mediante a venda, locação ou qualquer outra forma de transferência de propriedade ou posse;

V - comunicação ao público - ato mediante o qual a obra é colocada ao alcance do público, por qualquer meio ou procedimento e que não consista na distribuição de exemplares;

VI - reprodução - a cópia de um ou vários exemplares de uma obra literária, artística ou científica ou de um fonograma, de qualquer forma tangível, incluindo qualquer armazenamento permanente ou temporário por meios eletrônicos ou qualquer outro meio de fixação que venha a ser desenvolvido;

VII - contrafação - a reprodução não autorizada;

VIII - obra:

a) em co-autoria - quando é criada em comum, por dois ou mais autores;

b) anônima - quando não se indica o nome do autor, por sua vontade ou por ser desconhecido;

c) pseudônima - quando o autor se oculta sob nome suposto;

d) inédita - a que não haja sido objeto de publicação;

e) póstuma - a que se publique após a morte do autor;

f) originária - a criação primígena;

g) derivada - a que, constituindo criação intelectual nova, resulta da transformação de obra originária;

h) coletiva - a criada por iniciativa, organização e responsabilidade de uma pessoa física ou jurídica, que a publica sob seu nome ou marca e que é constituída pela participação de diferentes autores, cujas contribuições se fundem numa criação autônoma;

i) audiovisual - a que resulta da fixação de imagens com ou sem som, que tenha a finalidade de criar, por meio de sua reprodução, a impressão de movimento, independentemente dos processos de sua captação, do suporte usado inicial ou posteriormente para fixá-lo, bem como dos meios utilizados para sua veiculação;

IX - fonograma - toda fixação de sons de uma execução ou interpretação ou de outros sons, ou de uma representação de sons que não seja uma fixação incluída em uma obra audiovisual;

X - editor - a pessoa física ou jurídica à qual se atribui o direito exclusivo de reprodução da obra e o dever de divulgá-la, nos limites previstos no contrato de edição;

XI - produtor - a pessoa física ou jurídica que toma a iniciativa e tem a responsabilidade econômica da primeira fixação do fonograma ou da obra audiovisual, qualquer que seja a natureza do suporte utilizado;

XII - radiodifusão - a transmissão sem fio, inclusive por satélites, de sons ou imagens e sons ou das representações desses, para recepção ao público e a transmissão de sinais codificados, quando os meios de decodificação sejam oferecidos ao público pelo organismo de radiodifusão ou com seu consentimento;

XIII - artistas intérpretes ou executantes - todos os atores, cantores, músicos, bailarinos ou outras pessoas que representem um papel, cantem, recitem, declamem, interpretem ou executem em qualquer forma obras literárias ou artísticas ou expressões do folclore.

Art. 6º Não serão de domínio da União, dos Estados, do Distrito Federal ou dos Municípios as obras por eles simplesmente subvencionadas.