



COPPE/UFRJ

EFEITOS TÉRMICOS TRANSIENTES E WALKING EM DUTOS SUBMARINOS

Luciene dos Santos Alves

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientadores: Gilberto Bruno Ellwanger

José Renato Mendes de Sousa

Rio de Janeiro
Setembro de 2009

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

EFEITOS TÉRMICOS TRANSIENTES E WALKING EM DUTOS SUBMARINOS

Luciene dos Santos Alves

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Aprovada por:

Prof. Gilberto Bruno Ellwanger, D.Sc.

Dr. José Renato Mendes de Sousa, D.Sc.

Prof. Luís Volnei Sudati Sagrilo, D.Sc.

Prof. Murilo Augusto Vaz, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

SETEMBRO DE 2009

Alves, Luciene dos Santos

Efeitos Térmicos Transientes e Walking em Dutos Submarinos / Luciene dos Santos Alves. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2009.

XXI, 95 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Gilberto Bruno Ellwanger

José Renato Mendes de Sousa.

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/
Programa de Engenharia Civil, 2009.

Referências Bibliográficas: p. 85-93.

1. Dutos Rígidos. 2. Condução e convecção de calor. 3. Análise térmica transiente. 4. *Walking*. I. Ellwanger, Gilberto Bruno, *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil. III. Título.

“... nem tanto por conhecer os atos, mas pelo encanto de haver aprendido a discernir os fatos.” (A. Zucato)

DEDICATÓRIA

*“Aos meus pais Luiz Carlos e Fatima,
a minha irmã Luciana e ao meu amor Fábio.”*

AGRADECIMENTOS

- A DEUS, por tudo.

- Aos meus orientadores Gilberto Bruno Ellwanger e José Renato Mendes Sousa, pela motivação, apoio, ajuda, compreensão, reconhecimento e contribuições importantes, que foram indispensáveis para a realização deste trabalho. Muito Obrigada.

- A todos os professores da COPPE que ajudaram de forma direta ou indireta neste trabalho, em especial ao professor Sagrilo, pelo apoio tanto profissional quanto pessoal, pelas palavras de incentivo nos momentos mais difíceis, por acreditar na minha capacidade e pela sua amizade.

- A toda equipe do LACEO, em especial aos amigos que tanto me apoiaram e ajudaram, Thiago, Cristiano, Aline e Heric. Ao professor Queija, pela amizade e os importantes ensinamentos passados.

- Aos meus amigos de Mestrado, pelo carinho, amizade, brincadeiras e apoio, Ana Carolina, Flávia, Héctor, Rosana, Vanessa, Aldo, Tamara, Jessick.

- Aos amigos desde a época da graduação, Nathalie, Clarisse e minha irmã do coração Monique. Muito obrigada pelo carinho, amizade, torcida e incentivo.

- Aos meus pais, Luiz Carlos e Fatima pelo carinho, incentivo, apoio, pelos conselhos, por acreditarem na minha capacidade e por terem me ensinado a nunca desistir dos meus objetivos. A vocês dedico todo meu amor e minha gratidão.

- A minha irmã Luciana pelo carinho e ajuda nessa jornada.

- Ao meu noivo Fábio pelo seu amor, sua compreensão e por acreditar em mim.

- À ANP pelo apoio Financeiro.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

EFEITOS TÉRMICOS TRANSIENTES E WALKING EM DUTOS SUBMARINOS.

Luciene dos Santos Alves

Setembro/2009

Orientadores: Gilberto Bruno Ellwanger
José Renato Mendes de Sousa

Programa: Engenharia Civil

A transferência de calor em regime permanente é um importante aspecto no projeto do escoamento em dutos, especificamente para a produção e transporte de petróleo e gás a grandes distâncias em águas profundas. Os eventos transientes, como partidas e paradas de produção, contudo, também podem ser críticos.

A descoberta de novos campos de petróleo, muitos deles em águas profundas e ultra-profundas, tem levado os dutos rígidos e flexíveis a funcionarem em condições cada vez mais extremas. Como consequência, a flambagem lateral e o *walking* tornam-se aspectos fundamentais no processo de concepção dos dutos. Em particular, o fenômeno de *walking* está intrinsecamente ligado ao regime transiente de escoamento.

Nessa dissertação, foi desenvolvida uma ferramenta numérica para análise de transferência de calor no regime transiente de escoamento em dutos. Essa ferramenta numérica foi associada a um modelo estrutural baseado no método dos elementos finitos, que permitiu uma melhor compreensão do fenômeno de *walking* em dutos rígidos através da realização de um estudo paramétrico. Nesse estudo, o efeito do atrito entre o duto e o solo, do gradiente térmico aplicado e da presença de molas de extremidade foram avaliados.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

TRANSIENT THERMAL EFFECTS AND WALKING IN SUBMARINE PIPELINES.

Luciene dos Santos Alves

September/2009

Advisors: Gilberto Bruno Ellwanger

José Renato Mendes de Sousa

Department: Civil Engineering

The heat transfer on a permanent basis is an important aspect in the project pipeline flow, specifically for the production and transportation of oil and gas over long distances in deep water. The transient events, such as starting and shut down the production, however, can also be critical.

The discovery of new oil fields, many of them in deep and ultra deep, has taken the rigid and flexible products to function in ever more extreme. As a result, the lateral buckling and walking become key aspects in the design of the ducts. In particular, the phenomenon of walking is intrinsically linked to the transient flow.

In this dissertation, we developed a numerical tool for analysis of heat transfer in transient flow in pipelines. This numerical tool was associated with a structural model based on finite element method, which allowed a better understanding of the phenomenon of walking on hard products by conducting a parametric study. In this study, the effect of friction between the pipe and soil, the applied thermal gradient and the presence of end springs were evaluated.

ÍNDICE

<u>CAPÍTULO 1</u>	1
<u>ASPECTOS GERAIS</u>	1
1.1. INTRODUÇÃO	1
1.2. OBJETIVO	5
1.3. DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS	6
<u>CAPÍTULO 2</u>	7
<u>TIPOS DE DUTOS EMPREGADOS NA INDÚSTRIA OFFSHORE</u>	7
2.1. INTRODUÇÃO	7
2.2. DUTO RÍGIDO	7
2.3. DUTO FLEXÍVEL	11
2.4. PIPE-IN-PIPE	17
2.4.1. ISOLAMENTO TÉRMICO EM DUTOS SUBMARINOS	18
2.4.2. POLIPROPILENO (PP)	20
2.4.3. POLIURETANO (PU)	21
2.4.4. AEROGEL	22
<u>CAPÍTULO 3</u>	26
<u>TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM REGIME TRANSIENTE EM DUTOS</u>	26
3.1. INTRODUÇÃO	26
3.2. MODOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR	26
3.2.1. CONDUÇÃO	26

3.2.2. CONVECÇÃO	29
3.3. PROBLEMA PROPOSTO	31
3.3.1. TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM REGIME TRANSIENTE NA DIREÇÃO RADIAL DO DUTO	31
3.3.2. TRANSFERÊNCIA DE CALOR TRANSIENTE NO FLUIDO TRANSPORTADO	39
3.3.3. TRANSFERÊNCIA DE CALOR NO REGIME ESTACIONÁRIO	41
3.4. VERIFICAÇÃO DO PROGRAMA	43
<u>CAPÍTULO 4</u>	<u>45</u>
<u>DESCRIÇÃO E MODELO PARA PREVISÃO DO FENÔMENO DE WALKING</u>	<u>45</u>
4.1. INTRODUÇÃO	45
4.2. O FENÔMENO DO <i>WALKING</i>	45
4.3. MODELO DE ELEMENTOS FINITOS	52
4.3.1. CARACTERÍSTICAS GERAIS DO MODELO	52
4.3.2. MODELAGEM DO DUTO	53
4.3.3. REPRESENTAÇÃO DA INTERAÇÃO ENTRE DUTO E SOLO	55
4.3.4. APLICAÇÃO DAS CARGAS E CONDIÇÃO DE CONTORNO	57
<u>CAPÍTULO 5</u>	<u>59</u>
<u>RESULTADOS E DISCUSSÕES</u>	<u>59</u>
5.1. DESCRIÇÃO DO MODELO TÉRMICO E ESTRUTURAL UTILIZADOS	59
5.2. ANÁLISE DOS RESULTADOS	62
<u>CAPÍTULO 6</u>	<u>82</u>
<u>CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</u>	<u>82</u>

6.1. CONCLUSÕES FINAIS	82
6.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	84
<u>CAPÍTULO 7</u>	<u>85</u>
<u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	<u>85</u>
<u>ANEXO A</u>	<u>94</u>
<u>GRAU API</u>	<u>94</u>

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1.1 – Camadas Geológicas (PETROBRAS, 2007).</i>	2
<i>Figura 1.2 – Deposição de parafina e bloqueio do duto (SANTOS, 2006).</i>	3
<i>Figura 1.3 - Diagrama de fase temperatura x pressão para condições de formação de hidratos. (SANTOS, 2006).</i>	4
<i>Figura 1.4 – Bloqueio da linha por formação de hidratos (www.whatischemistry.unina.it, 2009).</i>	4
<i>Figura 2.1 – (a) Single Line Offset Riser (SLOR); (b) Top Tensioned Riser (TTR) na plataforma TLP (OFFSHORE MAGAZINE, 2006).</i>	8
<i>Figura 2.2 – Vista do pull in do SCR da P-18 (flexjoint e receptáculo). (http://www.gaia-br.com.br).</i>	9
<i>Figura 2.3 – Configuração de um SCR (VALDIVIA et al., 2007).</i>	10
<i>Figura 2.4 – Flowlines conectados a PLEMs (SILVA, 2006).</i>	11
<i>Figura 2.5 - Vista geral das plataformas complacentes (www.naturalgas.org).</i>	13
<i>Figura 2.6 – Linha flexível aderente (bonded) e não aderente (unbonded) (LEMOS, 2005).</i>	14
<i>Figura 2.7 – Linha flexível de camada não aderente (unbonded) e suas camadas constituintes (SOUSA, 2005).</i>	14
<i>Figura 2.8 – Tipos de linhas flexíveis de camadas não aderentes: (a) Smooth Bore (LEMOS, 2005) e (b) Rough Bore (www.nktflexibles.com).</i>	17
<i>Figura 2.9 - Pipe-in-pipe (www.brederoshaw.com).</i>	18

<i>Figura 2.10 – Comparação entre as condutividades térmicas do PP sintático e do PU (KOEBSCH, 2006).</i>	21
<i>Figura 2.11 – Aplicação da espuma de poliuretano por “spray”. (PUC, 2009).</i>	22
<i>Figura 2.12 - Temperatura x Condutividade térmica (ASPEN AEROGELS, 2007).</i>	24
<i>Figura 2.13 - Diferença de espessura entre um PIP com aerogel e com PUF.(ASPEN AEROGELS, 2007).</i>	25
<i>Figura 2.14 - instalação do Pyrogel (ASPEN AEROGELS, 2007).</i>	25
<i>Figura 3.1 – Dependência da condutividade térmica com a temperatura para alguns tipos de sólidos. (INCROPERA, 2003).</i>	28
<i>Figura 3.2 - Duto multicamada.</i>	32
<i>Figura 3.3 – Discretização de uma camada.</i>	33
<i>Figura 3.4 – Método de Crank-Nicolson (ÖZİŞIK, 1994).</i>	34
<i>Figura 3.5 – Nó fictício $M + 1$ na temperatura fictícia $T_M + 1$ (ÖZİŞIK, 1994).</i>	35
<i>Figura 3.6 - Nó fictício -1 na temperatura fictícia $T - 1$.</i>	36
<i>Figura 3.7 – Interface entre dois meios com diferentes condutividades.</i>	37
<i>Figura 3.8 – Seção transversal de uma linha de produção circular. (SU et al., 2001).</i>	39
<i>Figura 3.9 - Fluxograma do programa desenvolvido em Fortran90.</i>	44
<i>Figura 4.1 – Deslocamento axial para um duto longo e curto (TORNES et al, 2000).</i>	47
<i>Figura 4.2 – Exemplo de um perfil de força com a âncora virtual (CARR et al., 2006)</i>	48
<i>Figura 4.3 - Exemplo do transiente térmico simplificado (CARR et al., 2006).</i>	49

<i>Figura 4.4 - Perfil de força e temperatura (CARR et al., 2006).</i>	50
<i>Figura 4.5 - Transiente térmico (CARR et al., 2006).</i>	52
<i>Figura 4.6 – Modelo em elementos finitos elaborado para a previsão do fenômeno de walking (propriedades geométricas expandidas).</i>	53
<i>Figura 4.7 – O elemento finito BEAM188 (ANSYS, 2007).</i>	54
<i>Figura 4.8 – O elemento finito COMBIN39 (ANSYS, 2007).</i>	55
<i>Figura 4.9 – Comportamento do atrito no solo durante carregamento e descarregamento</i>	56
<i>Figura 4.10 – Configuração do duto.</i>	56
<i>Figura 4.11 – Condição de contorno no duto (propriedades do duto expandidas).</i>	57
<i>Figura 5.1 – Duto de aço com revestimento externo de polipropileno</i>	59
<i>Figura 5.2 – Divisão das camadas do duto para cálculo das temperaturas ao longo de suas seções transversais.</i>	61
<i>Figura 5.3 – Variação da temperatura do fluido interno ao longo do duto em diferentes instantes de tempo.</i>	63
<i>Figura 5.4 – Temperatura nas camadas da última seção do duto em função do tempo.</i>	64
<i>Figura 5.5 – Temperatura durante a parada de bombeio.</i>	65
<i>Figura 5.6 – Distribuição dos deslocamentos axiais ao longo do duto ao término do primeiro ciclo.</i>	66
<i>Figura 5.7 – Força axial efetiva ao longo do duto para o aquecimento no primeiro ciclo.</i> ...	66
<i>Figura 5.8 – Força axial efetiva ao longo do duto para o resfriamento no primeiro ciclo.</i>	67
<i>Figura 5.9 – Expansão do duto durante o aquecimento – primeiro ciclo.</i>	68

<i>Figura 5.10 – Contração do duto durante o resfriamento – primeiro ciclo.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 5.11 – Força axial efetiva no duto – segundo ciclo de aquecimento.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 5.12 – Gráfico do deslocamento durante o aquecimento do segundo ciclo.</i>	<i>71</i>
<i>Figura 5.13 – Gráfico do deslocamento durante o desaquecimento no segundo ciclo.</i>	<i>71</i>
<i>Figura 5.14 – Histórico do deslocamento após sete ciclos de aquecimento/resfriamento. .</i>	<i>72</i>
<i>Figura 5.15 – Deslocamento por ciclo com variação do coeficiente de atrito para a temperatura do fluido de entrada de 90°C.</i>	<i>74</i>
<i>Figura 5.16 – Comparação do comportamento do walking com a variação do coeficiente de atrito.</i>	<i>74</i>
<i>Figura 5.17 – Força axial durante o aquecimento no primeiro ciclo: coeficiente de atrito igual a 0.2.....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 5.18 – Força axial durante o resfriamento no primeiro ciclo: coeficiente de atrito igual a 0.2.</i>	<i>76</i>
<i>Figura 5.19 – Força axial durante o aquecimento no segundo ciclo: coeficiente de atrito igual a 0.2.....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 5.20 – Força axial durante o resfriamento no segundo ciclo: coeficiente de atrito igual a 0.2.....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 5.21 – Walking devido ao efeito do gradiente térmico.</i>	<i>78</i>
<i>Figura 5.22 – Representações do duto para consideração da mola de extremidade.</i>	<i>79</i>
<i>Figura 5.23 – Força axial de aquecimento e resfriamento do duto durante os dois primeiros ciclos.</i>	<i>80</i>
<i>Figura 5.24 – Walking no duto com molas nas extremidades.....</i>	<i>81</i>

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 2.1 – Grau dos aços API (API-5L, 2000).....</i>	<i>11</i>
<i>Tabela 2.2 – Característica e propriedades de alguns isolantes térmicos (SILVEIRA, 2005).</i>	<i>20</i>
<i>Tabela 2.3 – Condutividade térmica (ASPEN AEROGELS, 2007).....</i>	<i>24</i>
<i>Tabela 2.4 – Propriedades do Aerogel (ASPEN AEROGELS, 2008).....</i>	<i>24</i>
<i>Tabela 3.1 – Condutividade térmica de alguns metais, sólidos não metálicos, líquidos e gases. (SOLANO, 2005).....</i>	<i>28</i>
<i>Tabela 3.2 - Valores típicos para o coeficiente de transferência de calor por convecção (INCROPERA & DEWITT, 2003).</i>	<i>30</i>
<i>Tabela 5.1– Propriedades geométricas do duto.</i>	<i>60</i>
<i>Tabela 5.2 – Propriedades termofísicas do duto.....</i>	<i>60</i>
<i>Tabela 5.3 – Propriedades do fluido.</i>	<i>60</i>
<i>Tabela 5.4 – Módulo de elasticidade equivalente.</i>	<i>62</i>
<i>Tabela 5.5 – Coeficiente de dilatação térmica equivalente.</i>	<i>62</i>
<i>Tabela 5.6 – Valor do walking no ponto médio do duto de 6km de extensão.</i>	<i>73</i>
<i>Tabela 5.7 – Valores do walking por ciclo de carregamento para diferentes coeficientes de atrito.</i>	<i>75</i>
<i>Tabela 5.8 – Walking por ciclo para diferentes gradientes térmicos.</i>	<i>78</i>
<i>Tabela 5.9 – Relação força-deslocamento da mola axial.....</i>	<i>79</i>

Tabela 5.10 – Walking por ciclo de carregamento..... 81

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Raio interno da camada, Capítulo 3
b	Raio externo da camada, Capítulo 3
C	Número de Courant-Friedrichs-Lewy, Capítulo 3
c_p	Calor específico, Capítulo 3
$c\alpha_{aço}$	Coefficiente de dilatação térmica do aço, Capítulo 5
$c\alpha_{pp}$	Coefficiente de dilatação térmica do polipropileno, Capítulo 5
$c\alpha_{eq}$	Coefficiente de dilatação térmica equivalente para o aço-polipropileno
$E_{aço}$	Módulo de Elasticidade do aço, Capítulo 5
E_{pp}	Módulo de Elasticidade do polipropileno, Capítulo 5
E_{eq}	Módulo de Elasticidade equivalente para o aço-polipropileno, Capítulo 5
f	Força de atrito axial, Capítulo 5
$g(r, t)$	Geração de calor interno, Capítulo 3
h	Coefficiente de transferência de calor por convecção, Capítulo 3
k	Condutividade térmica do material (W/mK), Capítulo 3
L	Comprimento do duto, Capítulo 5
\dot{m}	Vazão mássica do fluido que percorre o duto.
N_1	Número de divisões longitudinais do duto, Capítulo 3
Nt	Tempo total de duração da análise, Capítulo 3
q_{conv}	Taxa de transferência de calor, Capítulo 3
q_{r1}	Fluxo térmico na superfície interna da linha de transporte, Capítulo 3

q_{cond}	Taxa de transferência de calor por condução (W), Capítulo 3
q_x''	Fluxo de calor (W/m^2), Capítulo 3
r	Direção radial, Capítulo 3
r_1	Diâmetro interno do duto, Capítulo 3
T_s	Temperatura da superfície, Capítulo 3
T_∞	Temperatura do fluido externo, Capítulo 3
T_f	Temperatura do fluido transportado, Capítulo 3
$T_i(r, t)$	Temperatura na i -ésima camada no instante de tempo t , Capítulo 3
T_i^n	Temperatura na camada i do duto no instante de tempo n , Capítulo 3
t	Instante de tempo, Capítulo 3
U	Coeficiente de transferência de calor global, Capítulo 3
v	Velocidade média do fluido de produção, Capítulo 3
W	Peso do duto submerso, Capítulo 5

SÍMBOLOS GREGOS

α	Difusividade térmica, Capítulo 3
Δr	Passo de discretização na direção radial, Capítulo 3
Δt	Intervalo de tempo, Capítulo 3
$\frac{\partial T}{\partial x}$	Gradiente de temperatura na direção do fluxo de calor, Capítulo 3
ρ	Massa específica, Capítulo 3

ρ_f	Densidade do fluido de produção, Capítulo 3
γ	Parâmetro de discretização da diferença finita, Capítulo 3
δ	Deslocamento de mobilização, Capítulo 4
μ	Coeficiente de atrito, Capítulo 5
ϕ_{int}	Diâmetro interno, Capítulo 5
ϕ_{ext}	Diâmetro externo, Capítulo 5

ABREVIações

API	American Petroleum Institute
FPSO	Floating, Production, Storage and Offloading
HDPE	High Density Polyethylene Resins
HP/HT	High-pressure High-temperatura
MEF	Método dos Elementos Finitos
PA11	Poliamida 11
PA12	Poliamida 12
PP	Polipropileno
PU	Poliuretano
PIP	Pipe-in-Pipe
PLEM	<i>Pipe Line End Manifold</i>
PLET	<i>Pipe Line End Termination</i>
PVDF	<i>Polyvinylidene Fluoride</i>
SCR	Steel Catenary Riser

SLOR	Single Line Offset Riser
TLP	Top Leg Plataform
TTP	Temperatura de Precipitação da Parafina
TTR	Top Tensioned Riser
XLPE	Polietileno Reticulado

CAPÍTULO 1

ASPECTOS GERAIS

1.1. INTRODUÇÃO

Recentemente, foi descoberta uma grande jazida de petróleo abaixo da camada pré-sal no leito marinho da Bacia de Santos: Tupi. Esta camada compreende uma faixa de 200 por 800 quilômetros que se estende do litoral do Espírito Santo até Santa Catarina, podendo vir a ser a maior reserva petrolífera do Brasil.

A primeira avaliação feita em Tupi estima volumes recuperáveis entre 5 e 8 bilhões de barris de óleo leve. Essas estimativas apontam para um aumento de 50% das reservas provadas da Petrobras, que hoje é de 14,4 bilhões de barris [PETROBRAS, 2007].

Diferente do petróleo encontrado na Bacia de Campos, o óleo que se encontra na camada pré-sal é preservado em temperaturas mais altas e é um óleo mais fino. Chamado óleo leve (26 a 30^oAPI, vide anexo A) possui um maior valor no mercado em comparação com o óleo pesado.

A complexidade da exploração nesse campo inicia-se por vencer uma lâmina d'água de 2000m. A partir daí, é necessário perfurar aproximadamente mais 4000m, sendo 2000m de rocha e 2000m de crosta salina, incluindo a espessa e porosa camada de sal. Abaixo da camada de sal (pré-sal), encontra-se o reservatório conforme indica a Figura 1.1.

No caso do campo de Tupi, o óleo sai do poço a uma temperatura de aproximadamente 65^oC (FORMIGLI, 2008) e encontra a temperatura da água do mar em torno de 4^oC.

Essa significativa diferença de temperatura entre o óleo e a água do mar pode comprometer o escoamento ao longo da linha de produção, pois possibilita a formação de hidratos e parafina.

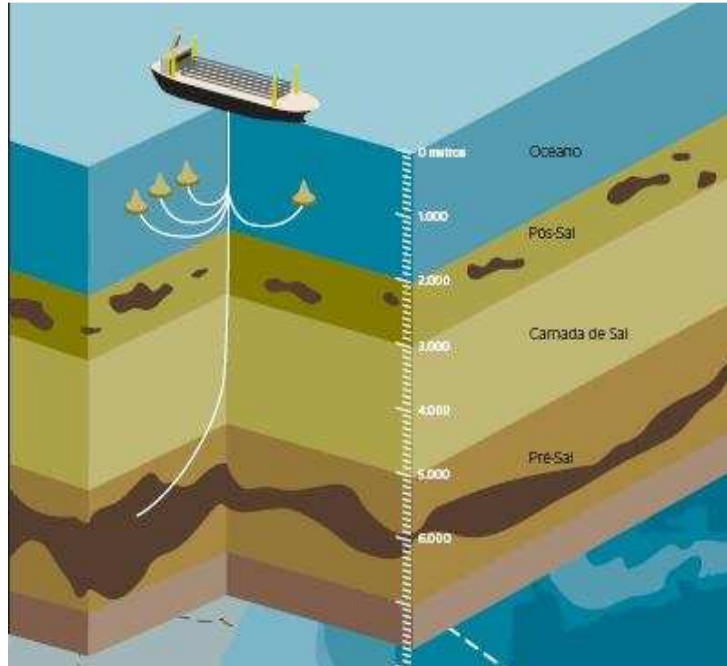


Figura 1.1 – Camadas Geológicas (PETROBRAS, 2007).

A deposição de hidratos ou depósitos de parafinas nos dutos de transporte de hidrocarbonetos é um grave problema para a produção marítima de petróleo. Ela está associada ao resfriamento ou à queda de temperatura do fluido para valores menores que uma temperatura denominada temperatura de precipitação de parafina (TPP).

Para a determinação da TPP existem várias técnicas experimentais, de acordo com GIORDANI (1993) e SANTOS (1994). Como exemplo, pode-se citar a viscosimetria, calorimetria de varredura diferencial (*differential scanning calorimetry* – DSC), microscopia de luz polarizada e ressonância nuclear magnética. Pode-se encontrar um estudo mais detalhado da viscosimetria em BORDALO e OLIVEIRA (2007).

Assim, sob temperaturas abaixo da TPP, a parafina se precipita e acumula nas paredes internas dos dutos obstruindo o fluxo e promovendo o aumento de perda de carga nas linhas de produção. Como consequência, ocorre a diminuição da vazão de fluidos, podendo-se chegar à obstrução completa do duto, como indicado na Figura 1.2.

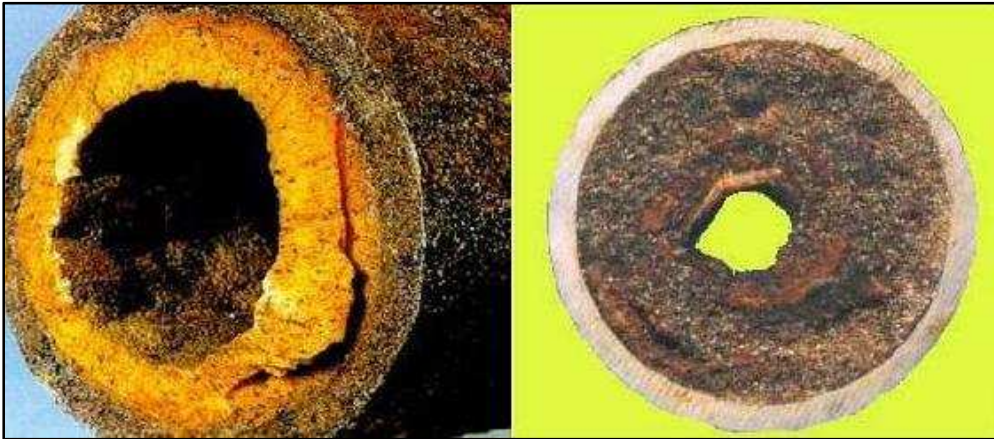


Figura 1.2 – Deposição de parafina e bloqueio do duto (SANTOS, 2006).

Outro problema operacional crítico enfrentado pela indústria do petróleo é a formação de hidratos, que são compostos cristalinos de água com aparência semelhante ao gelo. Estes compostos contêm alguns hidrocarbonetos leves, CO_2 e H_2S , sob elevadas pressões e baixas temperaturas características de operações em águas profundas e ultra profundas.

Na Figura 1.3, encontra-se um diagrama de fase mostrando sob que circunstâncias os hidratos são formados. Na parte esquerda da curva, há a formação de hidratos, enquanto a parte direita está livre da formação dos mesmos. Pode-se observar no diagrama que na condição típica de produção, a temperatura do fluido encontra-se a 60°C e a uma pressão de quase 300 bar estando, portanto bem afastado da curva de formação de hidratos. Ocorrendo, porém, uma parada prolongada na linha de transporte, a temperatura do fluido diminuirá podendo, caso não se tomem as devidas providências, localizar-se dentro da faixa de formação de hidratos.

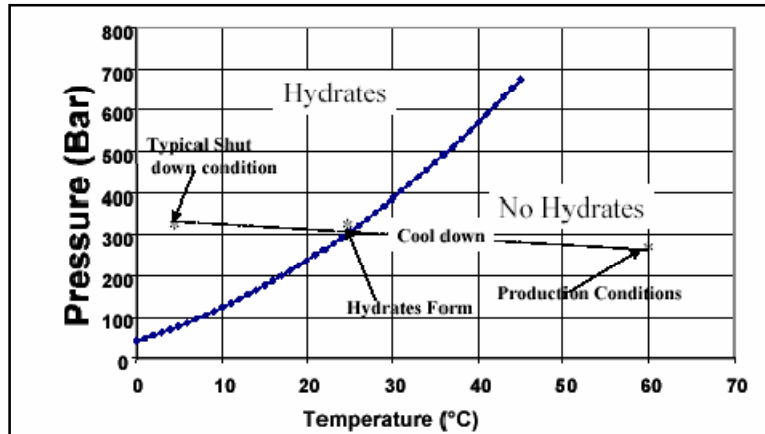


Figura 1.3 - Diagrama de fase temperatura x pressão para condições de formação de hidratos. (SANTOS, 2006).

Uma série de problemas pode ser gerada com a formação de hidratos em dutos e nos equipamentos de produção, como por exemplo: aumento da potência de bombeamento, redução de vazão, devido ao aumento da viscosidade, ou até mesmo o bloqueio total do duto (Figura 1.4) tendo como consequência a parada de produção.



Figura 1.4 – Bloqueio da linha por formação de hidratos (www.whatischemistry.unina.it, 2009).

Assim sendo, para que a garantia de escoamento seja atendida, faz-se necessário um estudo detalhado do comportamento do escoamento de um fluido viscoso em dutos circulares. Dentre eles, o estudo da perda de calor por convecção e por condução através da parede da tubulação.

Além disso, o estudo de transferência de calor em dutos tem implicações estruturais à medida que vários modos de falhas dessas estruturas, tais como a flambagem lateral e vertical (SOLANO, 2005, FREITAS, 2006), e fenômenos potencialmente graves como o *walking* (CARR *et al.*, 2003, 2006) são causados pelas variações térmicas a que essas estruturas são submetidas ao longo de suas vidas úteis.

1.2. OBJETIVO

A transferência de calor em regime permanente é importante no estudo do escoamento em dutos, especificamente para a produção e transporte de petróleo e gás a grandes distâncias em águas profundas, mas devem ser considerados, também, os eventos transientes, como partidas e paradas de produção nas quais as variações de temperatura podem ser críticas. O estudo da condução e da convecção transiente, portanto, é de suma importância para se prever a evolução da temperatura ao longo da linha, pois a partir dele se pode determinar a quantidade necessária de inibidores químicos ou de outros meios para retardar o resfriamento, caso apenas o isolamento térmico não seja suficiente para manter o fluido aquecido. Desta forma, evita-se ou pelo menos reduz-se substancialmente a formação de hidratos e deposição de parafina.

Além disso, recentemente, a descoberta de novos campos de petróleo, muitos deles em águas profundas e ultraprofundas, tem levado ao desenvolvimento de dutos rígidos e flexíveis para funcionarem em condições cada vez mais extremas. Como consequência, a correta previsão de fenômenos como a flambagem e o *walking* é fundamental para o sucesso no uso de dutos submarinos.

Nessa dissertação, será discutido o fenômeno de *walking*. O *walking* se caracteriza pelo deslocamento acumulado que é imposto ao duto durante sua vida útil devido à variação de temperatura que ocorre quando um fluido quente passa a percorrê-lo e quando há a parada de produção e o duto tende a igualar sua temperatura à temperatura da água do mar.

Assim, o objetivo dessa dissertação é desenvolver uma ferramenta numérica para análise de transferência de calor no regime transiente de escoamento em dutos, visando as suas aplicações em produção de hidrocarbonetos em águas profundas e ultra profundas.

Como aplicação dessa ferramenta, um típico duto rígido será estudado considerando diferentes condições para o óleo transportado. Serão observadas as temperaturas ao longo da estrutura e essas temperaturas serão levadas a um modelo estrutural baseado no Método dos Elementos Finitos (MEF) e voltado para a análise do *walking*. Com a variação de diferentes parâmetros de análise, uma melhor compreensão desse fenômeno é obtida destacando suas graves conseqüências estruturais.

1.3. DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS

Esta dissertação encontra-se dividida, da seguinte maneira:

No Capítulo 2, são descritos, brevemente, alguns tipos de dutos de produção tais como o duto rígido “convencional”, o *pipe-in-pipe* (PIP) e o duto flexível. São abordados também alguns tipos de polímeros e outros materiais utilizados para isolamento térmico, bem como suas principais propriedades térmicas e mecânicas.

No Capítulo 3, são abordados os principais conceitos de transferência de calor em regime transiente em dutos, tais como condução transiente e convecção natural, além da transferência de calor em regime permanente. O problema de transferência de calor em regime transiente em dutos é equacionado e as bases do programa computacional construído para a solução desse problema são apresentadas.

No Capítulo 4, discute-se de forma mais aprofundada o fenômeno do *walking*. Apresenta-se o estado da arte e propõe-se um modelo numérico baseado no MEF para análise desse fenômeno.

No Capítulo 5, são realizadas algumas análises térmicas em um típico duto submarino. São consideradas diferentes condições de bombeio do óleo e, para essas condições, a resposta térmica é obtida. Com essas temperaturas, um estudo paramétrico do fenômeno do *walking* é conduzido.

No Capítulo 6, por fim, são descritas as principais conclusões desse trabalho e também apresentadas sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

TIPOS DE DUTOS EMPREGADOS NA INDÚSTRIA OFFSHORE

2.1. INTRODUÇÃO

Atualmente, a exploração de petróleo caminha para lâminas d'água cada vez mais profundas, exigindo um conhecimento mais detalhado dos materiais e tipos de dutos que conduzem fluidos do fundo do mar para as plataformas na superfície. Convencionalmente, esses dutos se classificam em rígidos e flexíveis e, dependendo do tipo de aplicação, são ainda divididos em dutos de aplicação estática (*flowlines*) ou dinâmica (*risers*).

Risers são, portanto, dutos rígidos ou flexíveis que respondem dinamicamente às solicitações impostas pelas condições ambientais (corrente e onda). São responsáveis por conectar a unidade de produção a um equipamento de fundo, PLET (*Pipe Line End Termination*), que será visto mais adiante, ou a dutos assentados no fundo do mar, onde há apenas a ação de cargas estáticas, conhecidos como *flowlines*.

A função destes dutos é, assim, drenar dos reservatórios e garantir o escoamento da produção até terminais marinhos ou terrestres.

2.2. DUTO RÍGIDO

Dutos rígidos podem ser considerados elementos tubulares esbeltos feitos de aço, podendo ser de titânio em alguns casos específicos. Essas estruturas possuem, usualmente, grande rigidez e resistência a cargas axiais, radiais e de flexão.

Existem diversas configurações possíveis para dutos rígidos em aplicações mecânicas. Dentre elas, pode-se citar: em forma de catenária livre (*Steel Catenary Riser - SCR*), verticais (utilizados em plataformas do tipo TLP ou *Spar Bouy*), a *Top Tensioned Riser – TTR* e a *Single Line Offset Riser – SLOR* (Figura 2.1).

A configuração SLOR foi desenvolvida em conjunto com a 2H Offshore e Subsea7 (OFFSHORE MAGAZINE, 2006) com o objetivo de avançar para águas cada vez mais profundas tendo como um dos benefícios a flexibilidade de instalação. O *jumper* flexível entre a plataforma e o duto rígido oferece duas vantagens fundamentais de acordo com a 2H Offshore (OFFSHORE MAGAZINE, 2006), em primeiro lugar eles podem acomodar grandes movimentos da plataforma e, em segundo, eles podem ser conectados à plataforma em um local para melhor atender o *layout* das plataformas, ou seja, afastado da área central de perfuração.

A configuração TTR, usualmente utilizada em plataformas do tipo TLP ou *Spar Bouy*, tem como principal vantagem a possibilidade de utilizar completação seca, reduzindo assim os custos envolvidos. Um conceito detalhado sobre o comportamento dinâmico desse tipo de estrutura e sua vida útil devido à fadiga pode ser visto em MOROOKA et al., 2005.

A configuração em catenária livre (SCR) tem a vantagem de eliminar o sistema de tracionamento usado para dutos verticais tracionados, pois os movimentos verticais da estrutura em relação ao duto são compensados pela alteração na geometria da catenária na região próxima ao fundo (WANG e CHIN, 2001).

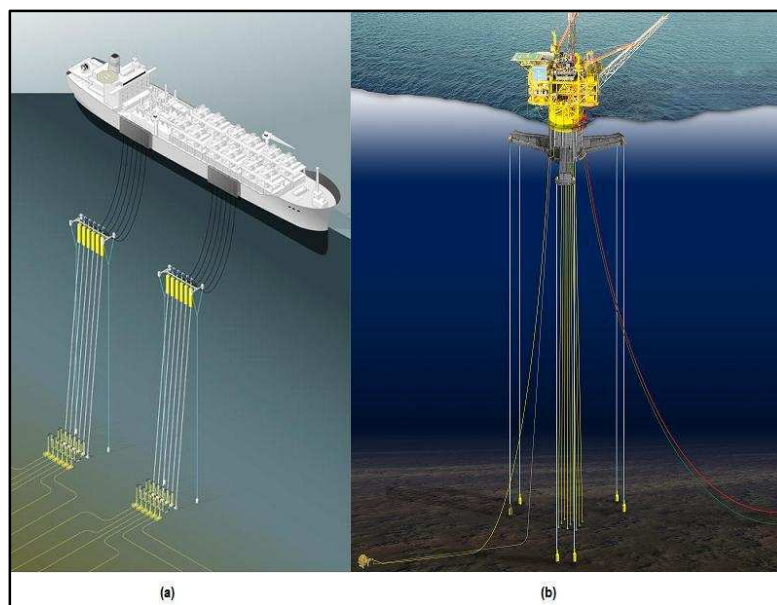


Figura 2.1 – (a) *Single Line Offset Riser* (SLOR); (b) *Top Tensioned Riser* (TTR) na plataforma TLP (OFFSHORE MAGAZINE, 2006).

Quando comparados aos dutos flexíveis, os rígidos possuem um menor custo e são capazes de resistir a altas pressões, tornando sua utilização interessante em águas profundas e ultra profundas. No entanto, são mais suscetíveis à falha por fadiga quando submetidos a carregamentos cíclicos devidos à onda e aos movimentos da unidade flutuante. Duas regiões são especialmente críticas: o trecho junto ao ponto de conexão (Figura 2.2), e o trecho junto ao solo marinho, chamado *Touch Down Point* – TDP (Figura 2.3).



Figura 2.2 – Vista do *pull in* do SCR da P-18 (*flexjoint* e receptáculo). (<http://www.gaia-br.com.br>).

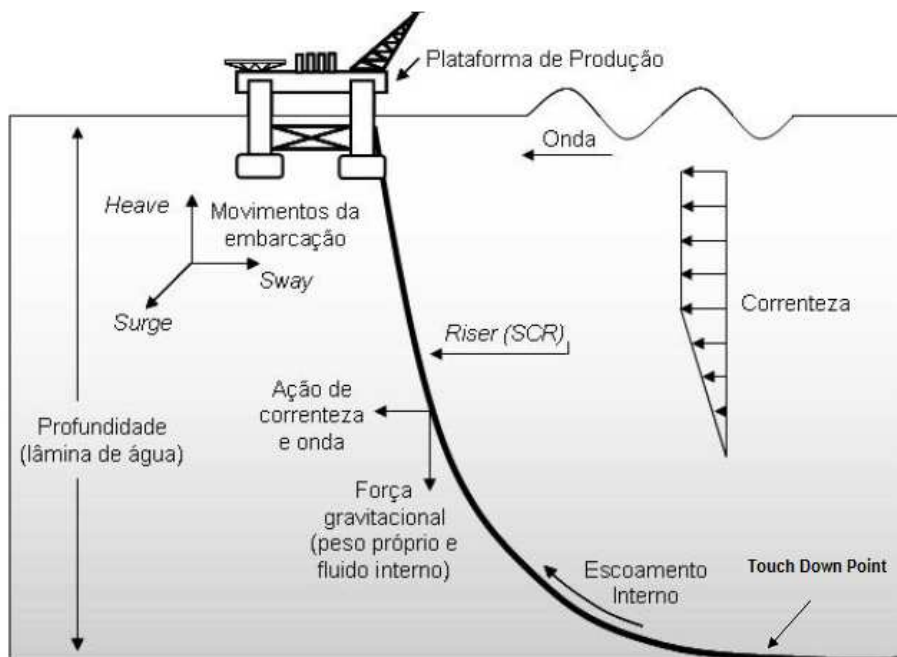


Figura 2.3 – Configuração de um SCR (VALDIVIA *et al.*, 2007).

Os dutos estáticos, chamados de *flowline*, depois de instalados, ficam apoiados no fundo do mar, como apontado na Figura 2.4. Estas linhas fazem a ligação entre o poço e o *manifold* ou a plataforma. As cargas estáticas a que estão sujeitos são dadas pela ação do peso próprio, cargas localizadas como conectores, cargas térmicas, entre outras.

O aumento da lâmina d'água é a responsável pela necessidade de se desenvolver sistemas de conexão de dutos em equipamentos submarinos confiáveis, como por exemplo, árvore de natal, *manifolds* do tipo PLEM (*Pipe Line End Manifold*) e do tipo PLET (*Pipe Line End Termination*).

A utilização de *flowlines* rígidos, empregados em campos de grandes dimensões e em águas ultra profundas, reduz consideravelmente o custo quando comparada com a utilização de *flowlines* flexíveis.

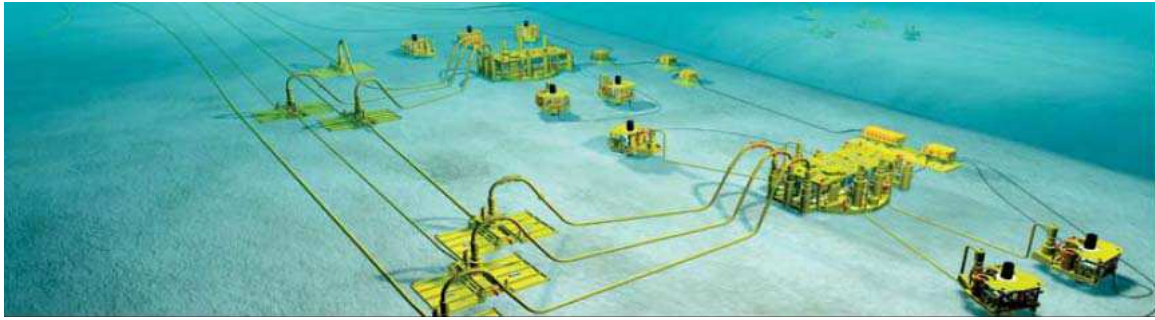


Figura 2.4 – *Flowlines* conectados a PLEMs (SILVA, 2006).

Dentre os materiais utilizados na fabricação dos dutos rígidos para águas profundas, destacam-se os aços carbono em conformidade com a API 5L (2000). Estes aços devem possuir propriedades como: elevada resistência mecânica para suportar a pressão e o peso próprio do duto; elevada resistência à corrosão para resistir ao ambiente marinho; alta resistência à fadiga e boa soldabilidade; entre outras. A Tabela 2.1 mostra os graus dos aços API utilizados na fabricação dos dutos rígidos e suas respectivas tensões mínimas de escoamento e ruptura, em KSi e MPa.

Tabela 2.1 – Grau dos aços API (API-5L, 2000).

GRAU	Tensão de escoamento mínima		Tensão de ruptura mínima	
	KSi	MPa	KSi	MPa
X65	65	448	77	531
X70	70	483	82	565
X80	80	552	90	621

O uso de materiais não ferrosos, tal como o titânio, com menor densidade e maior tensão se comparado com o aço carbono poderia ser particularmente útil, mas possui um custo elevado. Maiores informações sobre o titânio podem ser encontradas em SOUSA (2007).

2.3. DUTO FLEXÍVEL

Duto flexível é um tipo de duto para aplicações dinâmicas ou estáticas empregado em atividades de produção em plataformas do tipo flutuante. São responsáveis por conectar a

unidade flutuante de produção a um equipamento de fundo ou a uma linha estática (*flowline*). Sua estrutura é composta por diversas camadas concêntricas de materiais metálicos e poliméricos, tendo como principais características a baixa rigidez à flexão, permitindo ajustar-se aos movimentos da plataforma, e elevada rigidez axial.

Outras características importantes que justificam seu uso são, de acordo com COSTA (2003) e SOUSA (2005): o fato de serem pré-fabricados, possuírem baixo custo de instalação e transporte (armazenamento é feito em carretéis), poderem ser reutilizados e serem passíveis de recuperação. Além disso, podem alcançar um raio de curvatura muito menor do que o alcançado por uma estrutura rígida, pois apresenta, em média, uma rigidez à flexão 100 vezes menor do que a de um duto rígido com diâmetro interno equivalente e para a mesma pressão de trabalho, e são estruturas complacentes, ou seja, são capazes de absorver os grandes deslocamentos impostos pelas unidades flutuantes de produção.

Em águas profundas, os dutos flexíveis são utilizados em unidades flutuantes de produção como por exemplo, *SPAR Buoy*, *TLP (Tension Leg Platform)*, semi-submersíveis e *FPSO (Floating Production, Storage and Offloading)*, como apresentado na Figura 2.5.

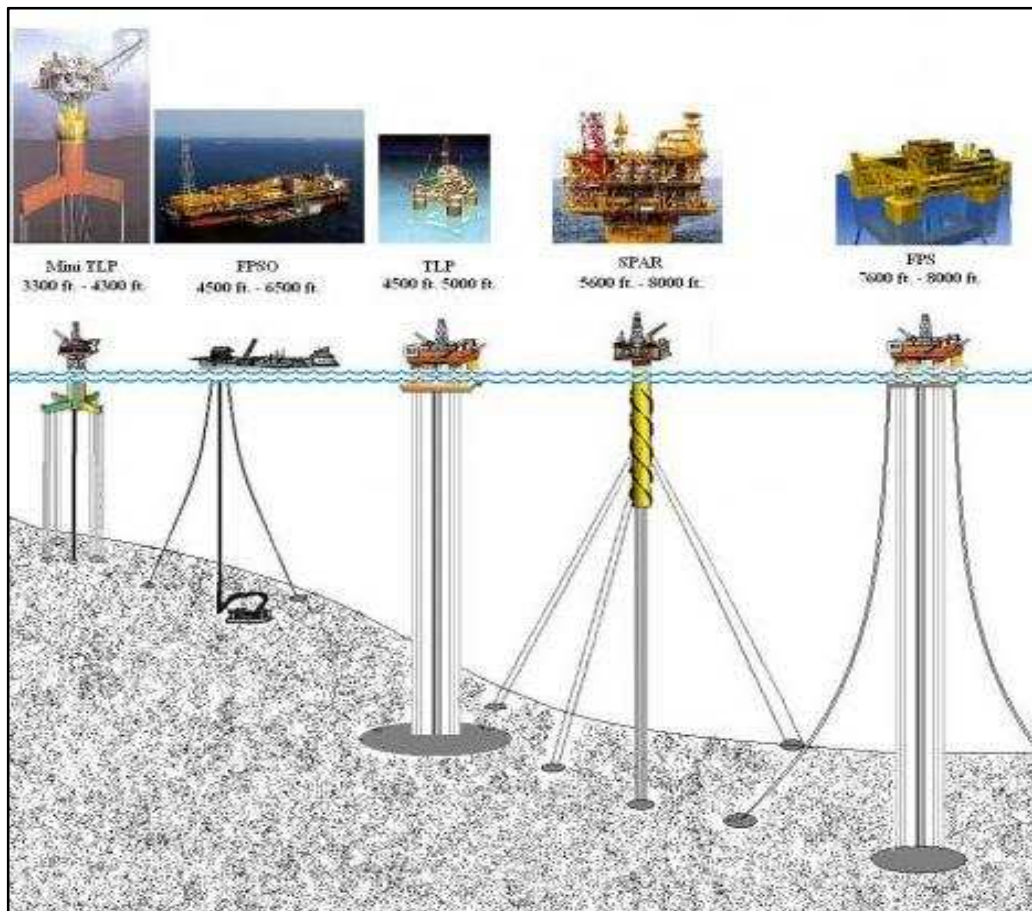


Figura 2.5 - Vista geral das plataformas complacentes (www.naturalgas.org).

A estrutura interna do duto flexível varia de fabricante para fabricante, mas basicamente, esses dutos podem ser divididos em dois tipos como demonstrado na Figura 2.6:

- Camadas aderentes (*bonded*) – as camadas compostas por tecido, elastômero e aço são coladas uma nas outras por um processo de vulcanização. São pouco usados atualmente, devido à limitação do comprimento possível de fabricação de maneira contínua.
- Camadas não aderentes (*unbonded*) – suas camadas possuem liberdade de movimento umas em relação às outras. São compostas por camadas metálicas e poliméricas. As camadas metálicas proporcionam a flexibilidade e resistência e as camadas poliméricas proporcionam estanqueidade, proteção anticorrosão

e evitam a abrasão entre as camadas de aço. É o tipo de duto mais empregado atualmente.



Figura 2.6 – Linha flexível aderente (*bonded*) e não aderente (*unbonded*) (LEMOS, 2005).

O duto flexível de camadas não aderentes, tipicamente, possui as seguintes camadas, conforme demonstrado na Figura 2.7:

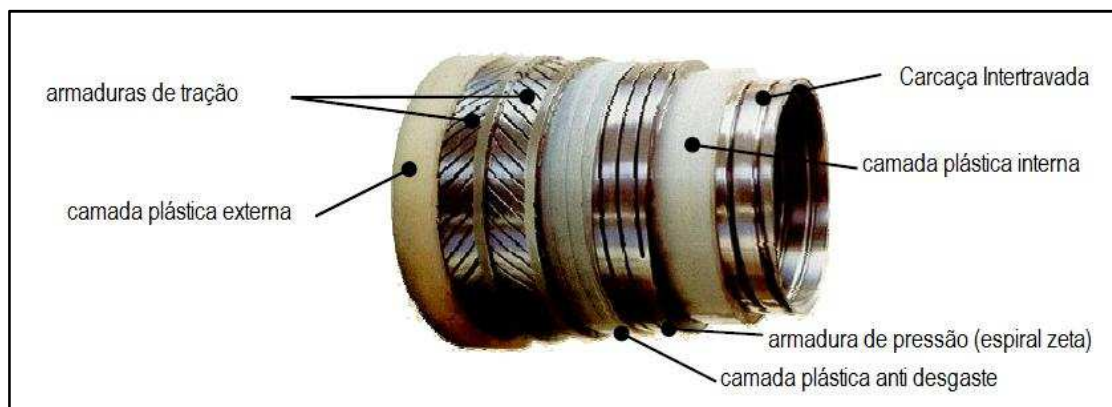


Figura 2.7 – Linha flexível de camada não aderente (*unbonded*) e suas camadas constituintes (SOUSA, 2005).

Carcaça intertravada – é a camada mais interna do duto flexível de parede rugosa. A função desta camada é de prevenir o colapso do duto como um todo devido à pressão externa, ou somente da camada de estanqueidade, caso haja a ocorrência de rápida

descompressão interna. Possui também as funções de resistência à abrasão e de proteger a linha contra a corrosão causada por partículas existentes no fluido transportado.

É confeccionada por aço, possuindo alta flexibilidade devido a sua forma construtiva, onde as espiras são dispostas em hélice ao longo do duto. Estas espiras são intertravadas através de processos de dobramento

Camada plástica interna – é usualmente extrusada sobre a carcaça intertravada e possui a função de manter a estanqueidade da linha flexível, ou seja, deve impedir que o fluido interno ultrapasse para as demais camadas da linha flexível. Pode ser fabricada por um termoplástico tipo poliamida 11 (PA11), e no caso de linhas sujeitas a solicitações menos severas, o polietileno de alta densidade (HDPE) pode ser usado.

Armadura de pressão (espiral zeta) – é constituída por aço carbono e sua principal função é resistir aos esforços radiais provenientes da pressão de escoamento do fluido e atua em conjunto com a carcaça intertravada na resistência a pressão externa, ao lançamento e ao squeezing (esmagamento imposto pelas armaduras de tração quando tracionadas) (Sousa, 1999).

Camada plástica anti-desgaste – possui baixa rigidez a flexão, tendo como função minimizar o desgaste por fricção entre as camadas. Em geral, são extrusadas entre a armadura de pressão e a armadura interna de tração. Para a fabricação desta camada, a API RP 17B (1998) sugere o HPDE, XLPE, PA11, PA12 ou PVDF.

Armaduras de tração - Tem como função resistir, principalmente, aos esforços axiais impostos ao duto flexível. Devido ao baixo ângulo de assentamento, variando entre 25^o e 55^o, esta camada não compromete a alta flexibilidade da linha, já que os arames que a constituem podem se deslocar quando a linha é flexionada.

Podem-se utilizar várias camadas até se obter a resistência desejada, mas geralmente, são utilizados pares de armadura de tração, enrolados em sentidos opostos. Sua fabricação pode ser feita com aço de perfil retangular ou cilíndrico.

Camada plástica externa - É extrusada sobre a armadura de tração. O objetivo dessa camada é a de proteger a linha contra abrasão, corrosão e qualquer dano causado pelo

meio exterior. Uma outra função dessa camada, é a de manter os arames da armadura de tração assentados durante o processo de fabricação.

Usualmente para essa camada podem ser utilizados a PA11, PA12 ou o HDPE, como sugere a API RP 17B.

Maiores detalhes sobre linha flexível podem ser obtidos em SOUSA (2005).

O duto flexível de camadas não aderentes (Figura 2.8) ainda pode ser classificado quanto ao tipo de aplicação, que é função do tipo de fluido transportado:

- Duto de parede lisa (*Smooth Bore*) – Não possui carcaça intertravada. A camada polimérica é a primeira camada interna (camada de contato com o fluido). Sua utilização é no transporte de fluidos onde não se encontra gás, como por exemplo em dutos injetores de água. Se existisse gás no fluido transportado, parte permearia através da camada polimérica responsável pela estanqueidade do duto e acabaria por ficar aprisionado na região anular da estrutura (entre as camadas poliméricas). Se ocorresse uma despressurização rápida no interior do duto flexível, este gás “aprisionado” tenderia a retornar imediatamente para dentro da linha, causando então o colapso da camada plástica interna.
- Duto de parede rugosa (*Rough Bore*) – a camada mais interna é formada por fitas de aço intertravada. É o tipo de duto mais utilizado em campos de produção. É empregado para o transporte de gases ou fluidos que possuem gases livres ou dissolvidos.



Figura 2.8 – Tipos de linhas flexíveis de camadas não aderentes: (a) Smooth Bore (LEMOS, 2005) e (b) Rough Bore (www.nktflexibles.com).

2.4. PIPE-IN-PIPE

O *pipe-in-pipe* (PIP) consiste basicamente de dois dutos de aço concêntricos com um espaçamento anular entre eles (BOKAIAN, 2004). Esse espaço anular contém algum material de propriedade isolante como, por exemplo: espuma polimérica, gás inerte e aerogel. Configurações PIP (Figura 2.9) são consideradas uma solução prática para produção de óleo em águas profundas com o objetivo de prevenir a formação de hidratos e a deposição de parafina.

O duto de aço interno é chamado de *flowline* ou *inner pipe* e tem como função escoar a produção de óleo ou gás. O duto de aço externo é chamado de *sleeve pipe* ou *carrier pipe* e tem como função proteger o *inner pipe* e a camada anular de isolamento térmico do meio externo. Outros acessórios também presentes numa configuração PIP são: os centralizadores responsáveis pelo alinhamento entre o duto interno e externo, a conexão entre os tramos, e os anéis de reforço interno com funções de *buckle arrestor* (SOUZA,2008).

Outra característica importante a ser considerada numa configuração pipe-in-pipe é que é que a camada anular não exerce nenhuma função estrutural, ou seja, o duto interno (*inner pipe*) deve ser dimensionado exclusivamente para a pressão interna e o duto externo (*carrier pipe*) dimensionado para suportar os carregamentos externos (SOUZA, 2008).

A melhor composição da configuração de um PIP requer um equilíbrio entre o desempenho estrutural e o isolamento térmico do material polimérico utilizado para preencher o espaço anular (VIPULANANDAN *et al.*, 2007).

Para exploração de reservatório com HP/HT (TROUT *et al.*, 1999), o sistema PIP pode fornecer o isolamento térmico necessário e a integridade estrutural para o transporte de hidrocarbonetos em alta temperatura (acima de 120°C) e alta pressão (10000 psi) (BAI, 2001).

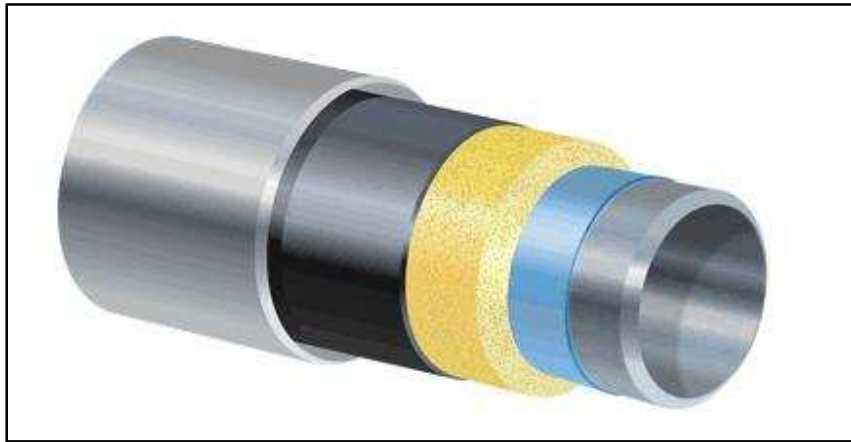


Figura 2.9 - Pipe-in-pipe (www.brederoshaw.com).

2.4.1. Isolamento térmico em dutos submarinos

O isolamento térmico em dutos submarinos deve possuir características físicas suficientes de forma a suportar qualquer solicitação durante a construção, transporte, instalação e operação durante 25 anos (SILVEIRA, 2005).

O sistema de isolamento térmico deve possuir as seguintes características (SILVEIRA, 2005):

- Condutividade térmica suficientemente baixa de forma a garantir o isolamento do duto;
- Coeficiente global de transmissão de calor inerente ao sistema de isolamento térmico;

- Espessura mínima necessária de forma a garantir o isolamento, pois essa influi diretamente no diâmetro externo do duto, e conseqüentemente, no peso total do duto;
- Resistência à pressão hidrostática. O isolante térmico com pouca resistência à pressão hidrostática possui uma densidade mais alta e, conseqüentemente, uma condutividade térmica maior
- Baixo custo, pois pode até inviabilizar o projeto;
- Resistência a água e a elevadas temperaturas.

KOEBSCHE, 2006 define alguns tipos de materiais utilizados como isolamento térmico em dutos submarinos. São eles:

- Polipropileno sólido;
- Polipropileno espuma;
- Polipropileno sintático;
- Poliuretano sólido;
- Poliuretano espuma *pipe-in-pipe*;
- Poliuretano sintático.

A Tabela 2.2 mostra uma comparação entre as principais características e propriedades desses sistemas de isolamento térmico aplicáveis em dutos submarinos.

A escolha do tipo de isolamento dependerá das necessidades de desempenho requeridas pelo projeto, da temperatura máxima de utilização do material e, não menos importante, o custo.

Tabela 2.2 – Característica e propriedades de alguns isolantes térmicos (SILVEIRA, 2005).

PROPRIEDADES	UN	PP Sólido	PU Sólida	PP espuma	PUF PIP	PP sintático	PU sintático baixa densidade	PU sintático alta densidade
Densidade	Kg/m ³	950	1200	800	100	800	700	850
LDA	m	4000	2400	600	3000	2000	600	2000
Temperatura de operação	°C	115	100	100	150	115	100	100
Condutividade térmica	W/m.K	0,22	0,2	0,16	0,04	0,16	0,12	0,18
Tensão de tração	MPa	25	12	12	1	14	6	9
Tensão de compressão	MPa	20	7	10	2	12	5	8

2.4.2. Polipropileno (PP)

O polipropileno é um polímero semicristalino e possui como principais características: insolubilidade em água, odor imperceptível, bastante equilíbrio entre a resistência ao impacto (tração) e rigidez, boa barreira à umidade e menor densidade entre os termoplásticos.

As cadeias moleculares do polipropileno são lineares fazendo com que quando resfriados rapidamente ocorram formações de pequenos cristais, atribuindo a ele características de resistência e transparência. O resfriamento lento do material, porém, ocasiona formações de cristais maiores modificando suas características e podendo torná-los quebradiços e opacos.

O PP sólido possui excelente resistência à pressão hidrostática. Embora seja adequado para lâminas d'água ultra profundas, sua condutividade térmica é alta em relação aos demais tipos de isolamento (SILVEIRA, 2005), fazendo com que a espessura de isolamento seja muito alta restringindo as opções de meios de instalação.

Por outro lado, o polipropileno sintático, além de possuir também boa resistência à pressão hidrostática, possui condutividade térmica baixa em relação aos demais tipos de

isolamento, acarretando assim espessuras menores, fácil aplicação e menor custo em relação ao polipropileno sólido (SILVEIRA, 2005.)

2.4.3. Poliuretano (PU)

O poliuretano sólido possui as mesmas características que o polipropileno sólido, porém o custo é maior. Normalmente sua utilização é feita em juntas de campo, devido a sua facilidade de aplicação.

Já o PU sintático de alta densidade possui características semelhantes ao polipropileno sintático, mas na sua configuração não é necessário a proteção anti-abrasiva e sua condutividade térmica aumenta muito mais que a do PP sintático à medida que a profundidade aumenta (Figura 2.10). O custo do material e da aplicação (Figura 2.11), contudo, são maiores em razão da mobilização de mais equipamentos (SILVEIRA, 2005).

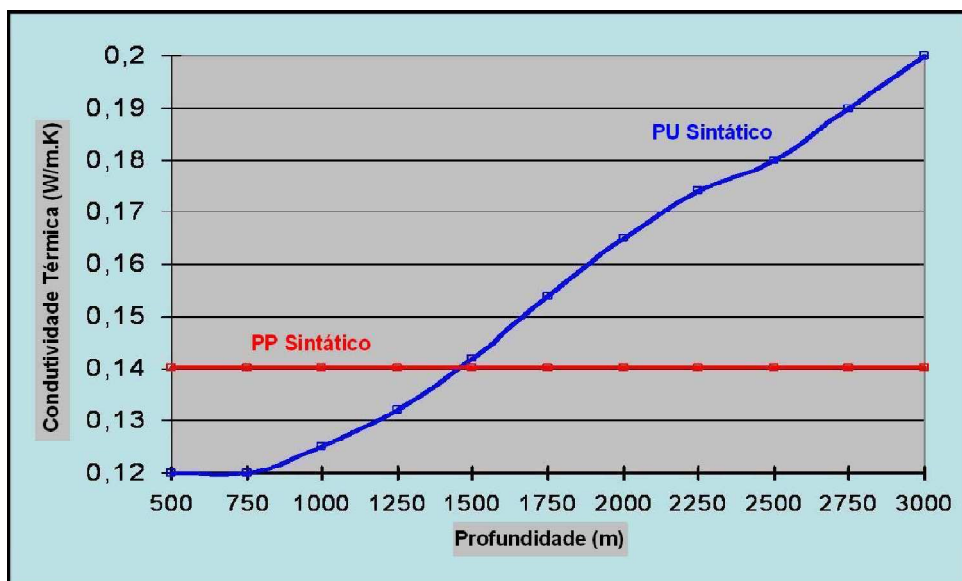


Figura 2.10 – Comparação entre as condutividades térmicas do PP sintático e do PU (KOEBSCH, 2006).

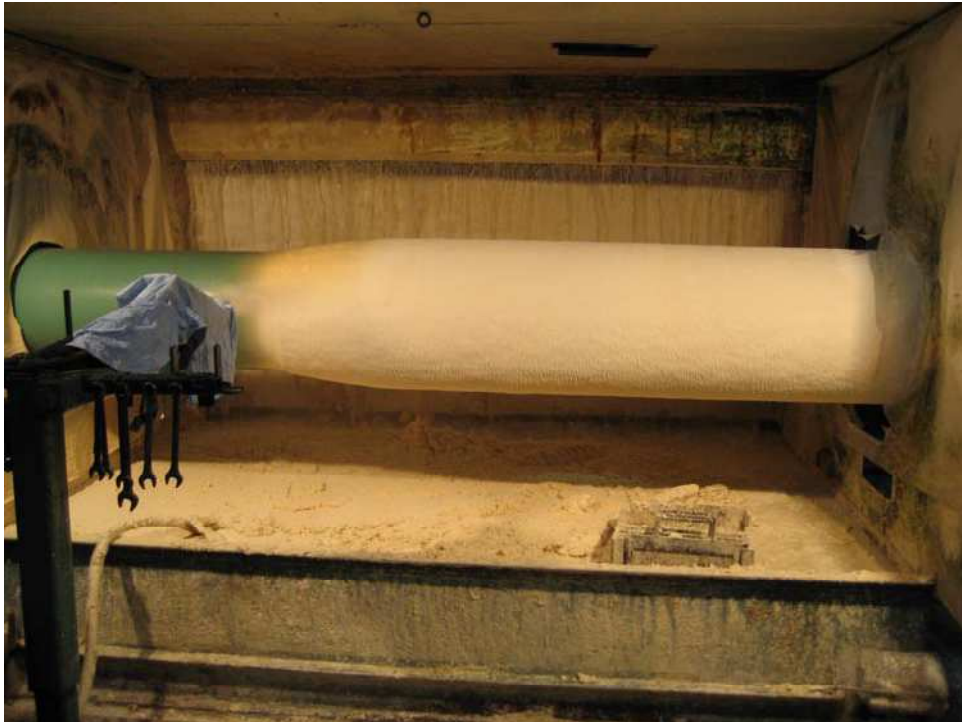


Figura 2.11 – Aplicação da espuma de poliuretano por “spray”. (PUC, 2009).

2.4.4. Aerogel

O aerogel é um material sólido mesoporoso (material poroso cujos poros têm diâmetro de 2 a 50 nm), possuindo mais de 50% do volume em poros. São normalmente compostos de 90% a 99% de ar, tornando-o um isolador extremamente eficiente, com a mais baixa condutividade térmica de todos os sólidos, e sua densidade varia de 1,1 kg/m³ a 150 kg/m³. É um material extremamente leve (material sólido mais leve que existe) derivado de um gel, no qual a sua parte líquida foi substituída por um gás.

Desenvolvido primeiramente em 1931 por Steven Kistler, o aerogel pode ser feito de diversos materiais como dióxido de silício (SiO₂), óxido de alumínio (Al₂O₃), óxido de cromo III, estanho, polímeros orgânicos e inorgânicos. Os aerogéis de carbono foram criados pela primeira vez no final da década de 1990. O termo aerogel é normalmente usado para se referir especificamente ao gel de silício.

O CryogelTM e o Pyrogel[®] são materiais de isolamento desenvolvidos a partir do aerogel nanoporoso pela Aspen Aerogels e estão disponíveis para temperatura de serviço

de -273°C a 385°C , permitindo assim que os produtos tenham bom desempenho em aplicações com temperaturas altas (Pyrogel[®]), baixas (Cryogel[™]) ou ambas simultaneamente.

Esses materiais possuem importantes características tais como (ASPEN AEROGELS, 2007):

- Não são prejudiciais ao meio ambiente;
- São resistentes ao fogo;
- São mais leves do que outros materiais isolantes;
- São materiais flexíveis que deformam sob compressão, mas possuem excelentes propriedades de recuperação, podendo ser exposto a pressões de até 1000 psi, e podem também resistir a altas cargas de impacto, sem danificar nem comprometer seu desempenho.
- São hidrofóbicos, portanto, têm excelente resistência à umidade;
- Possuem condutividade térmica (Figura 2.12) menor do que qualquer outro isolamento industrial;
- Economia significativa operacional e de custo instalado total.

Algumas de suas propriedades são apresentadas nas Tabela 2.3 e Tabela 2.4.

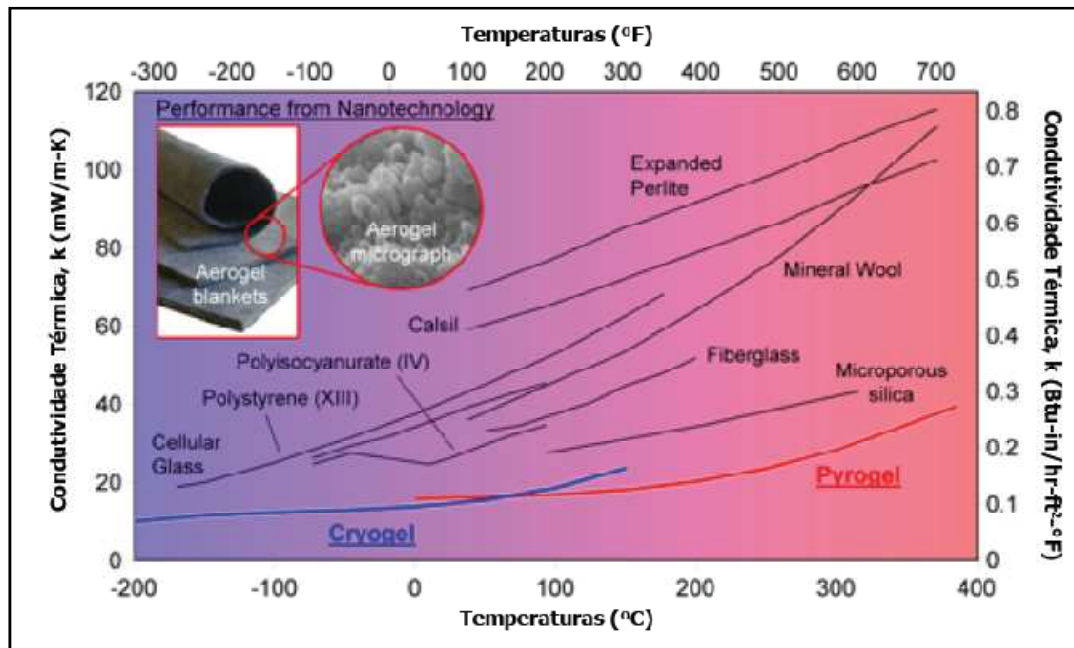


Figura 2.12 - Temperatura x Condutividade térmica (ASPEN AEROGELS, 2007).

Tabela 2.3 – Condutividade térmica (ASPEN AEROGELS, 2007).

Temperatura (°C)	0	100	200	300	400	500	600
K (mW/m*K)	20	23	28	35	46	64	89

Tabela 2.4 – Propriedades do Aerogel (ASPEN AEROGELS, 2008).

Produtos	Espessura (mm)	Condutividade térmica (W/mK)	Densidade (kg/m³)	Temperatura máxima de uso (°C)
Pyrogel XT	5 e 10	0,021	176,2	650 – 1200
Pyrogel XTF	5 e 10	0,021	176,2	650 – 1200
Pyrogel 2250	2	0,0155	171,4	250 – 480
Cryogel Z	5 e 10	0,015	128,15	90 – 194

Na indústria do petróleo, o isolamento em dutos feito por aerogel gera grandes vantagens, pois seu perfil mais fino (Figura 2.13) reduz significativamente os diâmetros dos dutos externos, garantindo isolamento térmico igual ou maior que o isolamento tradicional com polipropileno ou poliuretano. Economiza-se assim, espaço no transporte e na armazenagem, além de reduzir drasticamente os custos de instalação.



Figura 2.13 - Diferença de espessura entre um PIP com aerogel e com PUF.(ASPEN AEROGELS, 2007).

Como revestimento externo, outra grande vantagem, por ser flexível o Pyrogel[®] é instalado rápido e facilmente, sendo enrolado nos tubos e equipamentos (Figura 2.14), em contraste com outros materiais de isolamento, que por serem rígidos tem de ser instalados peça a peça, em seções, exigindo muita mão de obra.



Figura 2.14 - instalação do Pyrogel (ASPEN AEROGELS, 2007).

CAPÍTULO 3

TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM REGIME TRANSIENTE EM DUTOS

3.1. INTRODUÇÃO

Transferência de calor ocorrerá sempre que existir uma diferença de temperatura em um meio ou entre meios diferentes, e essa transferência ocorrerá no sentido das zonas onde a temperatura é mais baixa.

Existem três diferentes modos de transferência de calor: condução, convecção e radiação. A ocorrência desses fenômenos depende se a ação se efetua através de sólidos ou de fluidos, entre sólidos separados por fluidos, entre fluidos separados por uma superfície sólida.

Na transmissão de calor em dutos imersos em água do mar normalmente ocorrerão somente à transferência de calor por condução e convecção, ou seja, as perdas por radiação em dutos submarinos podem ser consideradas desprezíveis.

Deste modo, neste capítulo, serão apresentados alguns conceitos de transferência de calor relacionados à condução e convecção. Informações mais detalhadas sobre os modos de transferência de calor podem ser encontrados em INCROPERA & DEWITT (2003) e ÖZİŞIK (1990).

3.2. MODOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

3.2.1. Condução

A diferença entre a condução estacionária e a condução transiente é que, na estacionária, existem gradientes de temperatura apenas ao longo da direção de uma coordenada, onde a temperatura dentro do sólido em questão não varia com o tempo. Já

na condução transiente se a temperatura da face interna ou externa de um sólido com espessura t for alterada repentinamente, a temperatura no interior do sólido (ao longo da espessura t) começará a variar com o tempo. Somente algum tempo depois será atingida a distribuição de temperatura estacionária.

ÖZİŞİK (1990) define que na transferência de calor por condução, a energia é transferida da região de alta temperatura para a de baixa temperatura pelo movimento cinético ou pelo impacto direto das moléculas, no caso de fluidos em repouso, e pelo movimento de elétrons no caso de sólidos.

A lei fundamental que descreve a condução térmica é a lei de Fourier:

$$q_{cond} = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad (3.1)$$

onde A é a área da seção transversal ao fluxo de calor.

A Eq. (3.1) diz que o calor transferido por unidade de tempo, ou a velocidade de transferência de calor, na direção x , é proporcional à área de transferência perpendicular ao fluxo de calor, ao gradiente de temperatura e à constante de proporcionalidade k , que é a condutividade térmica do material. O sinal negativo é necessário sempre que o gradiente seja negativo, para que o calor, por convenção, se torne um valor positivo.

A condutividade térmica é uma propriedade de transporte que indica a taxa pela qual a energia é transferida pelo processo de difusão. A condutividade depende da estrutura física da matéria, atômica e molecular.

Logo, a condutividade térmica associada com a condução na direção x é definida como:

$$k_x \equiv - \frac{q_x''}{(\partial T / \partial x)} \quad (3.2)$$

A condutividade térmica varia com a temperatura. Para muitos materiais, a variação de k com a temperatura é significativa. A Figura 3.1 mostra esse comportamento. Por outro lado, dentro de determinados intervalos de temperatura, essa variação é bastante pequena podendo ser desprezada.

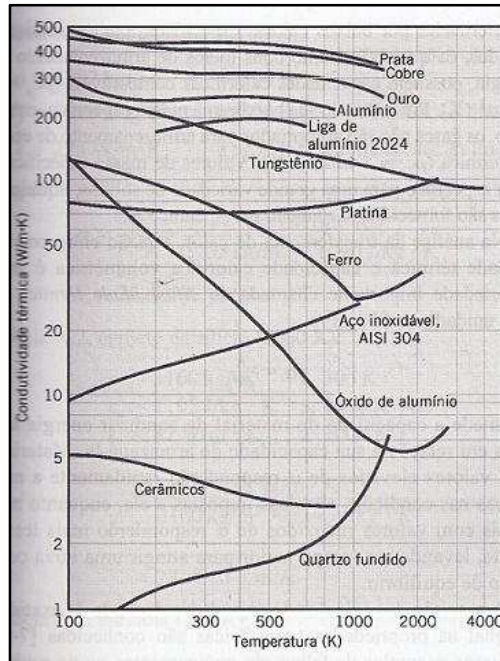


Figura 3.1 – Dependência da condutividade térmica com a temperatura para alguns tipos de sólidos. (INCROPERA, 2003).

A Tabela 3.1 mostra os valores dos diversos tipos de materiais e, nela, pode ser observada a discrepância de valores da condutividade térmica entre sólidos e gases.

Tabela 3.1 – Condutividade térmica de alguns metais, sólidos não metálicos, líquidos e gases. (SOLANO, 2005).

Condutividade térmica a 300K	
Material	k (W/m.K)
Cobre	399
Alumínio	237
Aço-carbono, 1% C	43
Vidro	0,81
Plástico	0,2 - 0,3
Água	0,6
Etilenoglicol	0,26
Óleo de motor	0,15
Freon (líquido)	0,07
Hidrogênio	0,18
Gás	0,026

Outras propriedades térmicas relevantes são conhecidas como propriedades termodinâmicas. Estas dizem respeito ao estado de equilíbrio de um sistema. Duas propriedades muito usadas na análise termodinâmica são a massa específica (ρ) e o calor específico (c_p). O produto ρc_p é denominado como capacidade calorífica volumétrica, representa a capacidade de um material de armazenar energia térmica.

Outra propriedade térmica importante é a difusividade térmica (α), que corresponde a razão entre a condutividade térmica e a capacidade calorífica volumétrica, ou seja:

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \quad (3.3)$$

3.2.2. Convecção

A convecção é um tipo de transferência de calor que irá ocorrer entre uma superfície e um fluido em movimento quando os mesmos se encontrarem em diferentes temperaturas, ou seja, é um processo de transporte de massa caracterizado pelo movimento de um fluido devido a sua diferença de densidade, especialmente por meio de calor.

Se o movimento do fluido for induzido artificialmente, por bomba ou ventilador, o processo é chamado de *convecção forçada*. No caso de não haver fonte externa de movimentação do fluido, diz-se que a transferência de calor se dá por *convecção livre ou natural*.

Embora haja complexidade matemática devido ao movimento do fluido, especialmente quando esse movimento é aleatório, foi desenvolvido um modelo simples, expresso pela lei de Newton do resfriamento para o cálculo da velocidade de transferência de calor:

$$q_{conv} = hA(T_s - T_\infty) \quad (3.4)$$

onde A é a área da superfície em contato com fluido.

Quando a velocidade do fluido diminui e tende para zero, a contribuição do movimento macroscópico do fluido perde importância face ao processo de condução.

O coeficiente de transferência de calor por convecção, h , não é uma propriedade física como a condutividade térmica na lei de Fourier, ou seja, ela depende de algumas propriedades físicas do fluido, do tipo de movimento do fluido (laminar ou turbulento), da geometria da superfície que o fluido percorre, do tipo de convecção (forçada ou natural), da temperatura e com a posição ao longo da superfície.

Pelo fato do coeficiente de transferência de calor por convecção (h) variar com a posição ao longo da superfície, deve-se utilizar o seu valor médio sobre a superfície, em vez de seu valor local. Portanto, nas diversas aplicações em engenharia, há o interesse nos valores médios de \bar{h} .

Como pode ser observado na Tabela 3.2, o coeficiente de transferência de calor toma valores mais elevados quando ocorre mudança de fase e, valores menores no caso de convecção natural em gases, devido simultaneamente aos baixos valores da velocidade e da condutividade térmica do fluido.

Exceto no caso de corpos com configurações muito complexas, onde o coeficiente de transferência de calor por convecção (h) é determinado experimentalmente, nos casos onde a geometria é simples, como por exemplo numa placa lisa ou no interior de um tubo circular, h pode ser determinado analiticamente (INCROPERA & DEWITT, 2003).

Tabela 3.2 - Valores típicos para o coeficiente de transferência de calor por convecção (INCROPERA & DEWITT, 2003).

Tipo de convecção	h (W.m⁻².K⁻¹)
Convecção natural em gases	2 - 15
Convecção natural em líquidos	50 - 1000
Convecção forçada em gases	15 - 250
Convecção forçada em líquidos	100 - 20000
Convecção com mudança de fase: ebulição e condensação	2500 - 100000

Na transmissão de calor em dutos rígidos e/ou flexíveis imersos em água do mar normalmente ocorrerão somente à transferência de calor por condução e convecção, ou seja, as perdas por radiação em dutos submarinos podem ser consideradas desprezíveis comparadas com as perdas por condução e convecção.

Durante o bombeamento do óleo a convecção forçada é dominante. Mas, quando o bombeamento é interrompido, a convecção natural passa a dominar.

3.3. PROBLEMA PROPOSTO

Nesta dissertação será analisada a transferência de calor em sólidos com geometria cilíndrica e estes podem ser tratados como unidimensionais quando apresentam gradiente de temperatura apenas na direção radial. Os modelos matemáticos e a base do programa computacional proposto nesta dissertação foram baseados em estudos já realizados descritos a seguir.

SU *et al.* (2001) usaram um modelo matemático para análise da transferência de calor transiente em dutos multicamadas durante o aquecimento e a parada de bombeio. Um aperfeiçoamento na equação diferencial foi proposta para a equação da condução de calor transiente e, a equação de energia do fluido produzido foi resolvida pelo método da equação diferencial de segunda ordem de *Warming and Beam*. A partir dessas equações, foi desenvolvido um programa computacional para simular a transferência de calor transiente em uma linha multicamadas.

KULLMANN (2006) propôs a resolução das equações de condução de calor unidimensional transiente nas paredes da linha de produção usando o esquema de diferenças finitas de Crank-Nicolson, acoplada com a equação de transporte de energia do fluido produzido, que foi resolvida usando o método das diferenças finitas de *Warming e Beam*.

A equação diferencial que rege o problema unidimensional de condução transiente num sólido com geometria cilíndrica é (ÖZIŞIK, 1994):

$$\frac{1}{\alpha} * \frac{\partial T(r, t)}{\partial t} = \frac{\partial^2 T(r, t)}{\partial^2 r^2} + \frac{1}{r} * \frac{\partial T(r, t)}{\partial r} + \frac{1}{k} * g(r, t), \quad r \neq 0 \quad (3.5)$$

3.3.1. Transferência de calor em regime transiente na direção radial do duto

Nesta dissertação, será considerado, para a análise da condução de calor, um duto composto por N camadas cilíndricas e concêntricas, como é mostrado na Figura 3.2. Cada

camada é considerada como homogênea, isotrópica e com propriedades térmicas constantes. Nessas condições, a equação diferencial que rege a transferência de calor na direção radial do duto é expressa por (ÖZİŞIK, 1994):

$$\frac{1}{\alpha_i} * \frac{\partial T_i(r, t)}{\partial t} = \frac{\partial^2 T_i(r, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} * \frac{\partial T_i(r, t)}{\partial r}, \quad r_i < r < r_{i+1} \quad i = 1, \dots, N \quad (3.6)$$

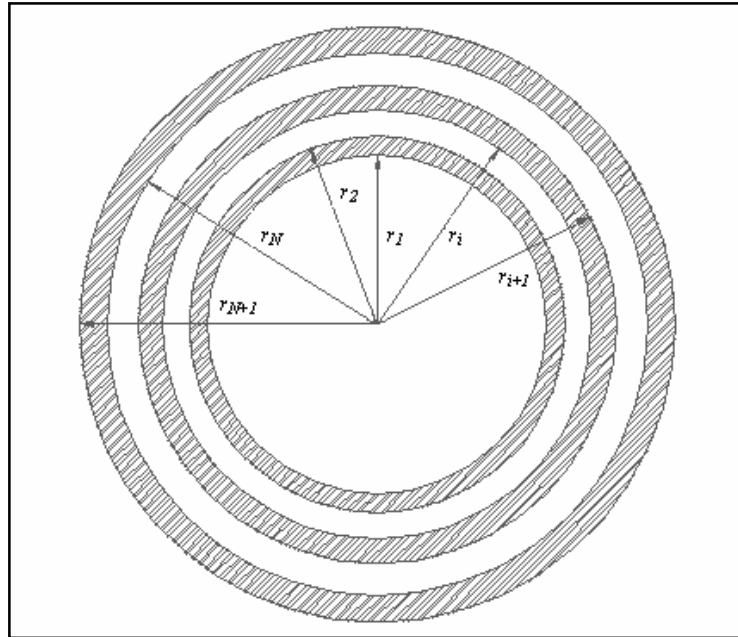


Figura 3.2 - Duto multicamada.

Considerando que as camadas adjacentes estão em contato térmico perfeito e não há geração de calor interna ($g(r, t) = 0$), a Eq. (3.6) fica:

$$-k_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} + h_1 T_1 = h_1 T_f \quad em \ r = r_1 \quad (3.7)$$

$$k_n \frac{\partial T_N}{\partial r} + h_a T_N = h_a T_\infty \quad em \ r = r_{N+1} \quad (3.8)$$

$$k_i \left(\frac{\partial T_i}{\partial r} \right)_j = k_{i+1} \left(\frac{\partial T_{i+1}}{\partial r} \right)_j \quad (3.9)$$

$$T(r, 0) = T_\infty \quad em \ r_1 \leq r \leq r_{N+1}, \ t = 0 \quad (3.10)$$

onde h_1 é o coeficiente de transferência de calor entre a camada interna do duto e o fluido interno e, h_a é o coeficiente de transferência de calor entre a camada externa do duto e o fluido externo.

Para problemas de condução de calor transiente, é necessário o cálculo da solução da Eq.(3.6) em intervalos sucessivos de tempo Δt até o instante final de tempo T_{total} , a partir dos valores iniciais das grandezas em t_0 , ou seja, $t_0, t_0 + \Delta t, t_0 + 2\Delta t, t_0 + 3\Delta t, \dots, T_{total} - \Delta t, T_{total}$. A Eq. (3.6) assim como suas condições de contorno e interface é resolvida usando-se o método de diferenças finitas de segunda ordem de Crank-Nicolson. A Figura 3.3 mostra a discretização de um duto multicamadas em diversos elementos de comprimento Δr . Este tipo de discretização será empregado na solução da Eq. (3.6).

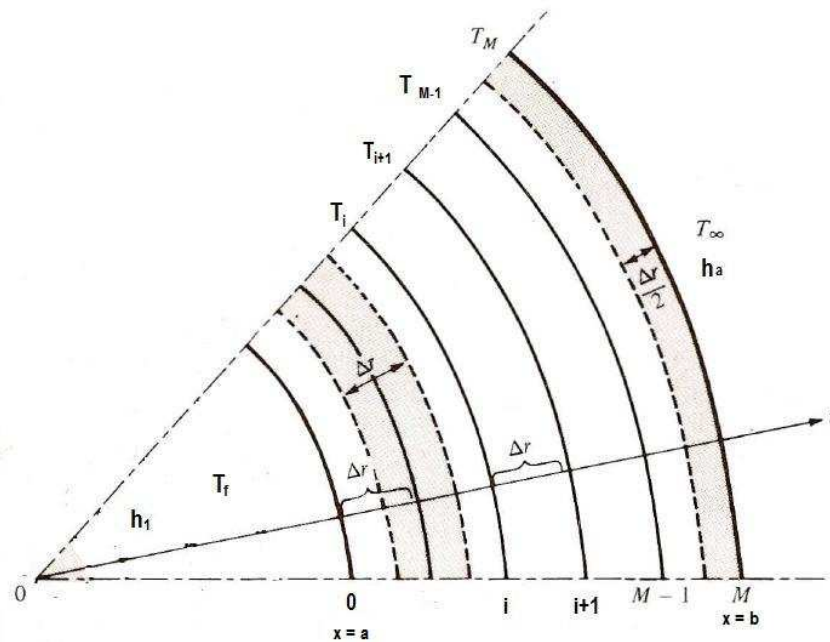


Figura 3.3 – Discretização de uma camada.

Na Figura 3.3, tem-se:

$$\Delta r = \frac{b - a}{M} \quad \text{e} \quad x_i = a + i\Delta r$$

O problema da condução de calor dado pelas Eqs. (3.6) a (3.10) é agora expressado pela forma das diferenças finitas usando o método implícito proposto por Crank e Nicolson (CEBECI, 1984).

Em análise numérica, o método de Crank-Nicolson é um método de diferenças finitas que pode ser empregado para resolver numericamente equações diferenciais parciais parabólicas como a Eq. (3.6). Este é um método de segunda ordem no espaço, implícito no tempo e, numericamente estável. O método foi desenvolvido por Jonh Crank e Phyllis Nicolson em 1947 (CEBECI, 1984).

O método implícito de Crank-Nicolson consiste em avaliar a equação diferencial parcial empregando aproximações progressivas para a derivada temporal e a média das diferenças centrais nos níveis de tempo n e $n + 1$ para as derivadas espaciais, como esquematizado na Figura 3.4.

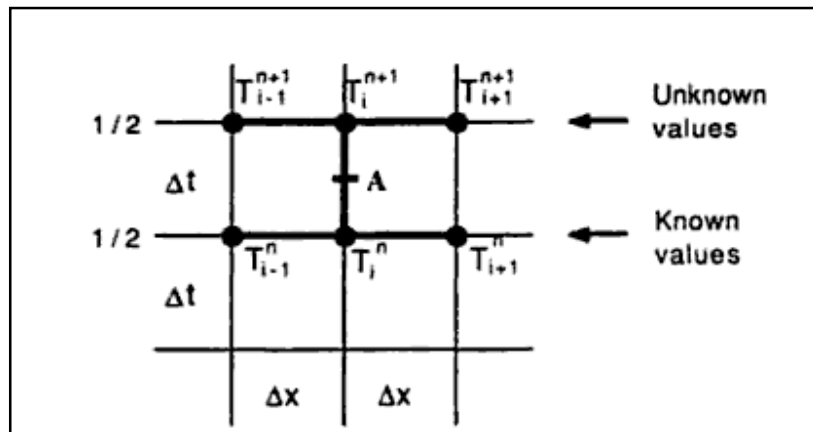


Figura 3.4 – Método de Crank-Nicolson (ÖZİŞIK, 1994).

Matematicamente, isto corresponde as seguintes aproximações:

$$\frac{\partial T(r, t)}{\partial t} = \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t} \quad (3.11)$$

$$\frac{\partial T(r, t)}{\partial r} = \frac{1}{2} * \left[\frac{T_{i+1}^{n+1} - T_{i-1}^{n+1}}{2\Delta r} + \frac{T_{i+1}^n - T_{i-1}^n}{2\Delta r} \right] \quad (3.12)$$

$$\frac{\partial^2 T(r, t)}{\partial r^2} = \frac{1}{2} * \left[\frac{T_{i+1}^{n+1} - 2 * T_i^{n+1} + T_{i-1}^{n+1}}{\Delta r^2} + \frac{T_{i+1}^n + 2 * T_i^n + T_{i-1}^n}{\Delta r^2} \right] \quad (3.13)$$

Tomando as Eqs. (3.11) a (3.13) e substituindo na Eq. (3.6) :

$$\frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t} = \frac{\alpha}{2} \left\{ \left[\frac{T_{i+1}^{n+1} - 2T_i^{n+1} + T_{i-1}^{n+1}}{\Delta r^2} + \frac{T_{i+1}^n + 2T_i^n + T_{i-1}^n}{\Delta r^2} \right] + \frac{1}{r} \left[\frac{T_{i+1}^{n+1} - T_{i-1}^{n+1}}{2\Delta r} + \frac{T_{i+1}^n - T_{i-1}^n}{2\Delta r} \right] \right\} \quad (3.14)$$

que é reescrita como:

$$-\gamma \lambda_i^{(1)} \cdot T_{i+1}^{n+1} + 2(1 + \gamma) \cdot T_i^{n+1} - \gamma \lambda_i^{(2)} \cdot T_{i-1}^{n+1} = \gamma \lambda_i^{(1)} \cdot T_{i+1}^n + 2(1 - \gamma) \cdot T_i^n + \gamma \lambda_i^{(2)} T_{i-1}^n \quad (3.15)$$

para $i = 1, 2, \dots, M - 1$, onde

$$\gamma = \frac{\alpha \Delta t}{\Delta r^2}, \quad \lambda_i^{(1)} = 1 + \frac{1}{\frac{2a}{\Delta r} + 2i}, \quad \lambda_i^{(2)} = 1 - \frac{1}{\frac{2a}{\Delta r} + 2i}$$

A Eq.(3.15) é incondicionalmente estável para qualquer valor de γ . A única restrição para γ é que para cada valor de α e Δr , o valor do incremento do passo de tempo Δt não pode ser muito grande para não prejudicar a precisão.

A Eq.(3.15) fornece $M - 1$ equações. Para determinar as temperaturas nas $M + 1$ posições, deve-se acrescentar as duas equações nos bordos interno e externo.

Considerando a convecção na superfície externa, a Eq. (3.8) pode ser discretizada empregando-se o método da diferença central (ÖZİŞİK, 1994), e assumindo-se no nó fictício $M + 1$ uma temperatura fictícia T_{M+1} (Figura 3.5). Assim, a discretização de (3.8) nos instantes n e $n + 1$ conduz a:

$$\text{Em } n: \quad k \frac{T_{M+1}^n - T_M^n}{2\Delta r} + h_a T_M^n = h_a T_\infty \quad (3.16)$$

$$\text{Em } n + 1: \quad k \frac{T_{M+1}^{n+1} - T_M^{n+1}}{2\Delta r} + h_a T_M^{n+1} = h_a T_\infty \quad (3.17)$$

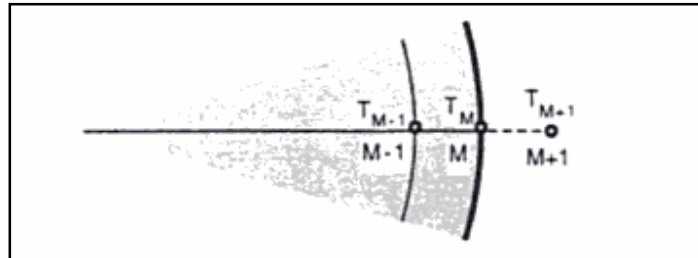


Figura 3.5 – Nó fictício $M + 1$ na temperatura fictícia T_{M+1} (ÖZİŞİK, 1994).

Escrevendo-se a Eq. (3.15) em $i = M$, e substituindo T_{M+1}^n e T_{M+1}^{n+1} das Eq. (3.16) e (3.17), respectivamente, encontra-se a seguinte equação:

$$\left(\frac{1+Y}{Y\lambda_M^{(1)}} + \lambda^{(3)}\right) T_M^{n+1} - \frac{1}{\lambda_M^1} T_{M-1}^{n+1} = \left(\frac{1-Y}{Y\lambda_M^{(1)}} - \lambda^{(3)}\right) T_M^n + \frac{1}{\lambda_M^{(1)}} T_{M-1}^n + 2\lambda^{(3)} T_\infty \quad (3.18)$$

onde, $\lambda^{(3)} = \frac{h_a \Delta r}{k}$.

Considerando-se a convecção na superfície interna, a Eq. (3.7) pode ser discretizada como a Eq. (3.8), porém, nesse caso, cria-se um ponto fictício (-1) e a temperatura fictícia T_{-1} como mostrado na Figura 3.6.

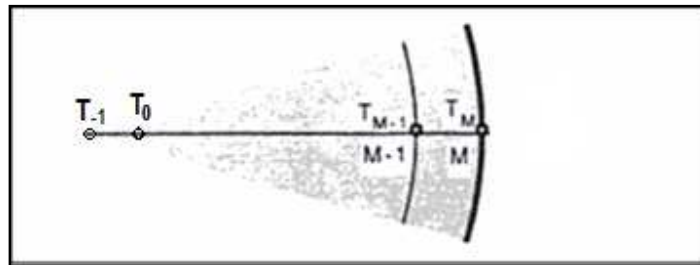


Figura 3.6 - Nó fictício -1 na temperatura fictícia T_{-1} .

Assim, a condição de contorno para $r = r_1$ fica:

$$-\frac{1}{\lambda_0^{(2)}} T_1^{n+1} + \left(\frac{Y+1}{Y\lambda_0^{(2)}} + \lambda^{(4)}\right) T_0^{n+1} = \frac{1}{\lambda_0^{(2)}} T_1^n + \left(\frac{1-Y}{Y\lambda_0^{(2)}} - \lambda^{(4)}\right) T_0^n + 2\lambda^{(4)} T_f \quad (3.19)$$

onde, $\lambda^{(4)} = \frac{h_1 \Delta r}{k}$.

Na condição de interface, Eq. (3.9), há a transferência de calor entre dois meios com diferentes condutividades, como apresentado na Figura 3.7. Se não houver resistência de contato entre os meios, a temperatura entre ambos os lados da interface será:

$$T_{1i} = T_{2i} \quad (3.20)$$

Considerando então essa inexistência de resistência entre as camadas, pode-se dizer que o fluxo de calor $q_{1i} = q_{2i}$. Assim, a Eq. (3.9) torna-se:

$$k_1 \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_1 = k_2 \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_2 = q \quad (3.21)$$

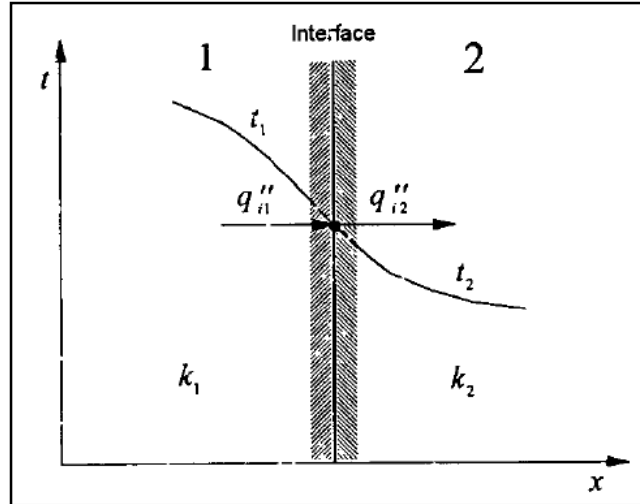


Figura 3.7 – Interface entre dois meios com diferentes condutividades.

Partindo-se, então, das Eqs. de contorno (3.18) e (3.19), e considerando que :

$$\lambda_i^{(1)} = 1 + \frac{1}{\frac{2a}{\Delta r_L} + 2i} = 1 + \frac{\Delta r_L}{D_{L+1}} = \delta_L^{(1)} \quad (3.22)$$

$$\lambda_i^{(2)} = 1 - \frac{\Delta r_{L+1}}{D_{L+1}} = \delta_{L+1}^{(2)} \quad (3.23)$$

Obtêm-se as seguintes equações:

$$\left(\frac{1 + \gamma_L}{\gamma_L \delta_L^{(1)}} \right) T_M^{n+1} - \frac{1}{\delta_L^{(1)}} T_{M-1}^{n+1} = \left(\frac{1 - \gamma_L}{\gamma_L \delta_L^{(1)}} \right) T_M^n + \frac{1}{\delta_L^{(1)}} T_{M-1}^n + \frac{2q\Delta r_L}{k_L} (k_L \Delta r_{L+1}) \quad (3.24)$$

$$-\frac{1}{\delta_{L+1}^{(2)}} T_{M+1}^{n+1} + \left(\frac{\gamma_{L+1} + 1}{\gamma_{L+1} \delta_{L+1}^{(2)}} \right) T_M^{n+1} = \frac{1}{\delta_{L+1}^{(2)}} T_{M+1}^n + \left(\frac{1 - \gamma_{L+1}}{\gamma_{L+1} \delta_{L+1}^{(2)}} \right) T_M^n - \frac{2q\Delta r_{L+1}}{k_{L+1}} (k_{L+1} \Delta r_L) \quad (3.25)$$

Isolando-se q e igualando as Eqs. (3.24) e (3.25) obtêm-se a seguinte equação de interface:

$$\begin{aligned} & \left[\left(\frac{1 + \gamma_L}{\gamma_L \delta_L^{(1)}} \right) + \frac{k_{L+1} \Delta r_L}{k_L \Delta r_{L+1}} \left(\frac{\gamma_{L+1} + 1}{\gamma_{L+1} \delta_{L+1}^{(2)}} \right) \right] T_M^{n+1} - \frac{1}{\delta_L^{(1)}} T_{M-1}^{n+1} - \frac{k_{L+1} \Delta r_L}{k_L \Delta r_{L+1}} \frac{1}{\delta_{L+1}^{(2)}} T_{M+1}^{n+1} \\ & = \left[\left(\frac{1 - \gamma_L}{\gamma_L \delta_L^{(1)}} \right) + \frac{k_{L+1} \Delta r_L}{k_L \Delta r_{L+1}} \left(\frac{1 - \gamma_{L+1}}{\gamma_{L+1} \delta_{L+1}^{(2)}} \right) \right] T_M^n + \frac{1}{\delta_L^{(1)}} T_{M-1}^n + \frac{k_{L+1} \Delta r_L}{k_L \Delta r_{L+1}} \frac{1}{\delta_{L+1}^{(2)}} T_{M+1}^n \quad (3.26) \end{aligned}$$

A Eq. (3.26), portanto, só entra na solução do problema no ponto que houver contato entre dois meios com diferentes condutividades.

O sistema a ser solucionado, portanto, é formado pelas Eqs. (3.15), (3.18), (3.19) e (3.26), sendo que a Eq. (3.26) apenas é utilizada se o duto possuir mais de uma camada.

Essas equações podem ser expressas em forma matricial como:

$$\begin{pmatrix} \frac{\gamma+1}{\gamma \lambda_0^{(2)}} + \lambda^{(4)} & -\frac{1}{\lambda_{0,1}} & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ -\gamma & 2(1+\gamma) & -\gamma & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\gamma & 2(1+\gamma) & -\gamma & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & -\gamma & 2(1+\gamma) & -\gamma \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & -\gamma & \frac{1+\gamma}{\gamma \lambda_M^{(1)}} + \lambda^{(3)} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_0^{n+1} \\ T_1^{n+1} \\ T_2^{n+1} \\ \vdots \\ T_{M-1}^{n+1} \\ T_M^{n+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_0^n \\ T_1^n \\ T_2^n \\ \vdots \\ T_{M-1}^n \\ T_M^n \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 2\lambda^{(4)} T_f \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 2\lambda^{(3)} T_\infty \end{pmatrix}$$

Observa-se, assim, que o método implícito leva a um conjunto de equações simultâneas a ser resolvido em cada intervalo de tempo.

3.3.2. Transferência de calor transiente no fluido transportado

Para a solução da equação da energia, considera-se um escoamento estacionário, plenamente desenvolvido, de um fluido de produção com propriedades constantes sendo transportado através de um duto com seção transversal circular, conforme demonstrado na Figura 3.8, a uma velocidade média v . Nessa condição, a equação de energia transiente unidimensional para o fluido de produção é (SU *et al.*, 2001):

$$\frac{\partial T_f}{\partial t} + v \frac{\partial T_f}{\partial x} = - \frac{2q_{r1}}{r_1 \rho_f c_{pf}} \quad (3.27)$$

$$q_{r1} = h_1 (T_f - T_{r1}) \quad (3.28)$$

onde, h_1 é o coeficiente de transferência de calor entre o fluido e a parede interna na linha e T_{r1} é a temperatura na parede interna da linha de produção.

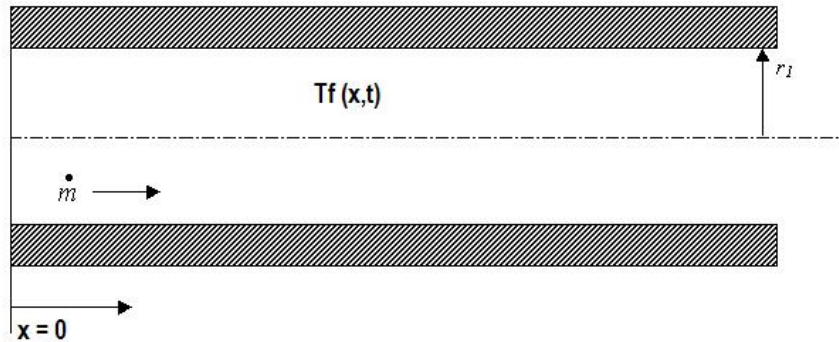


Figura 3.8 – Seção transversal de uma linha de produção circular. (SU *et al.*, 2001).

A Eq. (3.27) será resolvida com a distribuição de temperatura inicial ($T_f(x, 0)$) do fluido ao longo de todo o duto, e assumindo que a entrada do duto permaneça com temperatura constante e igual à temperatura de entrada do óleo, ou seja:

$$T_f(x, 0) = T_{f0}(x) \quad (3.29)$$

$$T_f(0, t) = T_{fin} \quad (3.30)$$

A discretização da Eq. (3.27) é feita empregando-se o método da diferença central de segunda ordem de Crank-Nicolson (ÖZİŞİK, 1994), onde:

$$\frac{\partial T_f}{\partial t} = \frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t} \quad (3.31)$$

$$\frac{\partial T_f}{\partial x} = \frac{1}{2} \left[\frac{T_{i+1}^{n+1} - T_{i-1}^{n+1}}{2\Delta x} + \frac{T_{i+1}^n - T_{i-1}^n}{2\Delta x} \right] \quad (3.32)$$

Substituindo a Eq. (3.28) na Eq. (3.27) obtém-se:

$$\frac{\partial T_f}{\partial t} + v \frac{\partial T_f}{\partial x} = - \frac{2h_1(T_f - T_{r1})}{r_1 \rho_f c_{pf}} \quad (3.33)$$

chamando, $\alpha = \frac{2h_1}{r_1 \rho_f c_{pf}}$

Substituindo as Eqs. (3.31) e (3.32) na Eq. (3.33):

$$\frac{T_i^{n+1} - T_i^n}{\Delta t} + \frac{v}{2} \left[\frac{T_{i+1}^{n+1} - T_{i-1}^{n+1}}{2\Delta x} + \frac{T_{i+1}^n - T_{i-1}^n}{2\Delta x} \right] = -\alpha(T_f - T_{r1}) \quad (3.34)$$

$$T_i^{n+1} - T_i^n + \frac{v\Delta t}{4\Delta x} T_{i+1}^{n+1} - \frac{v\Delta t}{4\Delta x} T_{i-1}^{n+1} + \frac{v\Delta t}{4\Delta x} T_{i+1}^n - \frac{v\Delta t}{4\Delta x} T_{i-1}^n = -\alpha\Delta t T_i^n + \alpha\Delta t T_{r1} \quad (3.35)$$

onde $C = \frac{v\Delta t}{\Delta x}$ é o chamado número de Courant-Friedrichs-Lewy, CFL ou simplesmente número de Courant (COURANT, 1967). Este número representa a condição de estabilidade enquanto se resolve a equação diferencial parcial. A análise de estabilidade de Von Neumann mostra que o método é estável quando $0 \leq C \leq 1$ (PRESS *et al.*, 2007). Desse modo, a Eq. (3.35) fica:

$$-\frac{C}{4} T_{i-1}^{n+1} + T_i^{n+1} + \frac{C}{4} T_{i+1}^{n+1} = \frac{C}{4} T_{i-1}^n + (1 - \alpha\Delta t) T_i^n - \frac{C}{4} T_{i+1}^n + \alpha\Delta t T_{r1} \quad (3.36)$$

Com as condições de contorno:

$$T_i^0 = T_{mar} \quad (3.37)$$

$$T_0^n = T_{fluido} \quad (3.38)$$

Foi assumido que em um duto discretizado com $N_1 + 1$ divisões longitudinais, a temperatura no ponto $N_1 + 1$ ($T_{N_1+1}^n$), nó final do duto, é igual a temperatura no ponto imediatamente anterior N_1 ($T_{N_1}^n$).

Na simulação da parada de produção, a Eq. (3.36) continua valendo, desde que se faça a velocidade do fluido igual a zero, e as condições de contorno descritas nas Eqs. (3.37) e (3.38) mudam para a temperatura do fluido no último instante de tempo.

$$T_i^0 = T_i^{Nt} \quad (3.39)$$

3.3.3. Transferência de calor no regime estacionário

Depois de um determinado tempo escoando do em uma tubulação ou mesmo parado dentro desse duto, o fluido poderá entrar em equilíbrio térmico com a tubulação e o meio que a circunda. Nestes casos, diz-se que a temperatura do fluido entrou em regime estacionário (*steady state*).

Para se calcular a temperatura em regime estacionário, precisa-se conhecer o coeficiente de transferência de calor global, o qual engloba os efeitos condutivos ao longo de toda parte interna da tubulação e os efeitos de convecções interna e externa entre o fluido interno e a superfície interna do duto e o fluido externo e a superfície externa.

O coeficiente de transferência de calor global (U) é dado por SU et al. (2001):

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \sum_{i=1}^N \frac{r_1}{k_i} * \ln \frac{r_{i+1}}{r_i} + \frac{r_1}{r_{N+1} * h_a}} \quad (3.40)$$

onde, h_1 é o coeficiente de transferência de calor convectivo entre o fluido interno e a superfície interna, h_a é o coeficiente de transferência de calor convectivo entre o fluido externo e a superfície externa, r_i é o raio na i -ésima camada.

Como na condução de calor permanente, a taxa de transferência de calor (q) é uma constante em toda a camada radial, e pode ser descrita como:

$$q = U2\pi r_1(T_f - T_\infty) \quad (3.41)$$

E o fluxo de calor em cada camada radial como:

$$Q_i = \frac{q}{2\pi r_i} \quad (3.42)$$

Para determinar a distribuição de temperatura estacionária em cada camada do duto de N camadas cilíndricas adjacentes (Figura 3.2), é considerado a simetria circunferencial, a condução axial e as resistências térmicas de contato foram desprezadas e, também, considerando as condutividades térmicas de cada camada constante, ou seja, não variam com a temperatura. Assim, a condução de calor radial pode ser expressa como:

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dT}{dr} \right) = 0 \quad r_i < r < r_{i+1} \quad (3.43)$$

Com as seguintes condições de contorno:

$$T(r_i) = T_i \quad (3.44)$$

$$T(r_{i+1}) = T_{i+1} \quad (3.45)$$

onde r_i e r_{i+1} são os raios interno e externo da i – ésima camada, respectivamente, como é mostrado na Figura 3.2.

Manipulando as Eqs. (3.43) a (3.45), chega-se a equação para distribuição de temperatura na camada i :

$$T(r) = (T_{i+1} - T_i) \frac{\ln\left(\frac{r}{r_i}\right)}{\ln\left(\frac{r_{i+1}}{r_i}\right)} + T_i \quad (3.46)$$

A distribuição de temperatura do fluido no estado estacionário ao longo do duto, é dada através da equação (SU et al., 2001):

$$T_{f0}(z) = (T_{fin} - T_m) * \exp\left(\frac{-Uz2\pi r_1}{\dot{m}c_{pf}}\right) + T_m \quad (3.47)$$

3.4. VERIFICAÇÃO DO PROGRAMA

A solução numérica para o modelo matemático descrito neste capítulo, foi implementada em um programa computacional chamado TRANSIENTE.

Os procedimentos do programa são descritos a seguir:

1) *Leitura do arquivo TRANSIENTE.DAT*

Neste arquivo encontram-se as seguintes informações: número de camadas, número de dimensões longitudinais, tempo total da análise, número de intervalos de tempo, número de divisões de cada camada, temperatura no fundo do mar, temperatura do fluido na entrada da tubulação, vazão mássica, densidade e calor específico do fluido interno, condutividade do fluido interno e externo, o diâmetro interno do duto e o comprimento total da tubulação, a densidade, o calor específico, a condutividade térmica e a espessura de cada camada do duto.

2) *Cálculo do espaçamento longitudinal, intervalo de tempo, área interna e velocidade do escoamento.*

3) *Leitura das condições de contorno para o aquecimento ou fechamento da tubulação.*

4) *Cálculo da matriz “C_a”.*

Matriz formada com os coeficientes da Eq. (3.36)

5) *Cálculo da condução radial em cada camada – Resolução do sistema de equações não lineares.*

Resolução feita pelo método de Crank-Nicolson.

6) Cálculo da convecção transiente – Temperatura de saída do óleo.

Resolução da equação: $C_a \cdot T_i^{j+1} = R \cdot T_i^j + constante$, feita pelo método de Crank-Nicolson.

O fluxograma encontrado na Figura 3.9 resume os procedimentos descritos acima.

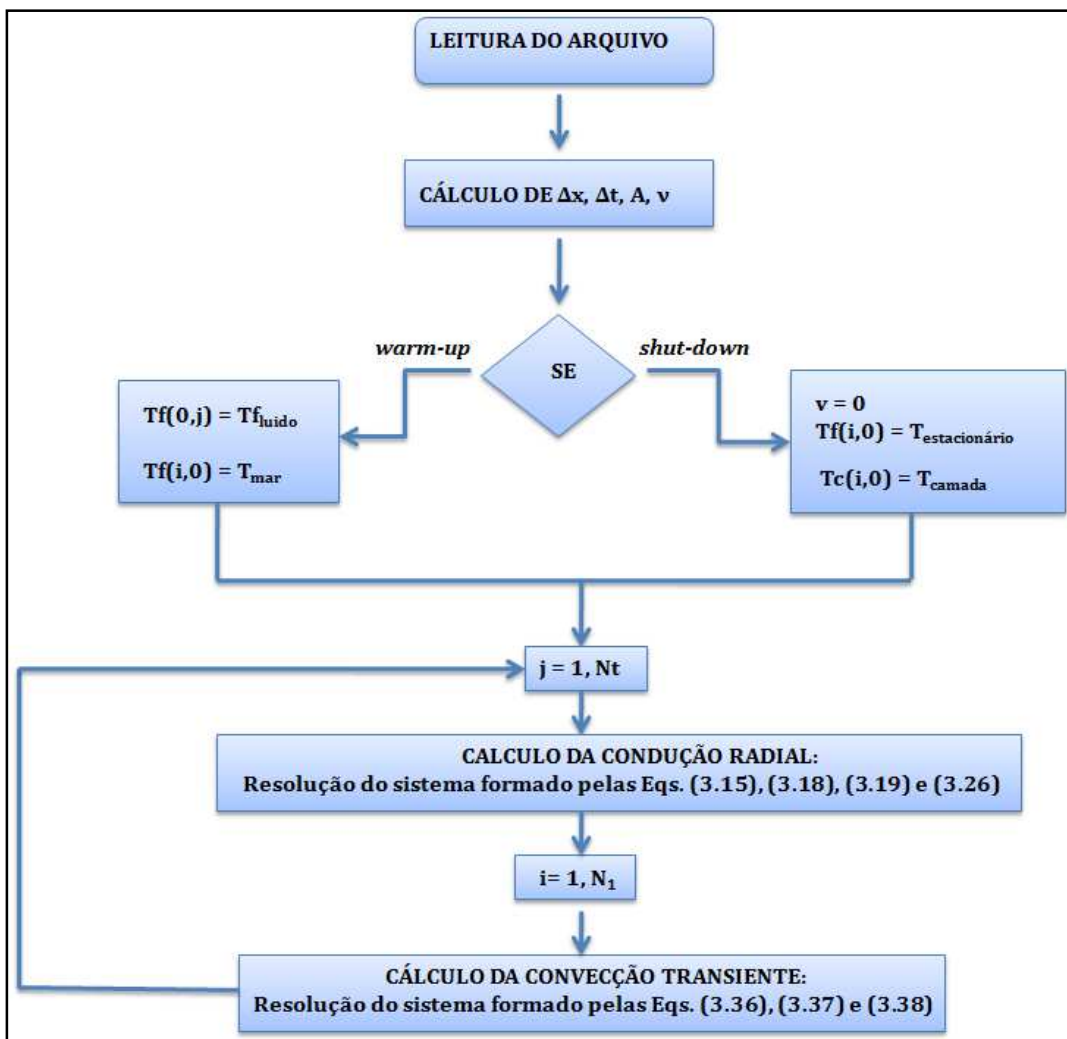


Figura 3.9 - Fluxograma do programa desenvolvido em Fortran90.

CAPÍTULO 4

DESCRIÇÃO E MODELO PARA PREVISÃO DO FENÔMENO DE *WALKING*

4.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo será apresentado o modelo de elementos finitos voltado para análise da resposta estrutural de um duto rígido apoiado no solo marinho e percorrido por um fluido quente.

Será apresentada, também, uma breve explicação sobre o fenômeno de *walking*, ou seja, o deslocamento axial que esse duto irá sofrer ao longo dos anos após vários ciclos de aquecimento e resfriamento.

4.2. O FENÔMENO DO *WALKING*

Quando uma linha está estendida sobre o leito marinho e é aquecida com a passagem de um fluido quente, ela tende a se expandir. Essa expansão é resistida pelo atrito gerado pelo contato do duto com o solo marinho. Quando o duto é resfriado, ele se contrai, mas os efeitos do atrito do solo marinho sobre o duto faz com que ele não se contraia até sua posição original. Com subseqüentes ciclos de aquecimento e resfriamento, um deslocamento vai sendo acumulado no sentido da ponta quente (extremidade próxima ao poço) para a ponta fria (extremidade oposta) do duto. Esse deslocamento acumulado é chamado *walking* e pode ser crítico para a estrutura, uma vez que muitos ciclos repetitivos de aquecimento e resfriamento da linha podem levar a consideráveis deslocamentos globais da linha, comprometendo-a.

O *walking*, portanto, é um fenômeno contínuo e ocorre em cada ciclo térmico (aquecimento e resfriamento). Embora o *walking* se inicie no primeiro ciclo, é o segundo e os subseqüentes ciclos que dominam o processo.

O mecanismo do *walking* é dominado pela fase transiente de carregamento e, é portanto, compreendido através da análise das relações entre o transiente térmico, o perfil de força, e o deslocamento do duto em cada ciclo de tempo durante o processo de aquecimento e desaquecimento.

O *walking* ocorre predominantemente em dutos curtos quando há (CARR *et al.*, 2006):

- Tração imposta, por exemplo, por um SCR na extremidade final do duto.
- Inclinação global do leito marinho ao longo do comprimento do duto;
- Gradientes térmicos através do duto devidos a mudanças das condições de operação.

Nesta dissertação, será tratado apenas o terceiro item, mais informações sobre os demais podem ser encontrado em CARR *et al.* (2006).

Diferentes autores estudaram o fenômeno de *walking* nos últimos anos. TORNES *et al.* (2000) estudaram em detalhe esse mecanismo e realizaram um grande número de análises não lineares com modelos baseados no método dos elementos finitos. Através desses modelos, calcularam-se os deslocamentos axiais do duto após vários ciclos de carregamento e descarregamento da linha considerando o regime transiente de escoamento. Dois diferentes tipos de comportamento foram observados: o de duto “longo” e o de duto “curto”. A expansão térmica num duto “longo” é contida devido a um equilíbrio entre as forças axiais geradas pela resistência ao atrito e a soma entre as pressões e expansões térmicas, fazendo com que a expansão só ocorra nas extremidades do duto. No caso de um duto “curto”, as forças axiais geradas pelo atrito não são capazes de equilibrar a soma das pressões e expansões térmicas, logo ocorre a expansão do duto. Isto pode ser observado na Figura 4.1.

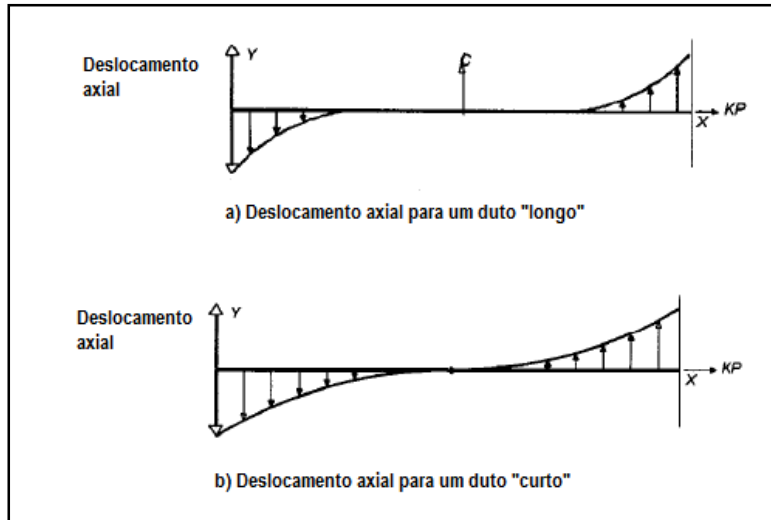


Figura 4.1 – Deslocamento axial para um duto longo e curto (TORNES *et al*, 2000).

Os autores observaram ainda que o duto se aquece gradativamente da ponta quente para a ponta fria, ou seja, há um gradiente de temperatura distinto ao longo da linha durante a fase de aquecimento. O deslizamento inteiro ocorre antes do atrito ser totalmente mobilizado, isto é, quando o duto ainda é “longo” em relação a expansão. Foram propostos e discutidos métodos para solucionar ou verificar o problema descrito.

CARR *et al.* (2003) afirmam que o *walking* ocorre em dutos curtos com as pontas livres, sujeitas a intensos ciclos de carregamento térmico. Postulam, também, que a resposta da expansão de um duto curto forma uma “âncora virtual” próxima ao centro do duto e a expansão dessa ancora ocorre através de cada ponta do duto (Figura 4.2). A partir do segundo ciclo de aquecimento/resfriamento em diante, a expansão axial do duto tem amplitude constante.

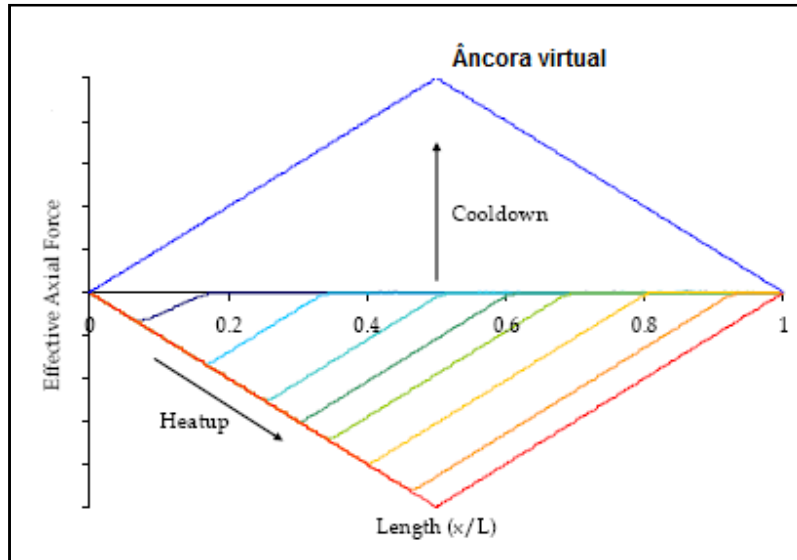


Figura 4.2 – Exemplo de um perfil de força com a âncora virtual (CARR *et al.*, 2006)

CARR *et al.* (2006) estudam o fenômeno do *walking* empregando tanto modelos numéricos quanto modelos analíticos simplificados. Através de um estudo paramétrico, os autores apontam que os principais parâmetros relacionados ao fenômeno de *walking* são: o atrito na direção axial do solo com o duto; o gradiente térmico transiente; as condições de operação em regime permanente, que definem a variação da força efetiva ao longo do duto; a possível inclinação do solo marinho; e a tração imposta à extremidade do duto pela possível presença de um SCR.

O ponto mais importante para o fenômeno do *walking* é o perfil térmico transiente desenvolvido através do aquecimento do duto. Como o fluido entra quente no duto frio, o calor é perdido para o duto através da condução e convecção, esfriando o fluido rapidamente para a temperatura ambiente. Com o tempo, o duto aquece gradualmente, até o fluido quente ser descarregado na extremidade final da linha. Um perfil de variação da temperatura ao longo do duto com o tempo é mostrado na Figura 4.3.

Nesse ponto, cabe destacar as análises realizadas por CARR *et al.* (2006) em dutos assentados em solo perfeitamente plano e com as extremidades livres. Nessas condições, CARR *et al.* (2006) examinaram o fenômeno de *walking* analiticamente considerando um perfil simplificado da temperatura linear transiente, como é mostrado na Figura 4.3.

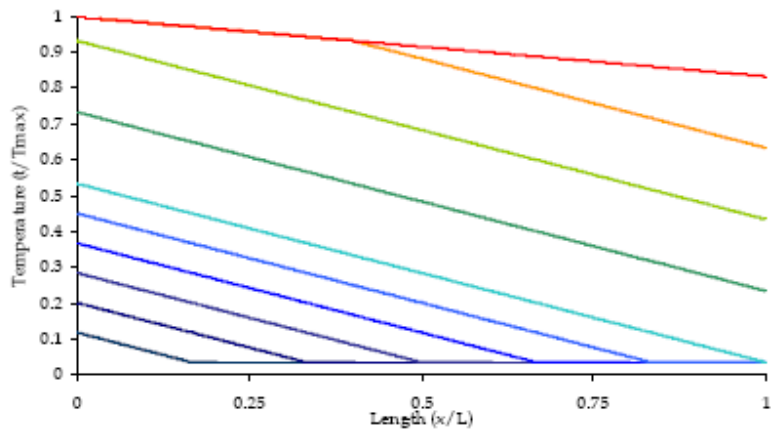


Figura 4.3 - Exemplo do transiente térmico simplificado (CARR *et al.*, 2006).

O modelo analítico desenvolvido por CARR *et al.*(2006) considera ainda as seguintes hipóteses:

- Perfil linear da temperatura transiente, com gradiente constante durante aquecimento;
- Não há variação de pressão (pressão nula);
- Deslocamento de mobilização de atrito axial não é considerado;
- Duto totalmente mobilizado (“curto”), ou seja, a força axial gerada pelo gradiente térmico ($f_{\theta} = EAq_{\theta}$) é superior à resistência axial devida ao atrito f ;
- Considera apenas o segundo e subsequentes ciclos de aquecimento e resfriamento.

Uma solução incremental é desenvolvida em que a posição do ponto quente é permitida para se deslocar a partir do ponto médio da linha em K passos iguais a X_A . Uma posição arbitrária de aquecimento é considerada. A temperatura e o perfil de força são mostrados na Figura 4.4.

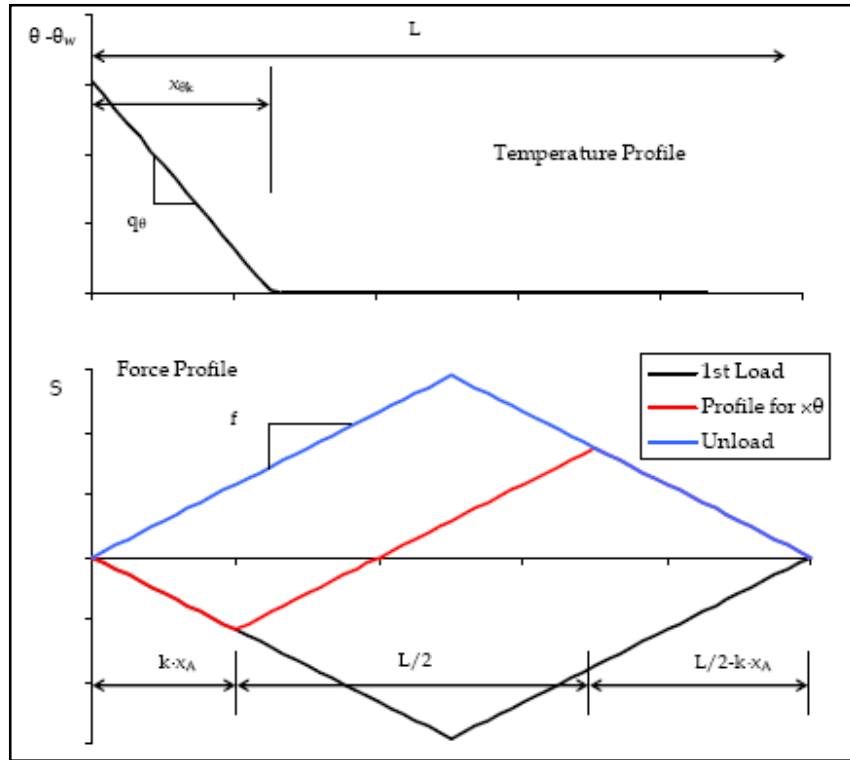


Figura 4.4 - Perfil de força e temperatura (CARR *et al.*, 2006).

Nesta fase do aquecimento o ponto quente está na posição $K \cdot x_A$ e a temperatura está acima da temperatura ambiente para a distância $x_{\theta k}$ (ΔL após o aquecimento), que é a incógnita da equação.

$$x_{\theta k} = k \cdot x_A + \sqrt{(k \cdot x_A - x_{\theta k-1})^2 + \frac{2 \cdot f \cdot x_A \cdot (L \cdot x_A)}{f_{\theta}}} \quad (4.1)$$

Será admitido que a força de atrito é um percentual da carga térmica para realização de uma análise paramétrica. O cálculo da força (partindo do peso submerso do duto) deve ser realizado.

$$f = \frac{1}{n_p} f_{\theta} \quad (4.2)$$

Para começar a análise do transiente térmico é adotado a localização do ponto, isto é, $x_{\theta} = x_A$. Uma vez $x_{\theta k}$ conhecido, o deslocamento no centro da linha é dado por:

$$\frac{fx_A^2}{EA}(2k-1) \quad \text{se } x_{\theta_k} \leq \frac{L}{2} \quad (4.3)$$

$$\Delta w_k = \frac{fx_A^2(2k-1)}{EA} - \frac{f_{\theta} \cdot \left(x_{\theta_k} - \frac{L}{2}\right)^2}{2EA} \quad \text{se } x_{\theta_{k-1}} < \frac{L}{2} \leq x_{\theta_k} \quad (4.4)$$

$$\Delta w_k = \frac{fx_A^2(2k-1)}{EA} - \frac{f_{\theta} \cdot \left(L(x_{\theta_{k-1}} - x_{\theta_k}) + (x_{\theta_k}^2 - x_{\theta_{k-1}}^2)\right)}{2EA} \quad \text{se } x_{\theta_{k-1}} > \frac{L}{2} \quad (4.5)$$

O *walking* total calculado é então:

$$\Delta_T = \sum_k \Delta w_k \quad (4.6)$$

Uma abordagem ainda mais simples que a definida pelas Eqs. (4.1) a (4.6) para previsão do *walking* é dada pelas fórmulas:

$$\Delta_T \cong \frac{f \cdot L^2}{16EA} \left(\sqrt{24 \frac{f_{\theta}}{f}} - \frac{f_{\theta}}{f} - 4 \right) \quad \text{se } f > \frac{f_{\theta}}{6} \quad (4.7)$$

$$\Delta_T \cong \frac{f \cdot L^2}{8EA} \quad \text{se } f < \frac{f_{\theta}}{6} \quad (4.8)$$

O valor do *walking* varia com a força de atrito f , e existe uma dada força de atrito na qual o valor é máximo:

$$f_{max} = \frac{3}{8} f_{\theta} \quad (4.9)$$

O desenvolvimento do modelo assume que o transiente exhibe um gradiente constante ao longo do duto até chegar ao estado estacionário. Na realidade, o gradiente reduz com o aquecimento do duto (Figura 4.3). A solução incremental pode ser usada com uma mudança do gradiente térmico transiente, enquanto a mudança no gradiente durante um incremento é pequeno.

Foi destacado, contudo, pelos diferentes autores citados, que um aspecto fundamental para a previsão do fenômeno do *walking* é a correta representação do perfil

térmico transiente desenvolvido nas fases de aquecimento e desaquecimento do duto. Como o fluido entra quente no duto frio, o calor é perdido através de suas paredes por condução e convecção. Com o tempo, o duto aquece gradualmente até o fluido quente ser descarregado na extremidade final da linha. Um perfil típico da variação de temperatura ao longo do duto durante a fase de aquecimento é mostrado na Figura 4.5.

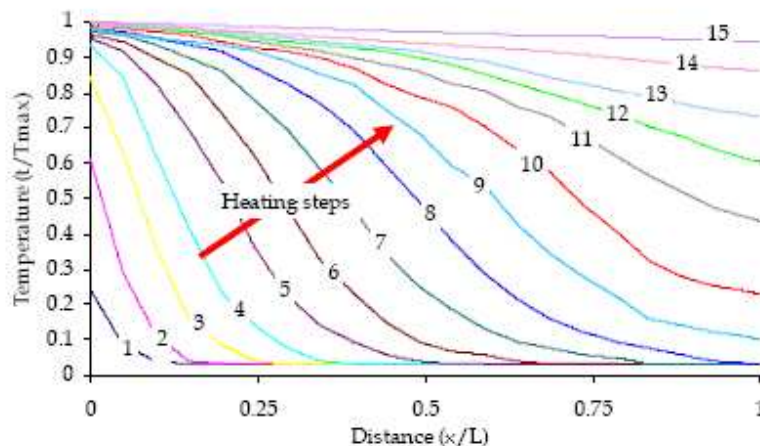


Figura 4.5 - Transiente térmico (CARR *et al.*, 2006).

Esses perfis de temperatura são não lineares, porque o duto não é aquecido uniformemente ao longo do comprimento, mas a temperatura ao longo do duto cresce rapidamente à medida que o fluido progride. Com o passar do tempo, o fluxo entra no regime permanente e não há mais variações de temperatura significativas.

4.3. MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

4.3.1. Características gerais do modelo

O modelo de elementos finitos proposto nessa dissertação para previsão do fenômeno de *walking* considera a não linearidade de contato advinda da interação solo-duto aquecido e, se necessário, é possível considerar tanto o comportamento não linear do material que compõe o duto quanto não linearidades geométricas. A variação transiente de temperatura na parede do duto e seu peso submerso também são considerados.

A malha de elementos finitos gerada com o modelo proposto nesta dissertação é analisada através do programa de elementos finitos comercial ANSYS®, e os tipos de elementos escolhidos foram:

- BEAM188 – elemento de pórtico tridimensional não linear, utilizado para representar o duto.
- COMBIN39 – elemento de mola não linear empregado para representar a interação entre solo e duto.

A Figura 4.6 apresenta o modelo de elementos finitos, elaborado para essa dissertação a partir dos elementos descritos acima, sendo representado com as propriedades geométricas expandidas.

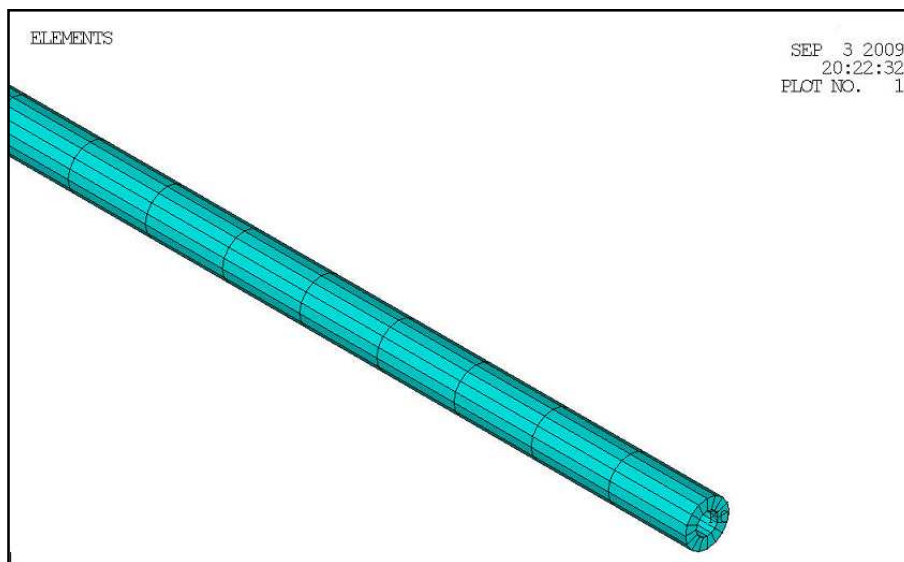


Figura 4.6 – Modelo em elementos finitos elaborado para a previsão do fenômeno de *walking* (propriedades geométricas expandidas).

4.3.2. Modelagem do duto

A opção pelo elemento finito BEAM188 para modelagem do duto vem do elevado número de graus de liberdade que seriam necessários para se representar longas extensões desses dutos através de elementos finitos de casca ou sólidos tridimensionais.

O elemento finito BEAM188 é um elemento de pórtico tridimensional com função de interpolação linear e composto por 2 nós (I e J conforme exposto na Figura 4.7). Um terceiro nó pode ser empregado para definir a direção dos seu eixos de inércia. Possui seis graus de liberdade em cada nó, ou seja, translações e rotações em relação aos eixos X, Y e Z, conforme indicado na Figura 4.7. O elemento se baseia na teoria de Timoshenko para vigas. Nessa dissertação, foi empregada a opção padrão, ou seja, o elemento com dois nós.

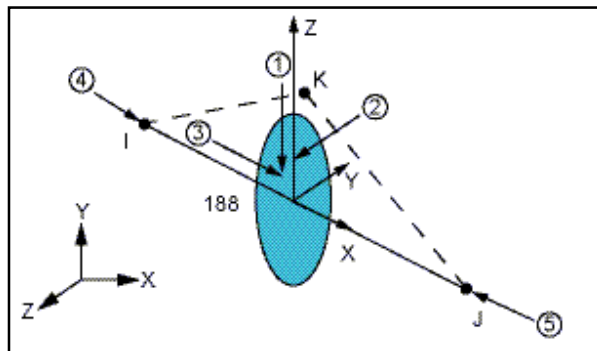


Figura 4.7 – O elemento finito BEAM188 (ANSYS, 2007).

Para a representação de dutos multicamadas, como os *pipe-in-pipe*, na abordagem aqui proposta calculou-se um módulo de elasticidade linear equivalente para o duto assumindo que os materiais que os compõem possuem comportamento elástico e linear. O mesmo foi feito para o coeficiente de dilatação térmica.

Assim, o módulo de elasticidade equivalente foi calculado da seguinte forma:

$$E_{eq} = \frac{E_{aço}A_{aço} + E_{pp}A_{pp}}{A_{aço} + A_{pp}} \quad (4.10)$$

Para o coeficiente de dilatação térmica, fez-se a média ponderada entre as rigidezes de cada camada do duto, deste modo:

$$\alpha_{eq} = \frac{\alpha_{pp}E_{pp}A_{pp} + \alpha_{aço}E_{aço}A_{aço}}{E_{eq} \cdot (A_{aço} + A_{pp})} \quad (4.11)$$

4.3.3. Representação da interação entre duto e solo

O elemento finito COMBIN39 é um elemento unidirecional ao qual podem ser atribuídas diferentes relações entre carga e translações nas direções X, Y, Z ou carga e rotações em torno das mesmas direções. O elemento é definido por dois nós (I e J, conforme Figura 4.8), que podem ser coincidentes. A Figura 4.8 ilustra a geometria do elemento e uma típica curva carga vs deslocamento.

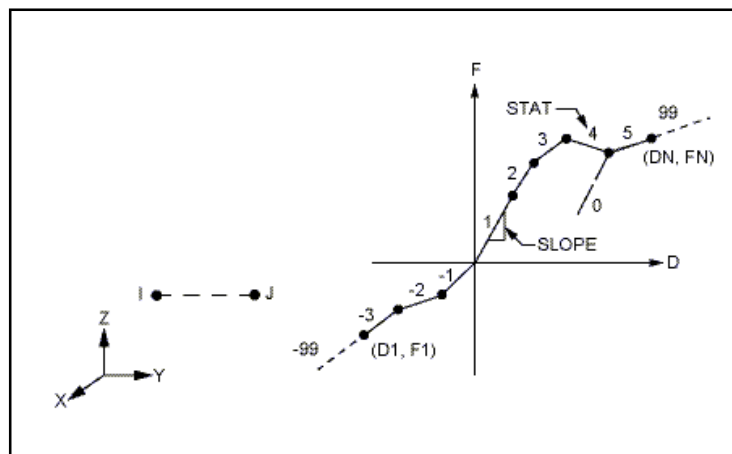


Figura 4.8 – O elemento finito COMBIN39 (ANSYS, 2007).

Nessa dissertação, o objetivo é estudar o fenômeno de *walking* que, como será visto mais adiante, caracteriza-se pelo deslocamento na direção do eixo axial do duto (direção X do modelo). Deste modo, o elemento COMBIN39 será empregado para representar o atrito entre o duto e o solo ou, possivelmente, restrições nas extremidades do duto como, por exemplo, um PLET. Assume-se, portanto que:

- o descarregamento da força de atrito ocorra numa linha paralela à inclinação da curva de carregamento original (Figura 4.9).
- o comportamento do elemento sob compressão é análogo ao observado na tração.
- há, apenas, resistência na direção X do elemento.

Na Figura 4.9, são indicados dois importantes parâmetros de análise: o deslocamento de mobilização e a força máxima para vencer o atrito entre o duto e o solo. O

deslocamento de mobilização é o máximo valor admitido para o deslocamento relativo entre duto e solo antes que o atrito entre as duas superfícies seja vencido.

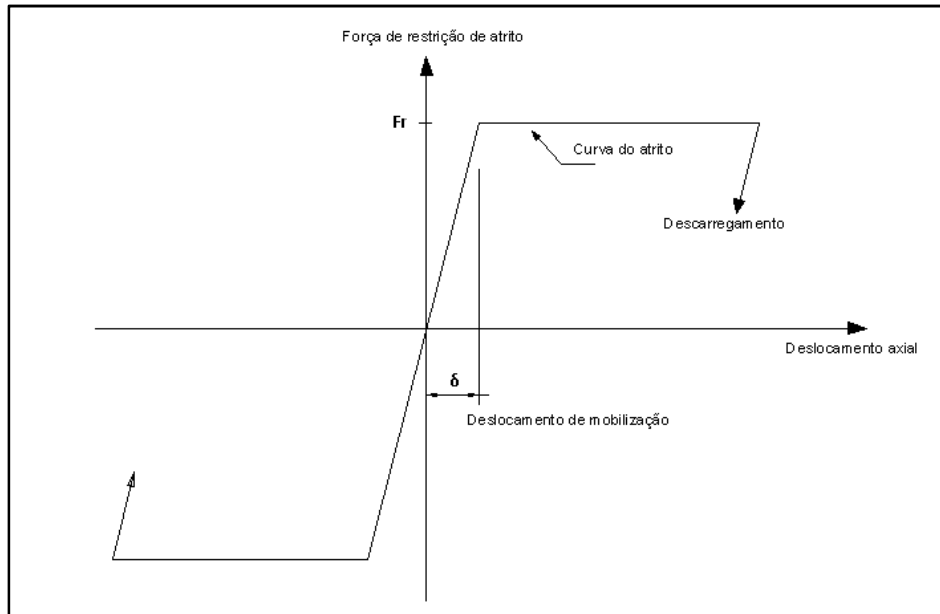


Figura 4.9 – Comportamento do atrito no solo durante carregamento e descarregamento

Para o duto apresentado na Figura 4.10, a força de atrito é definida pela lei de Coulomb:

$$f = \mu \cdot W \quad (4.12)$$

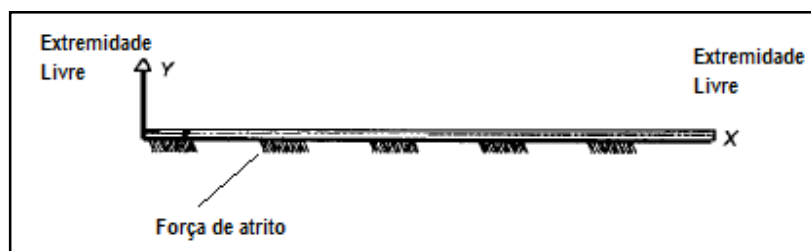


Figura 4.10 – Configuração do duto.

Para o deslocamento de mobilização, foi utilizada a sugestão de BRIDGE *et al.* (2004):

$$\delta = 0,025 \cdot \phi_{ext} \quad (4.13)$$

No modelo de análise, foi assumido que a resistência ao atrito descarrega ao longo de uma linha paralela a porção da curva elástica, até que atinge a força de resistência residual na direção oposta. Assume-se, portanto, que a resistência do solo sobre o duto obedece uma regra isotrópica.

4.3.4. Aplicação das cargas e condição de contorno

A Figura 4.11 mostra uma parte da malha de elementos finitos para um duto rígido com as extremidades livres e os nós dos elementos que representam o contato com o solo engastados.

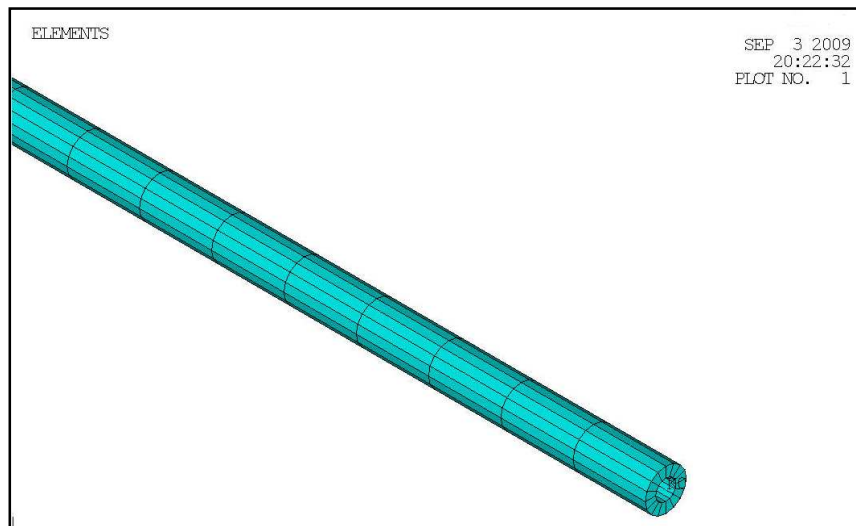


Figura 4.11 – Condição de contorno no duto (propriedades do duto expandidas).

O carregamento térmico foi aplicado em cada nó da estrutura. As temperaturas foram inseridas por meio de tabelas com os valores estimados pela metodologia apresentada no Capítulo 3.

O modelo permite considerar tanto as extremidades do duto inteiramente livres, que simularia, por exemplo, a conexão desse duto rígido com um duto flexível ou, ainda, parcialmente ou totalmente restringidas pela presença de um PLET. Para a restrição parcial, considera-se uma mola de restrição à translação axial semelhante à empregada para representar o atrito solo-duto, porém com força de restrição (F_r , vide Figura 4.9)

bastante superior. A restrição total pode ser feita impedindo totalmente os deslocamentos nessas extremidades.

Na solução de todos os exemplos analisados nessa dissertação, como será indicado no Capítulo 5, foram realizadas análises quasi-estáticas sem se considerar efeitos não lineares geométricos.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Devido à falta de dados mais realistas para os dutos que se propõe a analisar, são assumidas condições hipotéticas nas simulações e os dados apresentados por CARNEIRO *et al.* (2009), referente a um duto rígido a ser instalado na bacia do Espírito Santo. O objetivo será analisar o comportamento estrutural do duto após vários ciclos de aquecimento/resfriamento a partir das formulações apresentadas nos Capítulos 3 e 4. Também será realizada uma análise de sensibilidade considerando diferentes gradientes térmicos e coeficientes de atrito entre o duto e o solo.

5.1. DESCRIÇÃO DO MODELO TÉRMICO E ESTRUTURAL UTILIZADOS

Como exemplo de aplicação da metodologia descrita nos capítulos anteriores, foi considerado um duto rígido de 6.625” de diâmetro interno com 60mm de camada externa isolante de polipropileno (Figura 5.1).



Figura 5.1 – Duto de aço com revestimento externo de polipropileno

O comprimento do duto é de 6km, está localizado a 1500m de profundidade com temperatura da água na locação de 277,15K (4°C) e temperatura de entrada do fluido de 363,15K (90°C).

As propriedades geométricas e termofísicas do duto são fornecidas na Tabela 5.1 e Tabela 5.2 respectivamente, e as propriedades do fluido encontram-se na Tabela 5.3.

Tabela 5.1– Propriedades geométricas do duto.

Notação	Tipo	Configuração do duto	Espessura PP	R _{int} (mm)	R ₂ (mm)	R ₃ (mm)
DUTO	Grau X70	6,625" + 1" + 2,36"	60 mm	84,15	109,55	169,55

Tabela 5.2 – Propriedades termofísicas do duto.

Material	ρ (kg/m³)	C _p (J/kg K)	k (W/mK)	Espessura (mm)
Aço	7700	486	54	25.4
Polipropileno	775	2000	0,17	60

Tabela 5.3 – Propriedades do fluido.

T _{fin} (°C)	vazão mássica (kg/s)	C _p (J/kg K)	ρ (kg/m³)	h ₁ (W/mK)	h _a (W/mK)	U (W/m²K)
90	16,1024	2700	875	100	500	4,47

Para a análise, o modelo térmico foi discretizado em 500 elementos com 12m cada. A carga térmica é aplicada em incrementos de tempo de 18s. Deste modo, o número de Courant para as análises é igual a 1, confirmando uma análise estável como explicado no Capítulo 3.

Para se obter a distribuição de temperatura ao longo da seção transversal do duto em cada um dos pontos da malha térmica elaborada, foram adotadas as divisões radiais ilustradas na Figura 5.2 .A camada de aço com 25,4mm de espessura foi dividida em 3 isotermas concêntricas afastadas de 8,46mm, enquanto a camada de polipropileno, com 60mm de espessura, foi dividida em 10 isotermas concêntricas de 6mm.

Como pode ser observado na Figura 5.2 , a isoterma 1 é a parede interna do duto, ou seja, está em contato com o fluido interno, a isoterma 4 é a parede externa da camada de

aço, sendo a isoterma em contato com o polipropileno. A isoterma 10 se situa na linha média da camada de polipropileno e a isoterma 14 se situa na parede externa do duto, ou seja, está em contato com o fluido externo, a água do mar.

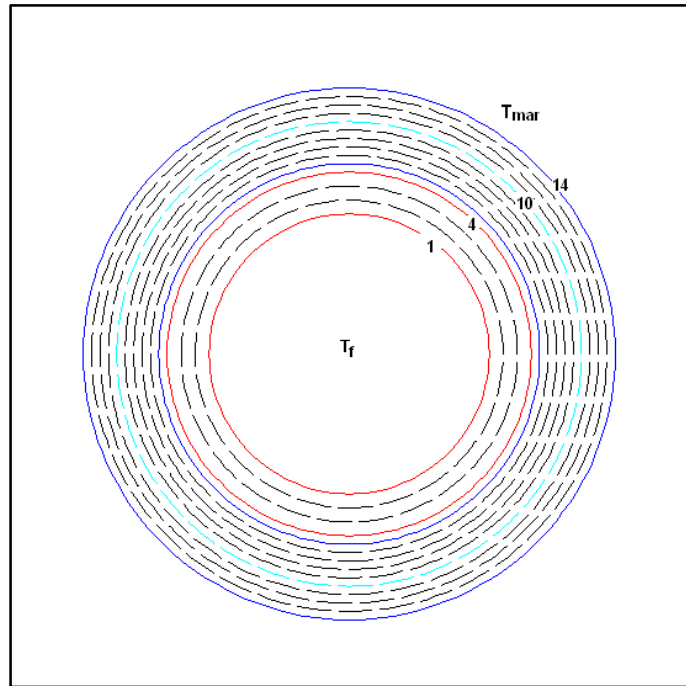


Figura 5.2 – Divisão das camadas do duto para cálculo das temperaturas ao longo de suas seções transversais.

A malha de elementos finitos empregada na análise estrutural possui um comprimento total de 6000m, com 1002 elementos e 1002 nós, sendo 501 elementos finitos de pórtico espacial para a representação do duto e 501 elementos de molas não lineares para a representação do atrito do solo. A malha é análoga à apresentada na Figura 4.11.

Na entrada de dados para análise numérica pelo MEF é necessário calcular o módulo de elasticidade e o coeficiente de dilatação térmica equivalentes do duto, como já explicado no Capítulo 4. Esses valores são apresentados, respectivamente, nas Tabela 5.4 e Tabela 5.5.

Tabela 5.4 – Módulo de elasticidade equivalente.

$E_{aço}$	E_{pp}	$A_{aço}$	A_{pp}
210000 N/mm ²	1100 N/mm ²	15450 mm ²	52590 mm ²
E_{eq}		48535,41 N/mm ²	

Tabela 5.5 – Coeficiente de dilatação térmica equivalente.

$c\alpha_{aço}$	$c\alpha_{pp}$
$1,2 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	$1,0 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
$c\alpha_{eq}$	$1,181 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

O peso do duto submerso, W , é 1756,9N/m. Adotou-se coeficiente de atrito entre o duto e o solo (μ) igual a 0,1 e o diâmetro externo do duto, \emptyset_{ext} , de 339mm. A força de atrito e o coeficiente de mobilização, para esse exemplo, foram respectivamente, 175,69N/m e 84,75mm, de acordo com as Eqs. (4.10) e (4.11).

5.2. ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.2.1. Análise térmica transiente

Em uma primeira análise, adotou-se o tempo de 10 horas para o aquecimento e 15 horas para o tempo de resfriamento, resultando, portanto, para cada ciclo, uma duração de 25 horas. Foram considerados 7 ciclos e verificada a resposta do duto durante esses ciclos.

O primeiro aspecto a ser observado é a temperatura de saída do óleo após o término da fase de bombeio (10 horas) e no reinício do bombeio (25 horas). Essas temperaturas são de 61,6^oC e 28,4^oC, respectivamente, e estão acima da de precipitação de parafina e de formação de hidratos ($T_{hidrato} \approx 25^\circ\text{C}$ de acordo com BAIOCO *et al.*2007). Este aspecto mostra a eficiência do isolamento térmico proposto.

A Figura 5.3 mostra a evolução temporal do aquecimento do duto analisado, bem como a temperatura no estado estacionário. Essa figura mostra que o fluido inicialmente tem sua temperatura bruscamente reduzida em função da baixa temperatura do duto, mas vai progressivamente aumentando. O fluido atinge a extremidade final do duto após

aproximadamente 3 horas de bombeio e o regime estacionário se estabelece após aproximadamente 10 horas de bombeio.

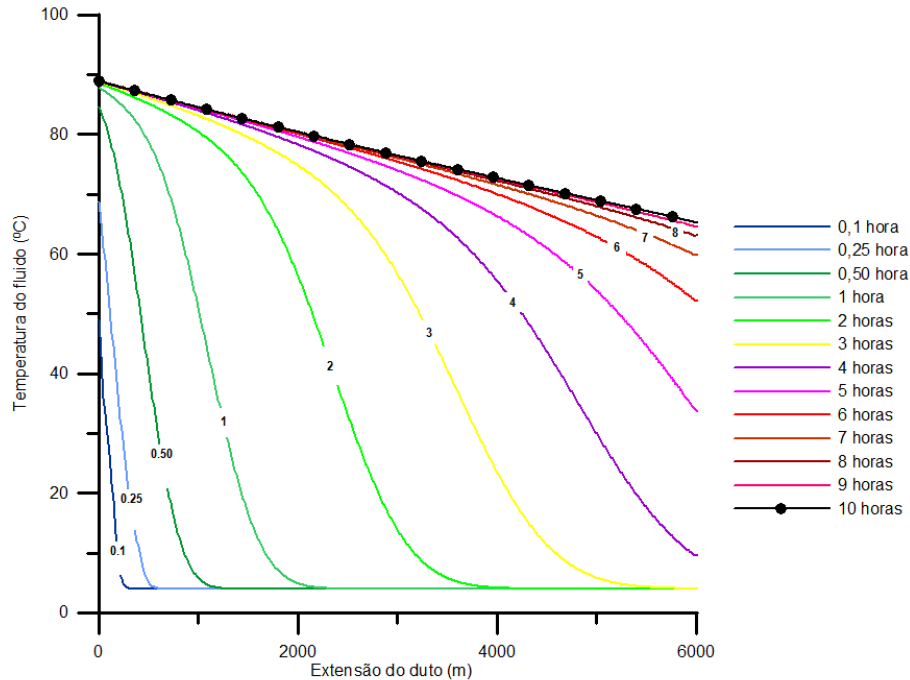


Figura 5.3 – Variação da temperatura do fluido interno ao longo do duto em diferentes instantes de tempo.

A Figura 5.4 ilustra a variação de temperatura nas camadas da última seção do duto em função do tempo. Pode-se observar, nesse gráfico, que a temperatura na isoterma 1 é bem próxima da isoterma 4, pois o aço é excelente condutor de calor. Já na isoterma 10, a temperatura cai bruscamente e na isoterma 14 a temperatura está quase igual à temperatura da água do mar. Deste modo, confirma-se a eficiência do polipropileno como isolante térmico. O fluido, portanto, teve uma queda pequena de temperatura ao longo do tempo quando se atinge o estado estacionário, evitando assim a formação de hidratos e parafinas na fase de bombeio.

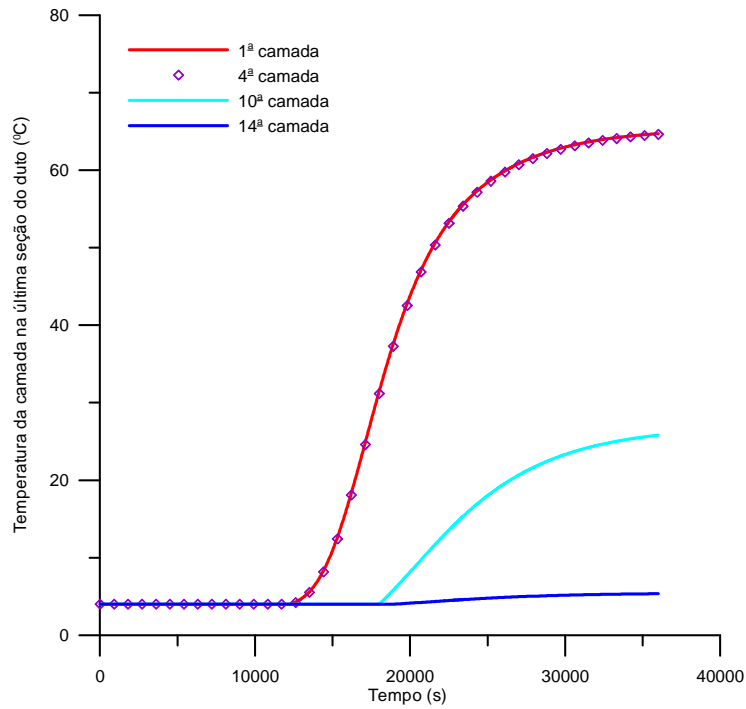


Figura 5.4 – Temperatura nas camadas da última seção do duto em função do tempo.

Outro aspecto, não menos importante, a ser observado é o decaimento da temperatura ao longo do tempo durante a parada de bombeio por 15 horas. Esse decaimento é mostrado na Figura 5.5.

No gráfico da Figura 5.5 observa-se que a temperatura do fluido ao longo do duto vai caindo linearmente com o tempo. Após 15 horas a temperatura do fluido se encontra a $28,4^{\circ}\text{C}$, temperatura essa crítica para o começo de formação de parafina.

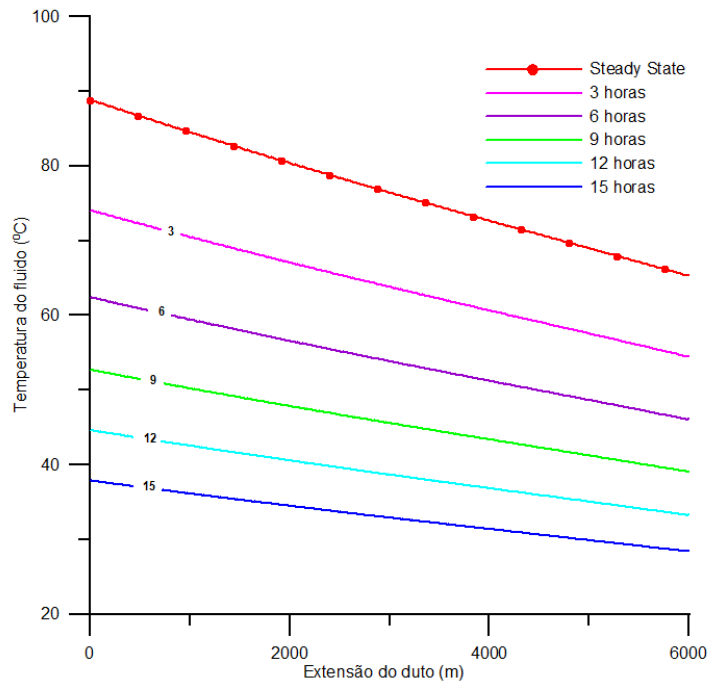


Figura 5.5 – Temperatura durante a parada de bombeio.

5.2.2. Análise Estrutural

5.2.2.1. Primeiro Ciclo

A Figura 5.6 mostra os deslocamentos axiais ao longo do duto ao término do primeiro ciclo. As Figura 5.7 e Figura 5.8 mostram a força axial efetiva desenvolvida após o primeiro ciclo de aquecimento/resfriamento do duto, respectivamente.

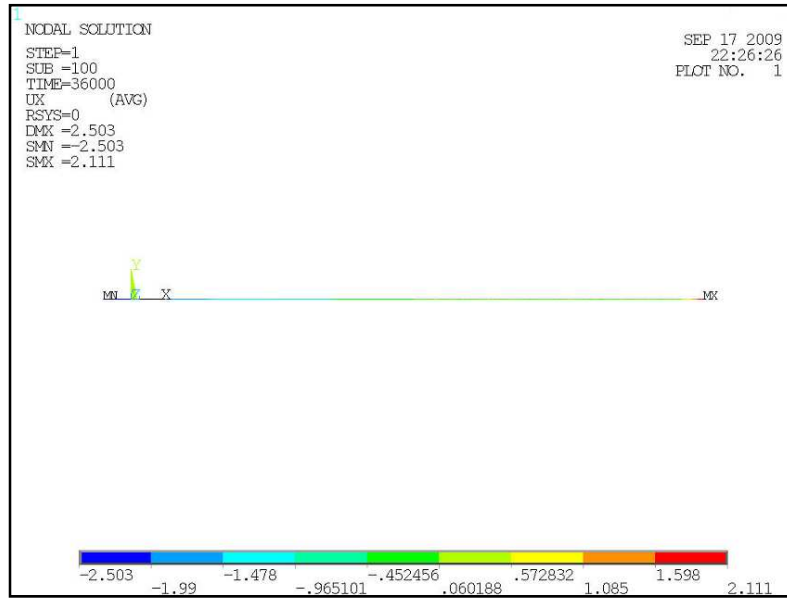


Figura 5.6 – Distribuição dos deslocamentos axiais ao longo do duto ao término do primeiro ciclo.

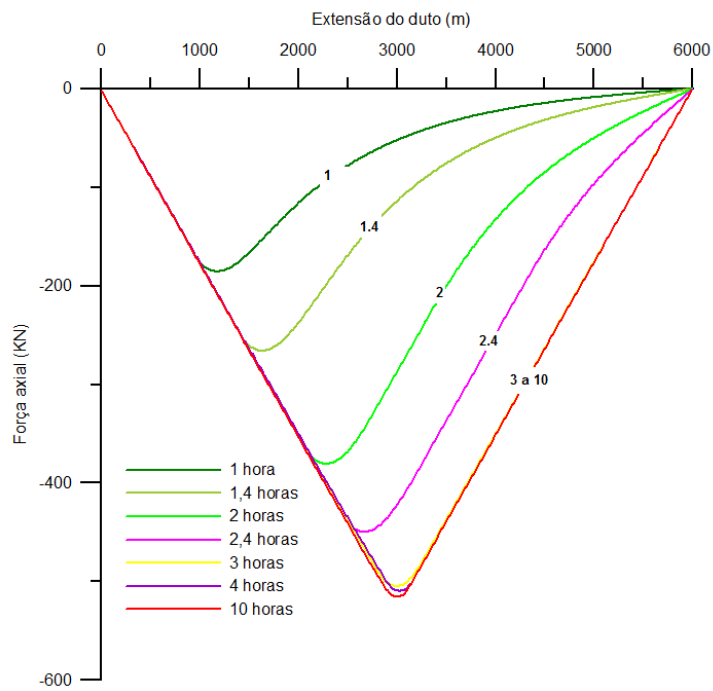


Figura 5.7 – Força axial efetiva ao longo do duto para o aquecimento no primeiro ciclo.

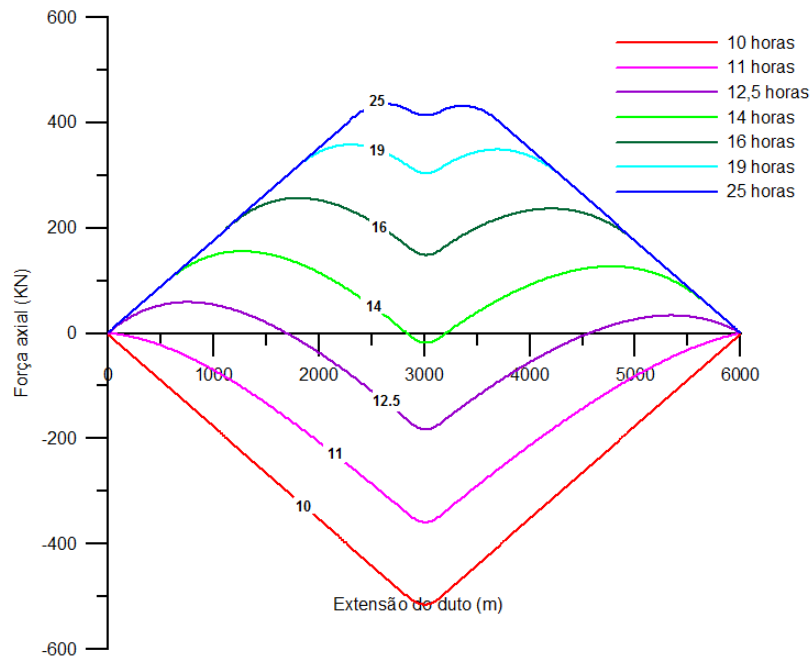


Figura 5.8 – Força axial efetiva ao longo do duto para o resfriamento no primeiro ciclo.

Quando o duto é aquecido, a força axial vai crescendo ao longo da sua extensão até o duto ficar completamente mobilizado pela temperatura, que para este exemplo foi após 3 horas (linha amarela - Figura 5.3). Após esse tempo, é formada uma “âncora virtual” (pico máximo da força axial) no meio do duto, que se expande em direção a ponta quente e a ponta fria.

Embora a expansão do duto continue, não há mais alteração no perfil de força até as 10 horas de bombeio como pode ser observado na Figura 5.7.

Quando o duto esfria, a contração se dá a uma taxa uniforme ao longo de toda sua extensão e a partir do pico central, como pode ser observado na Figura 5.8.

Portanto, o resfriamento uniforme do duto, que ocorre após a parada de bombeio, leva a força de atrito a reverter, em resposta à contração do duto, e a força de compressão observada torna-se uma força de tração efetiva, que vai se alterando a partir da âncora virtual.

O efeito do carregamento térmico no movimento do duto pode ser entendido pela consideração de um deslocamento axial cumulativo através de cada incremento de tempo.

A Figura 5.9 apresenta o gráfico desse deslocamento pela extensão do duto durante o primeiro ciclo de aquecimento.

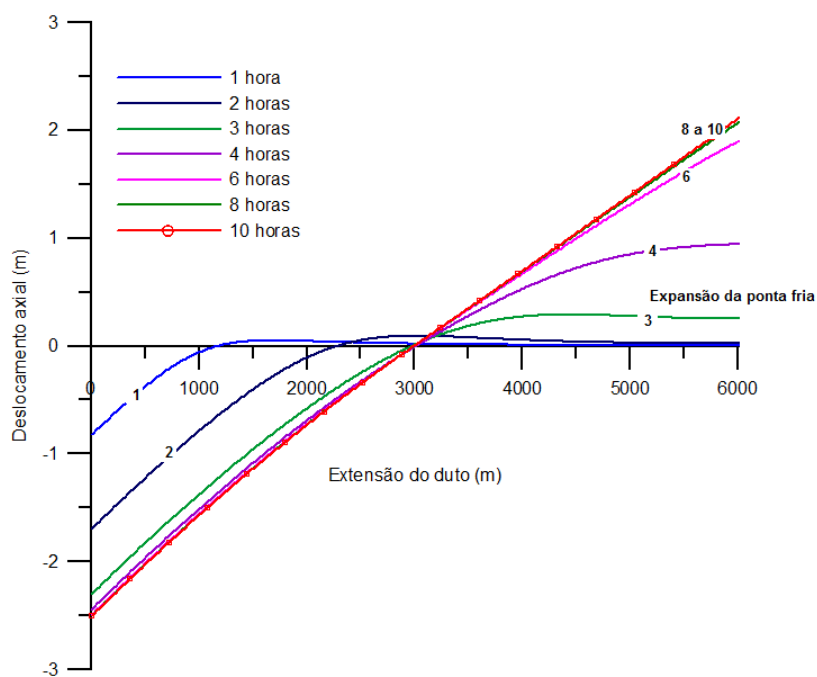


Figura 5.9 – Expansão do duto durante o aquecimento – primeiro ciclo.

Com o aquecimento do duto, uma expansão não uniforme é evidente. A região do duto próxima à extremidade quente tende a se expandir na direção dessa extremidade, enquanto que o restante do duto se move para a extremidade fria (linha azul do gráfico da Figura 5.9). Com o aquecimento contínuo do duto, o deslocamento aumenta e se mantém nulo apenas no centro do duto quando este se torna completamente mobilizado. A partir daí as expansões subseqüentes são centradas nesse ponto.

A partir da completa mobilização do duto, isto é, quando o fluido percorre toda sua extensão, a extremidade fria começa a se expandir com o aumento contínuo da temperatura (linha verde do gráfico da Figura 5.9). Neste exemplo, em particular, a expansão final foi de 2,50m.

Por outro lado, quando o duto esfria de uma maneira uniforme, o duto descarrega simetricamente sobre seu centro. O deslocamento axial durante o descarregamento pode ser observado na Figura 5.10.

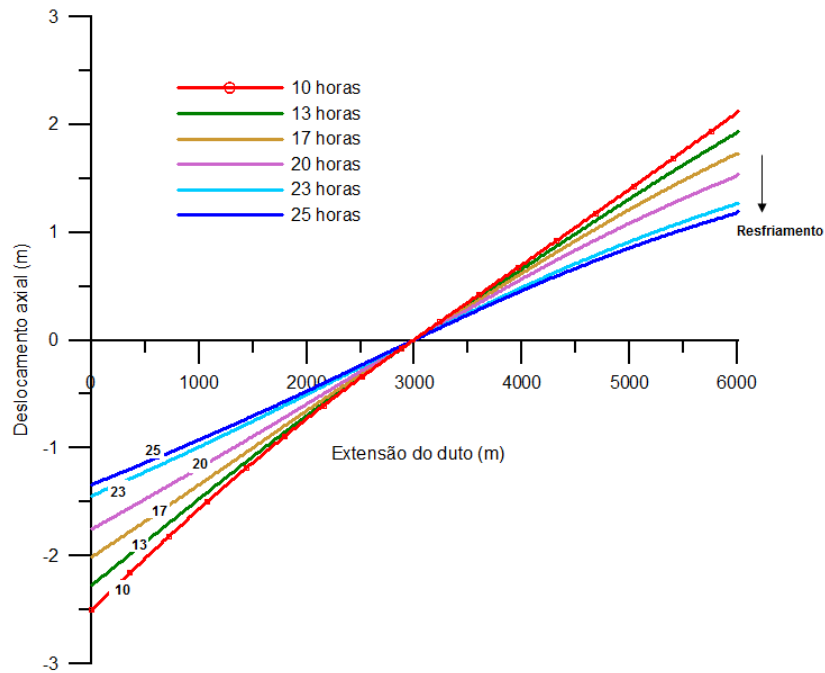


Figura 5.10 – Contração do duto durante o resfriamento – primeiro ciclo.

5.2.2.2. Segundo e demais ciclos

A partir do segundo ciclo, a força no duto crescerá de uma maneira diferente da apresentada na Figura 5.8 devido à força axial residual no duto após o resfriamento do final do primeiro ciclo, como demonstrado na Figura 5.11. Isto se deve ao fato de que o duto não volta mais ao seu tamanho de origem devido à restrição causada pelo atrito.

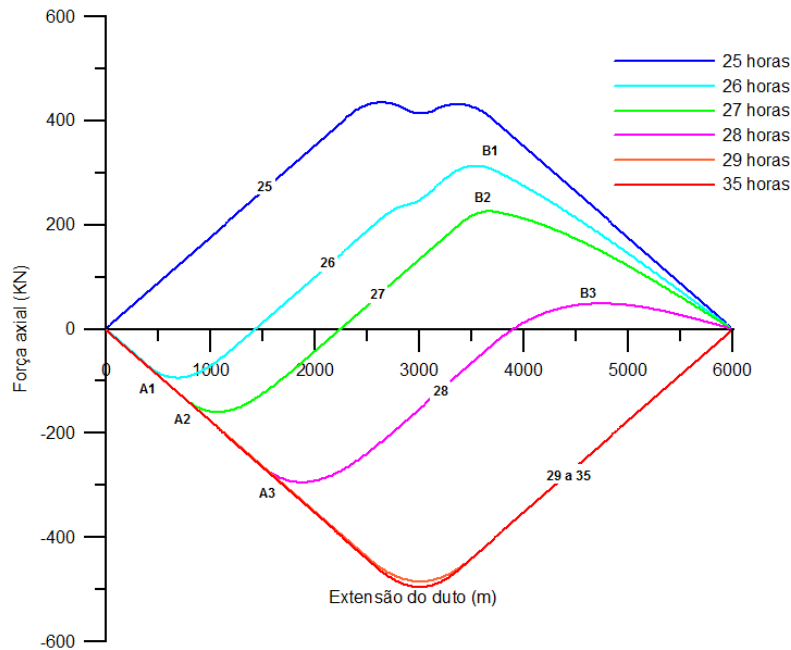


Figura 5.11 – Força axial efetiva no duto – segundo ciclo de aquecimento.

No início do aquecimento do segundo ciclo, o duto encontra-se tracionado e com o aquecimento, o duto começa a se expandir a partir da ponta quente formando uma âncora (A1) e essa expansão ocorre na direção da ponta quente entre 0 e A1. A fim de manter o equilíbrio de força, uma segunda âncora (B1) ocorre na outra extremidade. Com o aquecimento do duto, a localização dessas âncoras vai se alterando em direção ao ponto médio do duto, onde ocorre o seu pico máximo.

Após a formação da âncora virtual na seção central do duto, não há mais alteração das forças axiais em sua extensão.

Quando o duto esfria ao longo do seu comprimento, ele não consegue mais voltar ao seu comprimento original, permanecendo com um deslocamento acumulado. Quando o duto é re-aquecido, o processo começa novamente, só que agora com as novas configurações do duto. A Figura 5.12 mostra o segundo ciclo de aquecimento do duto e a Figura 5.13 o segundo ciclo de esfriamento.

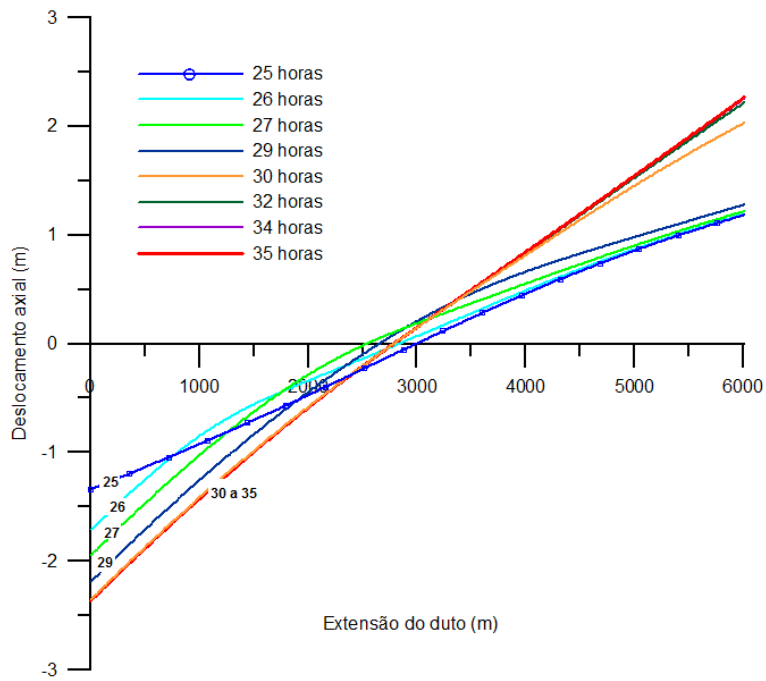


Figura 5.12 – Gráfico do deslocamento durante o aquecimento do segundo ciclo.

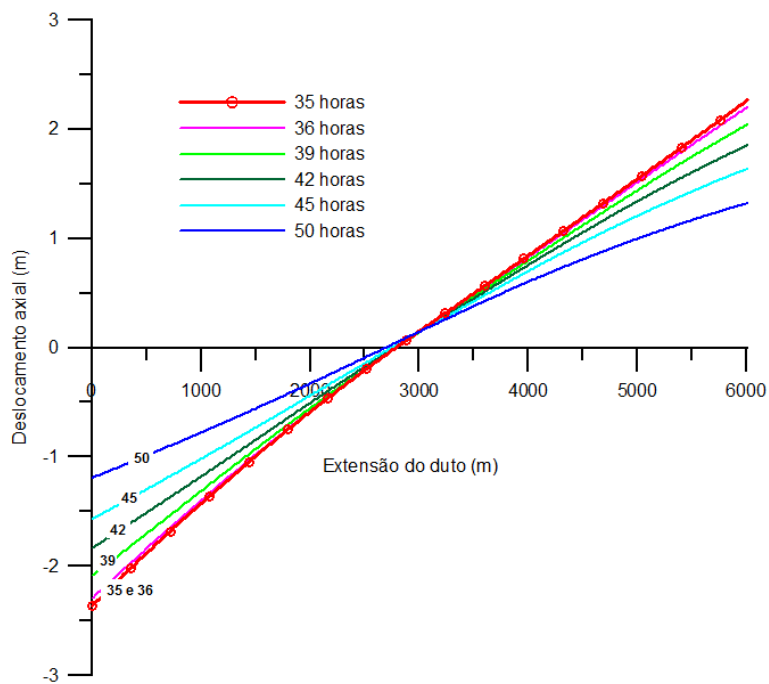


Figura 5.13 – Gráfico do deslocamento durante o desaquecimento no segundo ciclo.

Assim, a cada ciclo o duto “caminha” na direção da extremidade fria. Esse é o fenômeno do *walking*.

A Figura 5.14, mostra como o ponto central e as extremidades do duto se expandem e contraem com as mudanças de temperatura através do perfil de aquecimento e resfriamento. Isso mostra claramente como os ciclos repeditos levam à deformação do duto.

Na Tabela 5.6 encontram-se os valores do *walking* no ponto médio do duto na qual se pode verificar que o valor do *walking* é fixo em todos os ciclos.

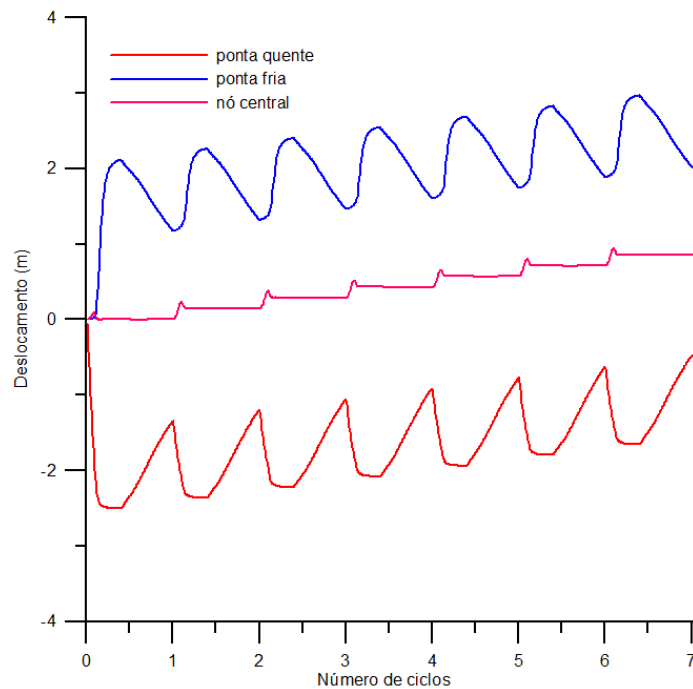


Figura 5.14 – Histórico do deslocamento após sete ciclos de aquecimento/resfriamento.

Tabela 5.6 – Valor do *walking* no ponto médio do duto de 6km de extensão.

<i>Walking</i> - Ponto médio		
ciclos	desl (m)	desl acumulado (mm)
1	0,0027	-
2	0,15	146
3	0,29	146
4	0,43	146
5	0,57	146
6	0,71	146
7	0,85	146

5.2.2.3. Estudo de Sensibilidade

Coeficiente de atrito entre solo/duto

A análise de sensibilidade do efeito da força de atrito no duto também foi estudada, mantendo o deslocamento de mobilização de 84,75 mm, como já explicado no item 5.3.

A Figura 5.15 mostra a variação do *walking* como uma função do coeficiente de atrito considerado ou, indiretamente, da força de atrito assumida entre o duto e o solo. Nela, pode-se observar que para uma elevada força de atrito o deslocamento acumulado vai diminuindo, devido à restrição imposta pelo atrito. O valor do *walking* também é baixo para um baixo coeficiente de atrito, porque o duto torna-se completamente mobilizado antes que o transiente térmico tenha percorrido todo o duto.

O pico do *walking*, no exemplo considerado, ocorre para o coeficiente de atrito igual a 0,1. CARR et al. (2006) previram comportamento semelhante, o que corrobora os resultados aqui encontrados.

Observa-se através da Figura 5.16 e da Tabela 5.7 o comportamento do *walking* com a variação do coeficiente de atrito. Até o coeficiente 0,1 o *walking* teve um acréscimo no deslocamento. A partir desse ponto, portanto, houve uma redução cada vez que o atrito aumentava.

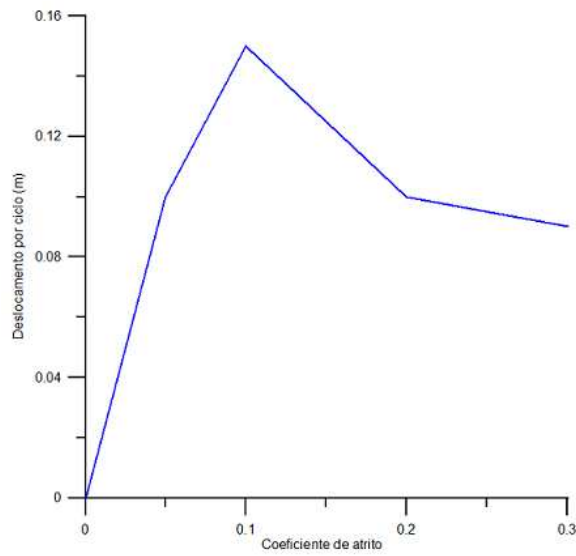


Figura 5.15 – Deslocamento por ciclo com variação do coeficiente de atrito para a temperatura do fluido de entrada de 90°C.

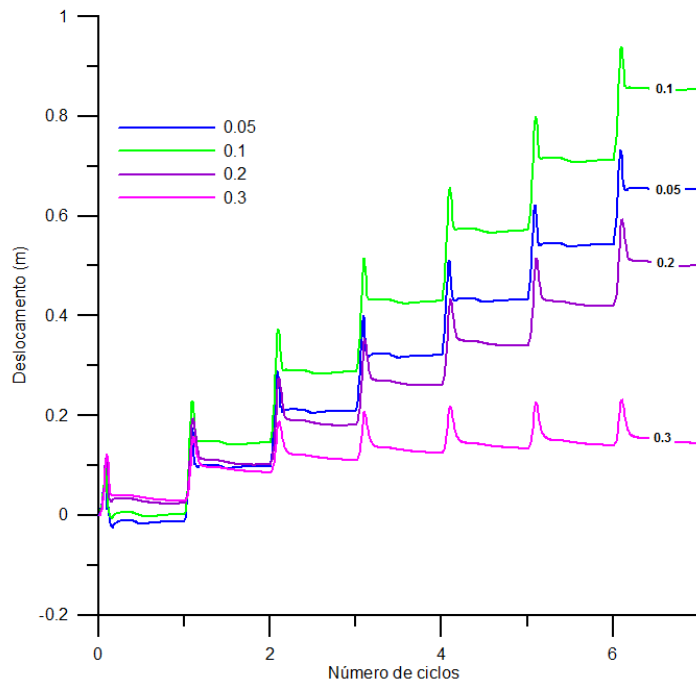


Figura 5.16 – Comparação do comportamento do *walking* com a variação do coeficiente de atrito.

Tabela 5.7 – Valores do *walking por ciclo* de carregamento para diferentes coeficientes de atrito.

	Coeficiente de atrito			
	0,05	0,1	0,2	0,3
Temperatura 90°C	99mm	146mm	102mm	86,3mm

A variação do coeficiente de atrito pode ser observada também nos gráficos da força axial. Nas Figura 5.17 a Figura 5.20 que representam a variação da força axial para o coeficiente de atrito 0,2, momento em que o *walking* começa a diminuir, observa-se que houve um aumento significativo no valor dessa força, devida à maior restrição de deslocamento do duto, porém, a partir do segundo ciclo não há mais um pico acentuado no centro do duto, ou seja, como a força de atrito está começando a se aproximar do valor do peso submerso do duto, está ocorrendo uma maior resistência para que o duto consiga se mover, impedindo, aos poucos, a contração e expansão do duto. Isso irá ocorrendo até que a força de atrito supere a força imposta pelo carregamento térmico, e assim, este não conseguirá mais se movimentar.

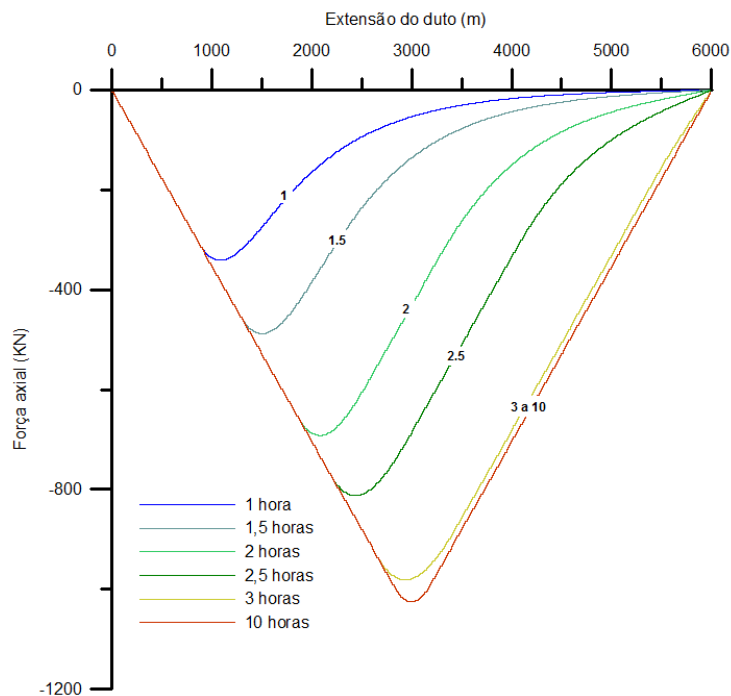


Figura 5.17 – Força axial durante o aquecimento no primeiro ciclo: coeficiente de atrito igual a 0.2.

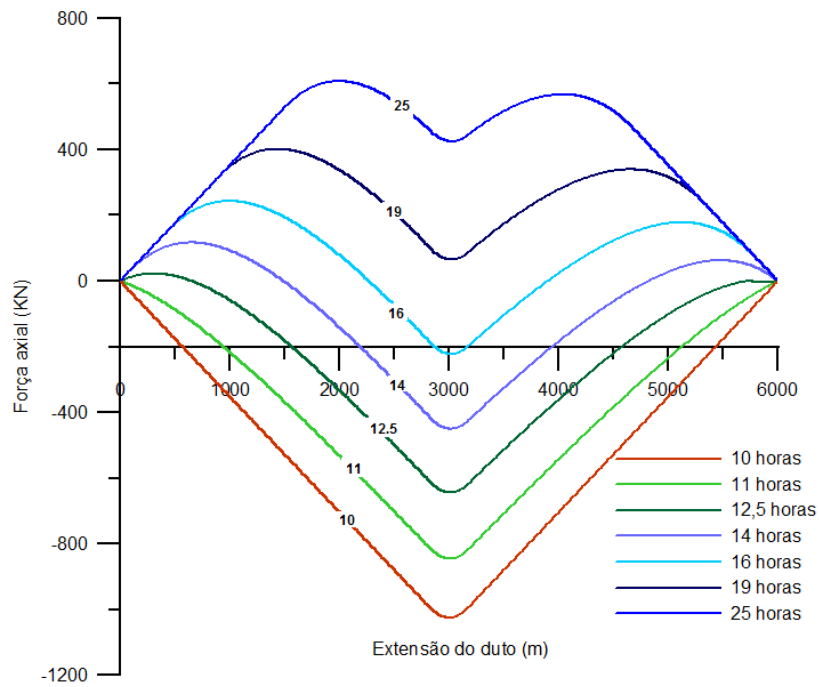


Figura 5.18 – Força axial durante o resfriamento no primeiro ciclo: coeficiente de atrito igual a 0.2.

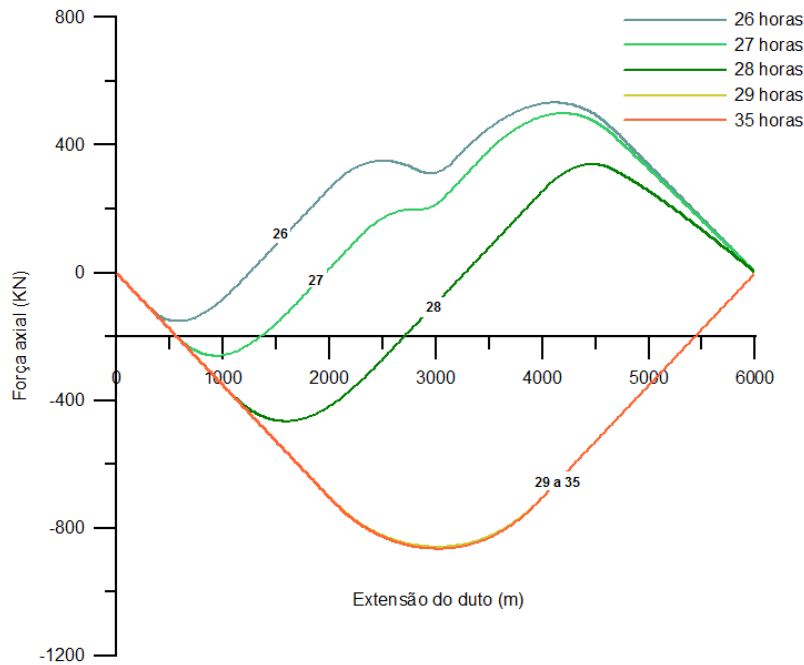


Figura 5.19 – Força axial durante o aquecimento no segundo ciclo: coeficiente de atrito igual a 0.2.

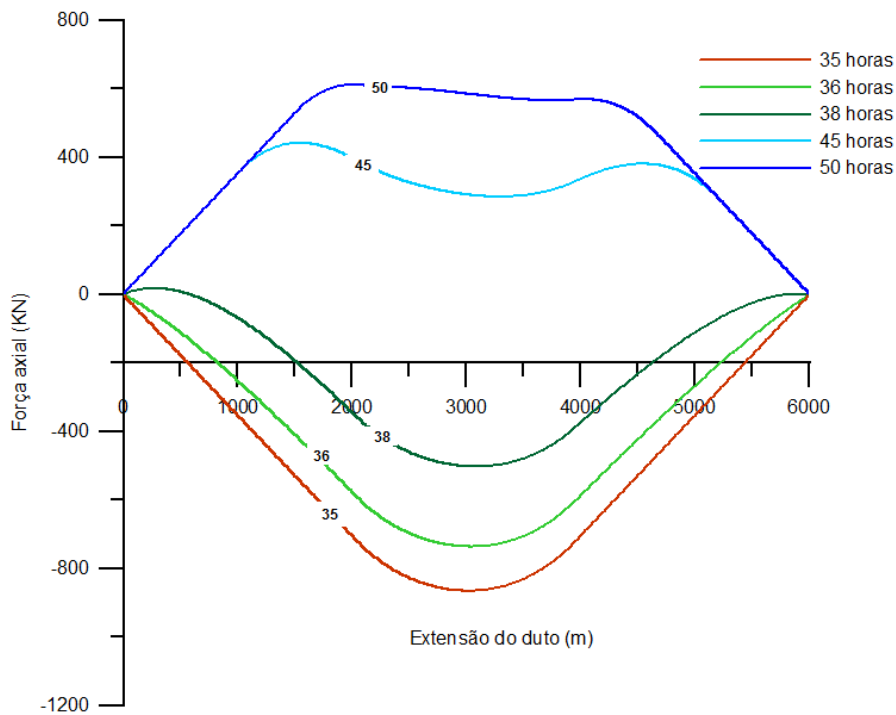


Figura 5.20 – Força axial durante o resfriamento no segundo ciclo: coeficiente de atrito igual a 0.2.

Efeito do Gradiente Térmico

O gradiente térmico aplicado no duto tem um efeito significativo no comportamento do *walking*. Para ilustrar esse comportamento, foram analisadas três condições de carregamento térmico com a temperatura de entrada no duto assumindo os valores de 90°C, 72°C e 60°C. Todas as demais características do duto e do fluido foram mantidas.

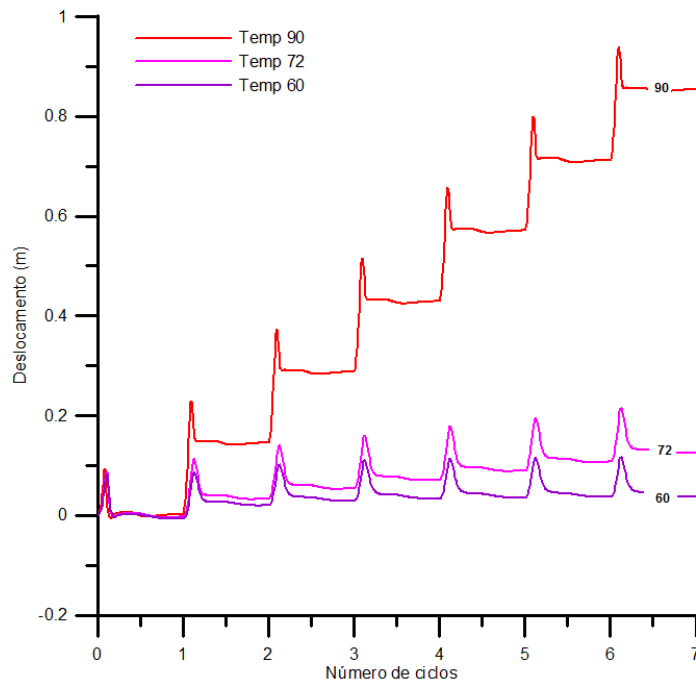


Figura 5.21 – *Walking* devido ao efeito do gradiente térmico ($\mu = 0,1$).

A Figura 5.21 e a Tabela 5.8 mostra o comportamento do *walking* com essas diferentes temperaturas durante sete ciclos. Pode-se observar que o *walking* máximo ocorre para a temperatura de 90°C. Com a diminuição da temperatura, o *walking* vai reduzindo também, pois o carregamento térmico vai diminuindo significativamente. Deve-se salientar que a redução em 33% da temperatura de entrada do óleo diminuiu em 73% o deslocamento por ciclo de carga e descarga.

Tabela 5.8 – *Walking* por ciclo para diferentes gradientes térmicos.

Temperatura	Coeficiente de atrito 0.1
60°C	40mm
72°C	60mm
90°C	146mm

Efeito da mola nas extremidades do duto

No modelo analisado nesse item, as extremidades do duto estão conectadas a uma mola (Modelo A), representando um possível PLET.

Para representar essa mola (Figura 5.22), foi suposto que o seu deslocamento axial seria metade do valor que o duto se deslocaria se possuísse a extremidade livre (Modelo B). Já a reação da mola, será considerada metade da reação que o duto teria se este estivesse engastado nas duas extremidades (Modelo C).

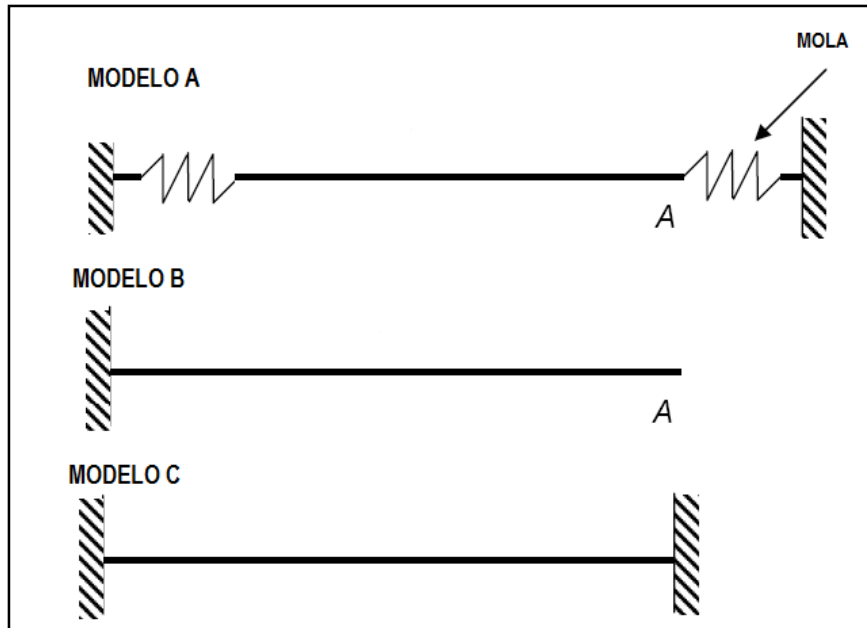


Figura 5.22 – Representações do duto para consideração da mola de extremidade.

Assim, a curva força-deslocamento encontrada para a mola representativa do PLET é a apresentada na Tabela 5.9.

Tabela 5.9 – Relação força-deslocamento da mola axial.

Raxial (KN/m)	u (m)
-4881	-30
-4881	-17,7
0	0
4881	17,7
4881	30

Analisando a Figura 5.23 pode-se observar que a mola tem uma grande influência no deslocamento do duto após a aplicação do carregamento térmico. A força axial máxima nas extremidades do duto durante o aquecimento será o valor da força de reação da mola.

Já no desaquecimento, a força não varia uniformemente, já que além do atrito do solo, a mola da extremidade, também ajuda a impedir o duto de se contrair.

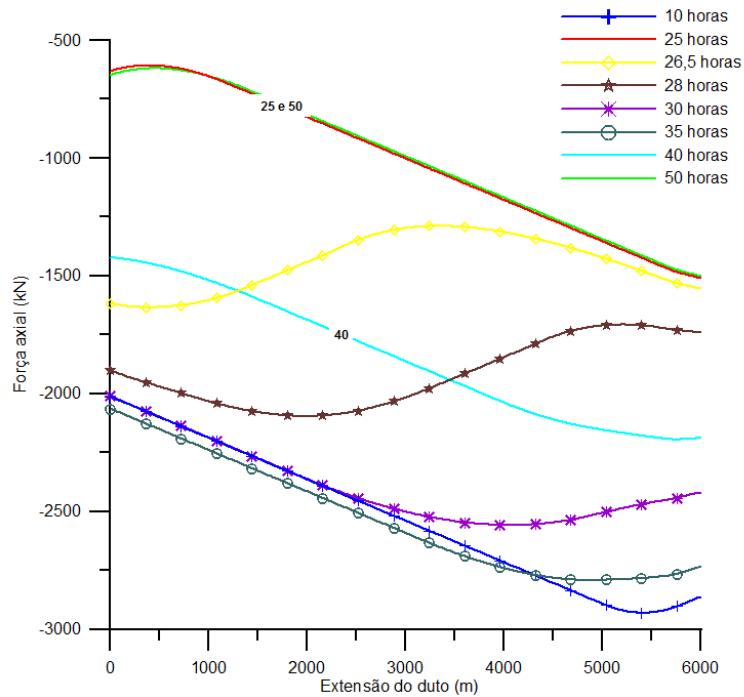


Figura 5.23 – Força axial de aquecimento e resfriamento do duto durante os dois primeiros ciclos.

Isso, portanto, também influencia no valor do *walking* (Tabela 5.10), que vai diminuindo a cada ciclo de carregamento, até chegar a um ponto em que não há mais variação (Figura 5.24). Nessa análise foram considerados 7 ciclos para avaliar esse comportamento. A Tabela 5.10 apresenta os valores por ciclo.

Deste modo, conclui-se que a presença de uma mola de extremidade representando o PLET aumenta significativamente o esforço axial no duto, porém tende a dirimir os deslocamentos axiais cumulativos por ciclo, ou seja, o *walking*.

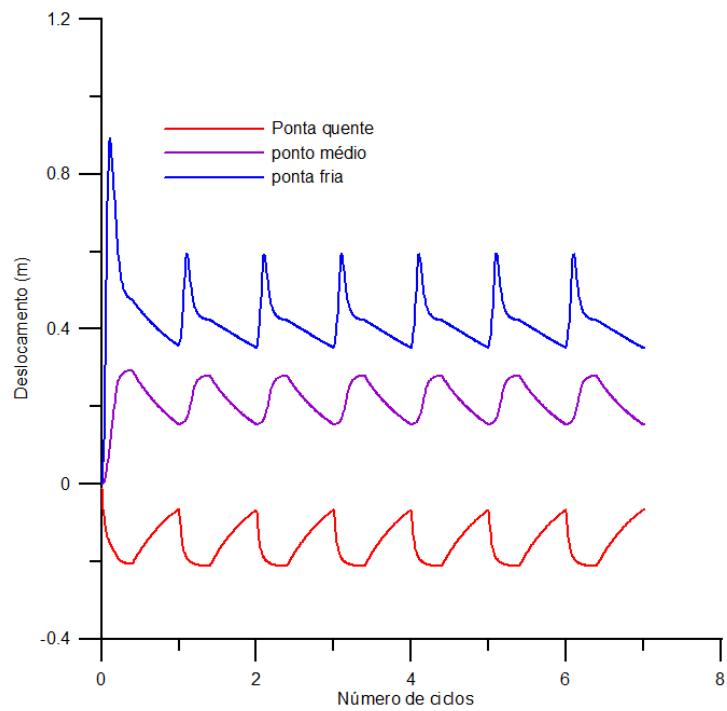


Figura 5.24 – *Walking* no duto com molas nas extremidades.

Tabela 5.10 – *Walking* por ciclo de carregamento.

Ciclos	Ponta fria	Ponta quente	Ponto médio
1	-	-	-
2	1mm	1,70mm	6mm
3	1mm	0,60mm	0,0mm
4	1mm	0,59mm	0,0mm
5	1mm	0,59mm	0,0mm
6	1mm	0,59mm	0,0mm
7	1mm	0,0mm	0,0mm

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1. CONCLUSÕES FINAIS

Nessa dissertação, foi desenvolvida uma ferramenta numérica para análise de transferência de calor no regime transiente de escoamento em dutos empregados na produção de hidrocarbonetos em águas profundas e ultra profundas.

Como aplicação dessa ferramenta, um típico duto rígido foi estudado considerando diferentes condições para o óleo transportado. Foram observadas as temperaturas ao longo da estrutura e essas temperaturas foram levadas a um modelo para análise estrutural baseado no Método dos Elementos Finitos (MEF). Diferentes parâmetros de análise, tais como o gradiente térmico e o atrito entre o duto e o solo, foram variados para uma melhor compreensão do comportamento do duto nessas condições.

Os resultados obtidos mostraram que ciclos de aquecimento/resfriamento no duto, expandindo-o e contraindo-o, respectivamente, influenciam significativamente na sua configuração inicial, aumentando seu comprimento e acarretando esforços axiais residuais em toda sua extensão. Esse deslocamento acumulado é conhecido como *walking* e pode comprometer estruturalmente o duto.

Pode-se observar nas análises, a formação de uma âncora virtual devido ao aquecimento do duto, mostrando que, com o aquecimento, o duto tende a se expandir gerando uma força de compressão em toda sua extensão. Essa força tem um pico, a âncora virtual, que, no caso das extremidades livres do duto, é formada no seu centro. Com o resfriamento, essa força de compressão vai diminuindo até se tornar uma força de tração, já que o duto está se contraindo com a diminuição da temperatura. Essa mudança de força ocorre do centro para as extremidades do duto.

Outra observação, não menos importante, diz respeito à variação do coeficiente de atrito. Se o coeficiente de atrito for muito alto, a força de atrito fica maior que a força térmica, logo o *walking* não ocorre. Por outro lado, se o coeficiente de atrito for muito baixo ou mesmo nulo, o duto se mobilizará muito rápido e o *walking* será pequeno ou até, no caso de atrito nulo, não ocorrerá. Por outro lado, verificou-se que existe um valor “ótimo” de atrito que maximiza o fenômeno de *walking*. Para o caso analisado, esse valor foi de aproximadamente 0,1.

A variação do gradiente térmico também contribui com o *walking*, ou seja, quanto maior a temperatura de operação, maior será a força térmica e maior o deslocamento causado por ela. No exemplo dessa dissertação, o *walking* do duto para um fluxo com temperatura de entrada de 90°C é muito maior do que para as temperaturas de 72°C e 60°C. Por exemplo, o deslocamento axial acumulado por ciclo com temperatura de 90°C é, aproximadamente, 3 vezes superior ao calculado para a temperatura de 60°C.

Nas análises feitas considerando uma mola nas extremidades do duto, representando um possível PLET, pôde-se observar que isso afeta significativamente o *walking*. Isso se deve ao fato de que, quando o duto se expande, a mola cria uma força contrária tentando “empurrar” o duto. Já quando o duto se contrai, durante o resfriamento, a mola tenta “puxá-lo”. Logo, a âncora virtual não forma-se no centro do duto e vai variando à medida que a força vai aumentando ou diminuindo de acordo com o aquecimento ou resfriamento do duto.

O problema do *walking* poderia ser reduzido pelo aquecimento mais gradual do duto com o objetivo de controlar a inclinação do perfil do transiente térmico. No entanto, isto muitas vezes não é possível por razões operacionais e a relutância em estender o tempo de recuperação da parada de produção.

Outra maneira de controlar o *walking* nos dutos seria instalando âncoras no final da extensão do duto, mas as cargas podem ser tão altas quanto a força de atrito axial ao longo de todo o comprimento do duto. Esse carregamento, portanto, seria reduzido por uma âncora no meio do comprimento do duto, mas o projeto e a instalação dessas âncoras pode se tornar um desafio.

6.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

De acordo com as conclusões apresentadas acima, pode-se sugerir algumas recomendações para trabalhos futuros:

- 1) Considerar, nas análises, as pressões interna e externa atuando em conjunto com o transiente térmico.
- 2) Complementar o estudo paramétrico com a variação do deslocamento de mobilização do atrito entre o duto e o solo.
- 3) Fazer análises mais aprofundadas considerando a presença do PLET. Essa estrutura pode ser representada através de uma mola não linear, como nessa dissertação, mas sua rigidez poderia ser melhor avaliada.
- 4) Fazer o estudo com um duto longo e verificar o comportamento da força axial e da tensão acumulada após vários ciclos de aquecimento/resfriamento.
- 5) Fazer o estudo com um *pipe-in-pipe* com outros tipos de isolamento térmico, como o poliuretano e o aerogel, por exemplo.
- 6) Fazer um modelo pelo MEF com mais de uma camada e estudar a influência da aderência entre as camadas após a aplicação do carregamento térmico.
- 7) Realizar estudos verificando a interação entre o fenômeno de *walking* e outros mecanismos como a flambagem lateral do duto.
- 8) Estudar formas de prevenção do fenômeno de *walking* tal como a ancoragem do duto através de estacas torpedo.
- 9) Realizar análises numéricas pelo MEF, adicionando-se ao duto conectores e/ou âncoras com o objetivo de controlar o *walking* após o carregamento térmico transiente.
- 10) Realizar um estudo com o duto parcialmente enterrado, considerando a condutividade térmica do solo diferente.

CAPÍTULO 7

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

API 5L, 2000, *Specification for Line Pipe*, Forty Second Edition, Washington, American Petroleum Institute.

API RP 17B, 1998, *Recommended Practice for Flexible Pipe*, 2nd ed., Washington, American Petroleum Institute.

ANSYS, 2007, *ANSYS Reference Manual (Version 11.0)*, ANSYS, Inc.

ARKEMA, 2008, *Rilsan® PA11: Created from a renewable source*. Colombes, França.

ASPEN AEROGELS™, NANOTECHNOLOGY AT WORK™, 2006. EUA/Canadá.
Disponível em <<http://www.aerogel.com>> consultado em 8 de Maio de 2009.

ASPEN AEROGELS™, NANOTECHNOLOGY AT WORK™, 2007. EUA/Canadá.
Disponível em <<http://www.aerogel.com>> consultado em 8 de Maio de 2009.

ASPEN AEROGELS™, NANOTECHNOLOGY AT WORK™, 2008. EUA/Canadá.
Disponível em <<http://www.aerogel.com>> consultado em 8 de Maio de 2009.

ATOFINA, 2008, *The Power of Polyamide Industry: Rilsan® Polyamide Resins*. Philadelphia, PA – USA.

BAI, Y., 2001. *“Pipelines and Risers”*. Elsevier, Amsterdam. 2001.

- BAIOCO, J. S., SANTAREM, C. A., BONE, R. B., FERREIRA, V. J. M., 2007. “*Custos e Benefícios Econômicos de Tecnologias de Transporte de Gás Natural no Brasil*”. 4^o PDPETRO, Campinas, SP.
- BARLTROP, N. D. P., 1998. “*Floating Structures: A Guide for Design and Analysis*”. Volume 2, Oilfield Publications Ltd., Herefordshire, UK (1998).
- BOKAIAN, A., 2004. “*Thermal Expansion of Pipe-in-Pipe Systems*”. Marine Structures, V.17, n.6, pp. 475 – 500, October, 2004.
- BORDALO, S. N.. OLIVEIRA. R.C., 2007. “*Escoamento Bifásico Óleo-água com Precipitação de Parafinas em Dutos Submarinos de Produção de Petróleo*”. 4^o PDPETRO. Unicamp, Campinas, SP.
- BREDEROSHAW, disponível em <<http://www.brederoshaw.com>> consultado em 02 de junho de 2009.
- BRIDGE, C., LAVER, K., 2004. “*Steel Catenary Riser Touchdown Point Vertical Interaction Models*”. Offshore Technology Conference OTC16628, Texas, USA, May.
- C. VIPULANANDAN, SUJAN P. KULKARNI, 2007. “*Shear Bonding and Thermal Properties of Particle-Filled Polymer Grout for Pipe-in-Pipe Application*”. J. Mat. in Civ. Engrg., Volume 19, Issue 7, pp. 583-590, July.
- CARR, M., BRUTON, D., LESLIE, D., 2003. “*Lateral Buckling and pipeline walking, a challenge for hot pipelines*”. Offshore Pipeline Technology Conference, Amsterdam, 2003.

- CARR, M., SINCLAIR, F., BRUTON, D., 2006. *"Pipeline Walking – Understanding the Field Layout Challenges, and Analytical Solutions Developed for the SAFEBUCK JIP"*. OTC 17945, Houston, Texas, USA, May 2006.
- CARNEIRO, D., GOUVEIA, J., PARRILHA, R., OAZEN, E., TARDELLI, L., CARDOSO, C., 2009. "Design Small Diameter HT/HP Sour Service Reeled Rigid Pipelines". Rio Pipeline 2009, IBP1377_09, Rio de Janeiro, Brazil, September 2009.
- CEBECI, T., 1984, "Convective Heat Transfer". Ed. Springer, 2nd. Revised edition, New York, USA.
- CERQUEIRA, D. R., SU. J., ESTEFEN, S. F., 2004. *"Simulation of Transient Heat Transfer of Sandwich Pipes with Active Electrical Heating"*. In: Proceedings of 23th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, OMAE2004-51233, Vancouver, Canada, June.
- COSTA, C.H.O., 2003. *"Correlação analítico-experimental de risers flexíveis submetidos a cargas radiais"*, Tese de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro , RJ, Brasil, 2003.
- COURANT, R., FRIEDRICHS, K. e LEWY, H., 1967. "On the partial difference equations of mathematical physics". IBM Journal, March 1967, pp. 215-234, English translation of the 1928, German original.
- FELDMAN, D, e BARBALATA. 1996. *"A Synthetic Polymers Technology. Properties Applications"*. 1 Ed., London, Chapman & Hall.
- FORMIGLI, J., 2008. *"Novas Descobertas na Camada Pré-Sal e os Desafios Tecnológicos para a Área de Engenharia"*. Apresentação Power Point, Petrobras, 2008.

- FREITAS, S.M.S., 2006. *“Ferramentas Numéricas Para Análise e Projeto de Dutos e Risers na Exploração de Petróleo”*. Tese de D.Sc., Engenharia Civil, COPPE / UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.
- GAIA THE SOLUTION TEAM, disponível em < <http://www.gaia-br.com.br> > consultado em 14 de Novembro de 2008.
- GIORDANI, D. S., 1993. *“Estudo do Equilíbrio de Fases Sólido – Líquido em Sistemas Modelo de Hidrocarbonetos de Alto Peso Molecular”*. Tese de M.Sc., Engenharia Química, FEQ, Unicamp, Campinas.
- GROSS, J., FRICKE, J., 1995. *“Thermal Expansion of Carbon and Silica Aerogels Above Room Temperature”*. Journal of non-Crystalline Solids, vol. 186 (443p), pp. 301-308, Elsevier, Amsterdam, 1995.
- HALVORSEN, V.H., LERVICK, J.K., e KLEVJIER. G., 2000. *“Hydrate and Wax Prevention of Risers by Electrical Heating”*. In: Proceedings of 10th International Offshore and Polar Engineering Conference.
- INCROPERA, F. P., DEWITT. D. P., 2003. *Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa*. 5^a Ed., Rio de Janeiro, LTC.
- INCOMPLAST. *Propriedades de Polímeros*. Disponível em < <http://www.incomplast.com.br> > consultado em 30 de Dezembro de 2008.
- KOEBSCHE, A., 2006, Isolamento Térmico de Dutos Terrestres e Submarinos, Rio de Janeiro, Programa de Formação PETROBRAS – 2006.
- KULLMANN, D. H., 2006, “Estudo Analítico-Numérico de Transferência de Calor em Dutos com Aquecimento Ativo na Parede”. Dissertação de M.Sc., COPPE / UFRJ. Rio de Janeiro, Brasil.

- LEMOS, C. A. D., 2005. “*Análise de Fadiga em Risers Flexíveis*”. Tese de D.Sc., COPPE / UFRJ. Rio de Janeiro, Brasil.
- MENDES, P.R.S., BRAGA. S.L., Ribeiro. F.S., 1997. “*Obstruction of Pipelines Due to Paraffin Deposition During the Flow of Crude Oils*”. International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 40. No. 18, p. 4319–4328, 1997.
- MOROOKA, C. K., COELHO, F. M., RIBEIRO, E. J. B., FERRARI Jr., J. A. e FRANCIS. R., 2005. “*Dynamic Behavior of a Vertical Riser and Service Life Reduction*”. In: 24th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Halkidiki, Grécia, 2005, Anais do 24^o OMAE.
- MATWEB. *Propriedade de Polímeros*. Disponível em < <http://www.matweb.com> > consultado em 26 de Dezembro de 2008.
- NOVAES, J. P. Z., 2005. “*Avaliação do comportamento Dinâmico e Evolução Estrutural das Poliamidas 6 e 11 em Diferentes Estágios de Envelhecimento*”. Tese de M.Sc., COPPE / UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.
- NATURALGAS. *Propriedades de Polímeros*. Disponível em <<http://www.naturalgas.org>> consultado em 27 de Dezembro de 2008.
- NKTFLEXIBLES. *Linhas Flexíveis*. Disponível em < <http://www.nktflexibles.com> > consultado em 16 de Outubro de 2008.
- OFFSHORE MAGAZINE, 2006. “*Subsea 7, 2H Offshore launch new deepwater riser design*”. Publicado em 29 de Novembro de 2006. Disponível em <<http://www.offshore-mag.com>> consultado em 26 de Dezembro de 2008.

- OLIVEIRA, R. C., 2005. *“Estudo Experimental do Escoamento Água-Óleo com Precipitação de Parafinas em Dutos Submarinos”*. Tese de M.Sc., Ciências e Engenharia de Petróleo, S.N., Unicamp, Campinas, 2005.
- ÖZISIK, M. N., 1994. *“Finite Difference Methods in Heat Transfer”*. Ed. CRC Press, North Carolina State University, Raleigh, North Carolina, US, April, 1994.
- ÖZISIK, M. N., 1990. *Transferência de Calor – Um Texto Básico*. Rio de Janeiro, Ed. Guanabara Koogan.
- PETROBRAS, 2007. Relatório Anual 2007. Disponível em <<http://www.petrobras.com.br>>.
- PRESS, W. H., TEUKOLSKY, SAUL A., VETTERLING, WILLIAM T. 2007. *“Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing”*. 3ª Ed. Cambridge, USA.
- PUC, 2009. Apresentação em power point de poliuretano expandido. Disponível em <<http://leblon.mec.puc-rio.br>> consultado em 20 de agosto de 2009.
- SANTOS, R. N. R., 2006. *“Análises de Linhas Flexíveis sob Efeito de Cargas Térmicas”*. Tese de M.Sc., COPPE / UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.
- SANTOS, P. C. S., 1994. *“Precipitação de Parafina em Misturas de Petróleo. Medidas Experimentais e Modelagem Termodinâmica”*. Tese de M.Sc., Ciências e Engenharia de Petróleo, Mohamed. R.K., Unicamp, Campinas, 1994.
- SILVA, A. P., 2006. *“Análise da Influência da Temperatura na Rigidez à Flexão de Linhas Flexíveis”*. Engenharia Naval e Oceânica, UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

- SILVEIRA, P. F., 2005. "Polipropileno sintático . Uma alternativa para Isolamento Térmico de dutos submarinos de Produção de Óleo em Águas Profundas". Monografia de Pós-graduação, Engenharia Oceânica, UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.
- SOLANO, R. F., 2005. "Análise Termomecânica de Dutos Submarinos Enterrados". Tese de D.Sc., COPPE / UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.
- SOUSA, J. R. M., 1999. "*Análise Numérica de Risers Flexíveis*". Tese de M.Sc., COPPE / UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.
- SOUSA, J. R. M., 2005. "*Análise Local de Linhas Flexíveis pelo Método dos Elementos Finitos*". Tese de D.Sc., COPPE / UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.
- SOUSA, F. J. M., 2007. "Estatística de Longo Prazo da Resposta Aplicada à Análise de Risers Metálicos". Tese de M.Sc., COPPE / UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.
- SOUZA, A. R., 2008. "Resistência Estrutural de Dutos Sanduíche sob Pressão Externa, Flexão Longitudinal e Carregamento Térmico". Tese de M.Sc., COPPE / UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.
- SU, J., 2000. "*Isolamento Térmico de Tubos Flexíveis*". In: Curso de Extensão em Tubos Flexíveis e Cabos Umbilicais, Laboratório de Tecnologia Submarina da COPPE / UFRJ, Rio de Janeiro.
- SU, J., CERQUEIRA, D. R., 2001. "*Simulation of Transient Heat Transfer in Multilayered Composite Pipeline*". In: Proceedings of 20th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, OMAE 2001–4126, Rio de Janeiro, June.

- SU, J., REGIS, C. R., BOTTO, A., 2002. “*Thermal Analysis of Combined Active Heating and Passive Insulation of Deepwater Pipelines*”. In: Proceedings of 21th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, OMAE2002-PIPE 28491, Oslo, Norway, June.
- SU, J., CERQUEIRA, D. R., ETEFEN, S. F., 2003, “*Thermal Analysis of Sandwich Pipes with Active Electrical Heating*”. In: Proceedings of 22th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, OMAE 2003–37423, Cancun, México, June.
- TEODORIN, C., FALCONE, G., 2008. “*Investigation of Drilling Problems in Gas Hydrate Formations*”. In: Proceedings of the ASME 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, OMAE 2008–57438, Estoril, Portugal, June.
- TORNES, K., OSE, B. A., JURY, J., THOMSON, P., 2000. “Axial Creeping of High Temperature Flowlines Caused by Soil Ratcheting”. OMAE2000/PIPE-5055, New Orleans, LA, 2000.
- TROUT, S., SAHOTA, B., 1999. “*Shell ETAP high pressure and temperature pipe-in-pipe pipeline design and fabrication*”. Proceedings on the 18th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering.
- VALDIVIA, P. G., MOROOKA, C. K., BORDALO, S. N., MATT, C. G. C., FRANCISS, R., 2007. “*Resposta Dinâmica de um Riser Rígido em Catenária Devido à Excitação Induzida pelo Escoamento Interno*”, 4^o DPETRO, Campinas, São Paulo.
- WANG, H. H., CHIN, Y. D. “*Challenges in deepwater riser system design and analysis*”. In: PIPES & PIPELINES INTERNATIONAL, 2001, Houston.

WELLSTREAM. *Linhas Flexíveis*. Disponível em < www.wellstream.com.br > consultado em 27 de Dezembro de 2008.

WHATISCHEMISTRY. *Imagem de dutos obstruídos por hidrato de metano*. Disponível em <<http://www.whatischemistry.unina.it/en/hydrate.html>> consultado em 4 de Janeiro de 2009.

ANEXO A

GRAU API

O Grau API é uma escala hidrométrica feita pelo *American Petroleum Institute* (API), juntamente com a *National Bureau of Standards*. É muito utilizado na indústria do petróleo como forma de expressar a densidade relativa de um óleo ou derivado. Sua escala é medida em graus e varia inversamente com a densidade relativa do óleo, ou seja, quanto maior a densidade relativa, menor o grau API.

Os óleos existentes na natureza apresentam diversos valores de densidade e viscosidade. Para a produção, a densidade é a propriedade física mais importante, pois é a partir dela que se pode determinar como o fluido vai se comportar durante o processo de produção. A viscosidade é uma característica muito importante para o refino. Portanto, em se tratando de classificação do óleo, a característica levada em consideração é a sua densidade, já que a viscosidade é altamente influenciada pela temperatura. De acordo com essas características, os óleos crus podem ser classificados como leves, médios, pesados e ultra pesados.

Como a densidade é uma propriedade dos líquidos, a indústria do petróleo utiliza o Grau API ($^{\circ}\text{API}$) como referência para a densidade do óleo medida em relação a água, a fim de identificar rapidamente se o óleo é leve, médio, pesado ou ultra pesado. Quanto maior o Grau API, mais leve será o óleo e maior será seu valor de mercado.

O Grau API é determinado pela seguinte fórmula:

$$^{\circ}\text{API} = \frac{141.5}{\rho} - 131.5$$

onde, ρ é a densidade específica do óleo ($\frac{d_{oleo}}{d_{agua}}$), e d_{oleo} e d_{agua} são as densidades do óleo e da água.

Tabela A.1 - Grau API nas condições padrão de 25^oC (68^oF) e 1 atm.

Órgão	°API			
	óleo leve	óleo médio	óleo pesado	óleo ultra pesado
Petrobrás Offshore ⁽¹⁾	≥ 32	19 – 32	14 – 19	≤ 14
Petrobrás onshore ⁽¹⁾	≥ 32	18 - 32	13 – 18	≤ 13
ANP/Brasil ⁽²⁾	≥ 31,1	22,3 - 31,1	12 - 22,3	≤ 12
OPEP ⁽³⁾	≥ 32	26 - 32	10,5 – 26	≤ 10,5
U.S. Department of Energy ⁽⁴⁾	≥ 35,1	25 - 35,1	10,0 – 25	≤ 10
Alberta Government / Canadá ⁽⁵⁾	≥ 34	25 - 34	10,0 – 25	≤ 10

FONTE: (1) Petróleo Brasileiro S.A. www.petrobras.com.br; (2) Agência Nacional do Petróleo. www.anp.gov.br; (3) Organização dos Países Exportadores de Petróleo. www.opec.org; (4) Departamento de Energia dos Estados Unidos. www.energy.gov; (5) Governo do Estado de Alberta, Canadá. www.gov.ab.ca

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)