



ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE DUTOS SANDUÍCHE E OUTROS SISTEMAS SUBMARINOS DE TRANSPORTE DE FLUIDOS

Dirney Bessa de Lima Júnior

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro Naval e Oceânico.

Orientador: Marcelo Igor Lourenço de Souza, Dsc.

Rio de Janeiro

Março de 2015



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

Departamento de Engenharia Naval e Oceânica

DENO/POLI/UFRJ

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE DUTOS SANDUÍCHE E OUTROS SISTEMAS SUBMARINOS DE TRANSPORTE DE FLUIDOS

Dirney Bessa de Lima Júnior

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA NAVAL E OCEÂNICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO NAVAL E OCEÂNICO.

Aprovado por:

Prof. Marcelo Igor Lourenço de Souza, Dsc.

Prof. Segen Farid Estefen , PhD.

Profa. Bianca de Carvalho Pinheiro, Dsc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MARÇO DE 2015

DE LIMA JR, Dirney Bessa

Análise comparativa entre dutos sanduíche e outros sistemas submarinos de transporte de fluidos

/ Dirney Bessa de Lima Júnior. – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2015.

XIII, 84 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Marcelo Igor Lourenço de Souza

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/

Curso de Engenharia Naval e Oceânica, 2015.

Referências Bibliográficas: p. 83.

1. Introdução. 2.Revisão Bibliográfica. 3.Regras de Projeto Para Dutos Rígidos. 4. Correlação Numérico-Analítica. 5. Metodologia 6. Resultados 7.Conclusões. 8. Referências Bibliográficas

I. DE SOUZA, Marcelo Igor Lourenço.II. Universidade Federal doRio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Naval e Oceânica. III. Análise comparativa entre dutos sanduíche e outros sistemas submarinos de transporte de fluidos

Agradecimentos

Primeiramente agradeço à Deus por ter me capacitado para que eu pudesse chegar até este momento tão importante de minha vida. Em seguida aproveito para agradecer a minha família que me apoiou muito e me ensinou o que é amar.

Ao meu Pai por ter sempre sido referência para as minhas atitudes, à minha Mãe pelo suporte incondicional em todas as ocasiões e ao meu Irmão pelo carinho e admiração que recebi ao longo dos anos.

Agradeço aos meus queridos amigos que se fizeram presentes em todas as situações importantes de minha vida, amigos do colégio, do meu prédio, da faculdade e do Trabalho. Um agradecimento especial para os amigos Gustavo Scarlate, Barbara Grisolia, Fernando Toledo, Vitor Lourenço, Marcelly Maia, Igor Bastos, Gustavo Lobarinhas e Lucas Ribeiro por terem me honrado com suas presenças na minha defesa de tese.

À minha namorada Larissa Moraes por suas excelentes sugestões para o desenvolvimento do projeto, que acompanhou por cima de meus ombros, e por me substituir brilhantemente no Laboratório de Tecnologia Submarina da COPPE.

Aos membros da Banca Examinadora, que foram importantíssimos ao longo da minha graduação. Agradeço ao professor Segen por sua atenção cuidadosa e por ter me acolhido no LTS durante a graduação e em breve no mestrado. À Bianca por ter sido uma pesquisadora visitante irrepreensível e incansável, que me proporcionou muitas situações para que eu me envolvesse cada vez mais com o mercado de óleo e gás. Agradeço ao meu orientador Marcelo Igor por servir de inspiração a mim dentro da Engenharia, pela invejável paciência e amizade que teve comigo. Manifesto também um sincero obrigado ao corpo técnico e administrativo do LTS por me auxiliar durante os anos de iniciação científica e aos amigos mestrados e doutorandos Guanming Fu, Claudio Paz e John Chujutali.

Ao professor Helcio do LTTC por ter autorizado que usássemos seus equipamentos para a medida de condutividade térmica e ao Maicon por ter nos ajudado operacionalmente.

Finalmente agradeço ao professor Severino, que é a pessoa com o espírito mais evoluído que conheci. Seus ensinamentos transcenderam a sala de aula desde nosso primeiro encontro, muito obrigado por você ser parte do corpo docente da Engenharia Naval e Oceânica, o senhor fez a diferença na vida de centenas de alunos.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Naval.

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE DUTOS SANDUÍCHE E OUTROS SISTEMAS SUBMARINOS DE TRANSPORTE DE FLUIDOS

Dirney Bessa de Lima Júnior

Março/2015

Orientador: Prof. Marcelo Igor Lourenço de Souza

Curso: Engenharia Naval e Oceânica

Este estudo apresenta uma análise comparativa entre as diferentes soluções existentes para o transporte de fluidos submarinos e uma solução inovadora, os dutos sanduíche. Foi feita uma revisão bibliográfica a respeito dos principais temas que influenciam na operação e instalação de flowlines e para os dutos sanduíche. O estudo comparativo foi feito com base nos modelos analíticos e numéricos elaborados ao longo dos últimos anos no Laboratório de Tecnologia Submarina/COPPE e em regras de projeto de dutos do Det Norske Veritas e American Petroleum Institute. Diferentes cenários de aplicação foram propostos e as soluções cabíveis foram contrapostas levando em consideração as quantidades de material necessárias para atender aos requisitos de operação e instalação.

Palavras-chave: Dutos Sanduíche, Análise comparativa, Resistência Estrutural, Isolamento Térmico, Custos.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Naval Engineer.

COMPARATIVE ANALYSIS BETWEEN SANDWICH PIPES AND
OTHERS SUBMARINE SYSTEMS OF FLUIDS TRANSPORT

Dirney Bessa de Lima Júnior

Março/2015

Advisor: Marcelo Igor Lourenço de Souza

Course: Naval Architecture and Marine Engineering

This study presents a comparative analysis between the different existing solutions for the submarine transport of fluids and an innovative solution, the sandwich pipes. A bibliographic revision is presented on the major subjects involved in subsea pipelines installation and operation and for the sandwich pipes. A comparative study was carried out based on analytical models and numerical models developed in the Submarine Technology Laboratory/COPPE and on design rules provided by Det Norske Veritas and American Petroleum Institute. Different application scenarios were assessed and the suitable solutions were compared considering the amount of material needed to fulfill the requirements of installation and operation.

Keywords: Sandwich Pipes, Comparative analysis, Structural Resistance, Thermal Insulation, Costs.

Sumário

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Contextualização	1
1.2. Importância do trabalho	3
1.3. Sequência do projeto	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1. Resistência Estrutural do Duto Sanduíche.....	5
2.1.1. Material anular	5
2.1.2. Colapso de Dutos sanduíche.....	5
2.1.3. A influência da ovalização cruzada na pressão de colapso de Dutos Sanduíche.....	8
2.2. Tansferência de Calor em Dutos	12
2.2.1. Meios de transferência de calor	12
2.2.2. O problema de transferência de calor para um duto submarino	12
2.2.3. Perda de calor por condução.....	13
2.2.4. Perda de calor por convecção	15
2.2.5. Coeficiente de troca térmica global (U-value)	19
2.2.6. U-value em sistemas existentes	20
2.3. Métodos de Instalação de Dutos Submarinos.....	23
2.3.1. Embarcações PLSV (Pipe Laying Support Vessels)	23
2.3.2. Método S-lay	23
2.3.2.1. Elementos envolvidos na construção submarina pelo método S-lay	24
O Stinger	25
Estocagem da carga para lançamento pelo método S-lay.....	27
Estações de Trabalho Dentro de uma Embarcação PLSV S-lay	29

2.3.2.2.	Esforços no Duto na construção submarina pelo método S-lay	31
2.3.3.	Método J-lay	32
2.3.3.1.	Elementos envolvidos na construção submarina pelo método J-lay	33
	Torre de Lançamento.....	33
	Moonpool	36
2.3.3.2.	Vantagens e Desvantagens do método J-lay	36
2.3.3.3.	Esforços no Duto na construção submarina pelo método S-lay	37
2.3.4.	O Método Reel lay	38
3.	REGRAS DE PROJETO PARA DUTOS RÍGIDOS.....	41
3.1.	A física do problema	41
3.2.	Regras de projeto disponíveis.....	43
3.2.1.	API RP 1111, "Design, Construction, Operation and Maintenance of Offshore Hydrocarbon Pipelines (Limit State Design)"	43
3.2.2.	DnV OS-F101, "Offshore standard OS-F101 - Submarine Pipeline Systems (2007)"	44
3.3.	Critérios governantes para o caso de estruturas do tipo PiP	44
3.3.1.	Critério de pressão externa segundo API RP 1111.....	44
3.3.2.	Critério de pressão externa segundo DnV OS-F101 2007	46
3.3.3.	Critério de pressão interna segundo API RP 1111	47
3.3.4.	Critério de pressão interna segundo DnV OS-F101 2007	48
4.	CORRELAÇÃO NUMÉRICO-ANALÍTICA	50
5.	METODOLOGIA	54
5.1.	Projeto de Dutos Sanduíche	54
5.2.	Características físicas, geométricas e financeiras dos sistemas escolhidos.....	56
5.2.1.	Características Geométricas	56
5.2.2.	Características Físicas	57
5.2.3.	Características de Custo	62
6.	Resultados	70
6.1.	Geometria dos diferentes sistemas	70

6.2.	Coeficiente global de troca térmica para os diferentes sistemas	74
6.3.	Custo para os diferentes sistemas	77
7.	CONCLUSÕES.....	80
7.1.	Isolamento térmico.....	80
7.2.	Resistência estrutural.....	81
7.3.	Custos	82
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83

Índice de Figuras

Figura 1 - Protótipo de Duto Sanduíche.....	2
Figura 2 - Congifuração de sistema PIP.....	2
Figura 3 -PIP com camada de isolamento	2
Figura 4 - Configuração de sistema single wall com isolamento térmico.....	3
Figura 5 - Diferentes camadas de um flowline flexível	3
Figura 6 - Geometria utilizada por Chen	6
Figura 7 - Câmara hiperbárica do LTS/COPPE.....	7
Figura 8 - Esquema dos testes de colapso realizados na câmara hiperbárica.....	7
Figura 9 - Colapso “U”.....	7
Figura 10 - Colapso plano	7
Figura 11 -Instrumento usado para medir a ovalização	8
Figura 12 - Marcação das diferentes seções do tubo	9
Figura 13 - Diferentes ovalizações para duas seções distintas de um mesmo tubo.....	9
Figura 14 - Seção com ovalizações elípticas alinhadas	10
Figura 15 - Seção com ovalizações elípticas desalinhadas em 90°.....	10
Figura 16 -Nomenclatura dos protótipos	10
Figura 17 - Nomenclatura de ovalização	10
Figura 18 -As três diferentes formas de troca de calor	12
Figura 19 - Flowline obstruído devido a formação de parafina	13
Figura 20 - Seção de flowline obstruída por parafina	13
Figura 21 - Distribuição de temperatura ao longo de um flowline duplamente isolado.....	19
Figura 22 - Coeficiente de troca térmica global encontrado para diferentes aplicações.....	22
Figura 23 - Coeficiente de troca térmica global encontrado para diferentes projetos de pipelines	22
Figura 24 -Navios PLSVs J-Lay e S-lay respectivamente.....	23
Figura 25 -Esquema de construção submarina pelo método S-lay	24
Figura 26 -Navio PLSV S-lay com Stinger	25
Figura 27 - Vista a ré de navio PLSV S-lay	26

Figura 28 - Duto sendo lançado com auxílio de stinger	27
Figura 29 - Embarcação PLSV S-lay sendo suprida.....	28
Figura 30 -Transbordo de carga de navio supridor para navio PLSV S-lay.....	28
Figura 31 - Carga estocada dentro de embarcação PSLV S-lay	29
Figura 32 - Compartimento de navio PLSV S-Lay das estações de trabalho	29
Figura 33 -Operação de soldagem de dutos.....	30
Figura 34 -Aplicação do revestimento na conexão entre dois tramos	30
Figura 35 -Comportamento mecânico do duto durante o lançamento S-lay	31
Figura 38 -Ilustração do método J-Lay	32
Figura 39 - Esquema de construção submarina pelo método J-Lay.....	33
Figura 40 - Embarcação com torre para lançamento J-Lay	34
Figura 41 - <i>Saipem 7000</i> – Semi-sub com torre para lançamento J-Lay.....	34
Figura 42 - Componentes do sistema de lançamento J-lay.....	35
Figura 43 - Ilustração do <i>Moonpool</i> de um navio sonda.....	36
Figura 44 - <i>Moonpool</i> (número 18) de uma embarcação que lança dutos pelo método J-Lay.....	36
Figura 45 - Ilustração das tensões aplicadas no duto no lançamento J-Lay	37
Figura 46 -Equipamentos utilizados por um PLSV para lançar dutos pelo método Reel lay	38
Figura 47 -Bobinas carregas prontas para serem embarcadas	39
Figura 48 -Carretel de um navio sendo carregado em uma spoolbase.....	39
Figura 49 -Spoolbase.....	40
Figura 50 -Conector submarino.....	41
Figura 51 -Rota de um pipeline.....	42
Figura 52 -Buckle arrestor	43
Figura 53 - Processo de soldagem DSAW	45
Figura 54 - Processo de soldagem ERW	46
Figura 55 -Malha do modelo numérico	50
Figura 56 -Acoplamento do modelo.....	51
Figura 57 -Simetrias em x,y e z, respectivamente.....	51

Figura 58 - Figura 58 – Equipamento Thermal Thermal Conductivity	57
Figura 59 -Figura 59 – Detalhe da resistência do equipamento.....	57
Figura 60 -Amostras cortadas	58
Figura 61 -Amostra de SHCC.....	58
Figura 62 - Aplicação do agente de contato	58
Figura 63 -Água destilada fornecida pelo fabricante	58
Figura 64 -Amostra pronta para ser ensaiada.....	59
Figura 65 -Arquivo de saída com as medições feitas	59
Figura 66 -Tubulação de aço oferecida por fornecedor Chinês	61
Figura 67 - Bobina de polipropileno	62
Figura 68 -Grãos de polipropileno	62
Figura 69 -Preço do PP copopolímero para injeção.....	63
Figura 70 –Histórico do preço do PP copopolímero para injeção	63
Figura 71 -Areia fina	64
Figura 72 -Fibra de PVA.....	65
Figura 73 -Saca de cimento.....	65
Figura 74 -Areia fina	66
Figura 75 -Cinza volante	66
Figura 76 - Preço da Pozolana	67
Figura 77 -Preço do superplastificante -	67
Figura 78 - Preço do modificador de viscosidade	68

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Profundidade dos poços descobertos ao longo dos anos	1
Tabela 2 - Propriedades dos polímeros utilizados como anular de protótipos de dutos sanduíche	5
Tabela 3 - Geometria dos protótipos SP1	11
Tabela 4 - Geometria dos protótipos SP2	11
Tabela 5 - Resultado sem ovalização cruzada.....	11
Tabela 6 - Resultado com ovalização cruzada.....	11
Tabela 7 -Resultado com ovalização cruzada.....	11
Tabela 8 – Coeficientes convectivos típicos para escoamento turbulento	16
Tabela 9 – Condutividade típica para óleo cru e hidrocarbonetos na fase líquida	17
Tabela 10 - Valores das constantes C e m.....	18
Tabela 11 -Isolamentos apropriados em função da temperatura	21
Tabela 12 -Coeficiente de troca térmica global para diferentes casos de duto de parede simples	21
Tabela 13 -Coeficiente de troca térmica global para diferentes casos de duto PiP	21
Tabela 14 -Valores atingíveis de coeficiente de troca térmica global	23
Tabela 15 -Critérios governantes e opcionais em função dos componentes	44
Tabela 16 - Correlação numérico-analítica	52
Tabela 17 - Profundidades avaliadas	55
Tabela 18 -Geometrias avaliadas para o duto PIP	55
Tabela 19 –Geometrias avaliadas para o duto de parede simples	56
Tabela 20 -Graus de aço avaliados.....	56
Tabela 21 - Condutividade térmica das amostras.....	59
Tabela 22 -Condutividade térmica dos materiais	60
Tabela 23 - Custo dos componentes.....	60
Tabela 24 -Proporção dos componentes	65
Tabela 25 -Custo dos componentes do concreto sem fibra de PVA	68
Tabela 26 -Densidade dos componentes representativos do concreto	68
Tabela 27 -Espessura dos dutos interno e externo do SP (SHCC) para aço X60	69

Tabela 28 -Espessura dos dutos interno e externo do SP (SHCC) para aço X70	70
Tabela 29 -Espessura dos dutos interno e externo do SP (PP) para aço X60	71
Tabela 30 -Espessura dos dutos interno e externo do SP (PP) para aço X70	71
Tabela 31 -Espessura dos dutos interno e externo do PIP (ar) para aço X60	72
Tabela 32 -Espessura dos dutos interno e externo do PIP (ar) para aço X70	72
Tabela 33 -Espessura dos dutos de Parede Simples para aço X60	73
Tabela 34 -Espessura dos dutos de Parede Simples para aço X70	73
Tabela 35 -Coeficiente global de troca térmica com aço X60.....	74
Tabela 36 -Coeficiente global de troca térmica com aço X70.....	75
Tabela 37 -Custo para os sistemas com aço X60.....	77
Tabela 38 -Custo para os sistemas com aço X70.....	78
Tabela 39 -Pressão de colapso em função da espessura do anular	81

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização

Ao longo dos anos, a exploração de óleo e gás no Brasil vem se expandindo para águas cada vez mais profundas, vide Tabela 1. Os campos em águas rasas estão se esgotando, e os campos em terra não possuem grandes reservas.

Tabela 1 – Profundidade dos poços descobertos ao longo dos anos

Campo	Ano de descoberta	Profundidade (m)
Enchova	1977	124
Bonito	1979	189
Piraúna	1983	293
Marimbá (RJS-264)	1985	383
Marimbá (RJS-3760)	1988	492
Marlim (MRL-0)	1992	781
Marlim(MRL-4)	1994	1027
Marlim Sul (MLS-3)	1997	1709
Roncador (RJS-436)	1999	1853
Roncador (RO-8)	2000	1877
Roncador(RO-21)	2003	1886
Lula	2010	2131

Para conseguir instalar e operar sistemas de transporte de fluidos submarinos , a quantidade de aço presente nesses sistemas aumenta com a lâmina d'água. A estrutura que fará o transporte de fluidos precisa que:

- As cargas de instalação não danifiquem a estrutura impossibilitando sua operação
- Resistir à pressão colapso
- Resistir à pressão interna
- Garantir o escoamento do fluido

Dutos sanduíche são estruturas compostas por dois tubos concêntricos e um núcleo de material resistente estruturalmente, como vemos na Figura 1. O material do núcleo é tipicamente polimérico ou cimentício. Além de prover resistência estrutural, o que diminui a quantidade de aço necessária, o núcleo apresenta características térmicas apreciáveis para garantir o escoamento dos hidrocarbonetos sem a formação de hidratos ou parafinas.



Figura 1 – Protótipo de Duto Sanduíche

Os dutos sanduíches podem se tornar uma alternativa inovadora para a exploração em lâminas d'água ultra profundas dos campos do pré-sal, pois em estudos realizados com modelos numéricos, o comportamento dessas estruturas apresenta os requisitos necessários para a aplicação em situações críticas de profundidade de acordo com testes experimentais realizados no LTS/COPPE.

A tecnologia dos dutos sanduíche pode ser aplicada tanto para “flowlines”, “risers” ou “jumpers”. A maioria dos estudos realizados até agora se propuseram a aplicá-los como flowlines e pipelines. Há extensa bibliografia a respeito de dobramento e pressão de colapso de dutos sanduíche, entretanto não foram realizadas muitas análises sobre o comportamento dinâmico dessa estrutura.

Atualmente, quando a escolha para o transporte de fluidos em profundidades grandes é feita por dutos rígidos, e há requisitos de grande isolamento térmico para o projeto, a estrutura escolhida é o tubo “pipe-in pipe” (PIP). Trata-se de dois tubos concêntricos de diferentes diâmetros, com o núcleo vazio ou com material que provê apenas isolamento térmico, vide Figuras 2 e 3.



Figura 2 – Configuração de sistema PiP



Figura 3 – PiP com camada de isolamento

A outra opção disponível é a de duto de parede simples (Figura 4). Esta opção é a mais utilizada para pipelines no Brasil, entretanto a quantidade de aço necessária para as aplicações ultraprofundas é muito alta, fazendo com que esta solução seja muito cara.



Figura 4 – Configuração de sistema de parede simples com isolamento térmico

Também temos a opção de dutos flexíveis. Esta opção é a mais utilizada no Brasil para flowlines e risers, mas seu alto custo inviabiliza a implementação em pipelines. Sua vantagem é que trata-se de um produto consolidado e exaustivamente testado. Porém não há empresas brasileiras que detenham tecnologia para dominar este produto, e além disso é a opção mais cara de todas. O duto flexível é uma estrutura composta por diferentes camadas, cada uma com uma função específica: resistir à pressão externa, resistir à pressão interna, isolamento térmico, resistir às cargas de instalação, prover estanqueidade e fitas anti-desgastes (nos casos de risers). As diferentes camadas de um duto flexíveis podem ser vistas na Figura 5.



Figura 5 – Diferentes camadas de um flowline flexível

1.2. Importância do trabalho

Este trabalho tem o intuito de verificar a vantagem dos dutos sanduíche sobre as outras opções existentes para a mesma função. Serão projetados sistemas de acordo com diferentes regras de projeto existentes, e aplicados em diferentes lâminas d'água. A quantidade de aço

necessária e o isolamento térmico serão os critérios adotados para a comparação entre as estruturas.

Obtivemos mais uma ferramenta que atesta a viabilidade técnica e econômica dos dutos sanduíches para aplicações de águas ultra profundas. Para a indústria nacional pode um marco importantíssimo, pois apesar da Petrobras ser uma empresa brasileira, a maior parte da tecnologia empregada por ela vem de empresas multinacionais. Os dutos sanduíche são patenteados por brasileiros e podem vir a gerar empregos e renda para o país caso comecem a ser utilizados em larga escala.

O trabalho mostrou que o duto sanduíche com anular de SHCC é mais barato que os outros sistemas devido ao custo do anular ser baixo e quantidade de aço necessária diminuir por causa da resistência estrutural do SHCC.

1.3. Sequência do projeto

Após o primeiro capítulo, de introdução, teremos uma revisão bibliográfica no capítulo 2 sobre dutos rígidos, onde abordaremos os dutos simples, os dutos PIP e os dutos sanduíche. Falaremos também a respeito dos métodos de instalação e da transmissão de calor via condução.

Ao final da revisão bibliográfica iremos mostrar as regras de projeto para dutos rígidos no capítulo 3. Em seguida no capítulo 4 apresentaremos a metodologia, onde iremos definir os cenários de aplicação do nosso estudo comparativo. O nosso cenário será composto por material, lâmina d'água, U-value, e tipo de estrutura. Os cálculos das seções dos dutos PIP e de parede simples serão feitos a partir de diferentes regras de projeto existentes. As seções de duto sanduíche serão seções já trabalhadas em análises numéricas realizadas previamente no Laboratório de Tecnologia Submarina da COPPE, na Universidade Federal do Rio de Janeiro.

No capítulo 5 apresentamos os resultados obtidos, para que depois, no capítulo 6 façamos a conclusão fornecendo um panorama do trabalho e seus resultados.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Resistência Estrutural do Duto Sanduíche

2.1.1. Material anular

A grande vantagem do duto sanduíche é que o material anular fornece além de isolamento térmico, resistência estrutural. Ao longo dos anos diferentes materiais foram testados, com diferentes propriedades térmicas e mecânicas. Materiais poliméricos e cimentícios foram testados.

O polipropileno sólido (SPP), o policarbonato (PC), a espuma sintética de epoxy (ESF), a espuma de poliamida de alta densidade (HDPF) e a polieteretercetona (PEEK) tem suas propriedades expostas na Tabela 2.

Tabela 2 – Propriedades dos polímeros utilizados como anular de protótipos de dutos sanduíche de acordo com Chen [01]

Material	Densidade [kg/m ³]	Tensão de escoamento [Mpa]	Deformação na tensão de escoamento [%]	Módulo de elasticidade [Mpa]	Condutividade térmica [W/mK]	Temperatura máxima de serviço [°C]
SPP	900	23	8.0	1000	0,2	145
PEEK	646	68	4.0	2331	0,18	348
PC	679	44	5.0	1599	0,22	188
ESF	720	22	8.5	1580	0,12	177
HDPF	500	26	9.1	521	0,07	300

Os materiais cimentícios possuem baixa condutividade térmica e alta resistência à compressão. As variações deste tipo de material testadas foram: Cimento puro, Concreto reforçado com fibra de aço (SFRC), Composto cimentício com encruamento (SHCC). Os últimos dois SFRC e SHCC são versões conhecidas de Compostos cimentícios reforçados por fibras de alta performance (HPFRCC), isso faz com que sejam mais adequadas à aplicação como material do núcleo, pois serão de grande importância para resistir às cargas de colapso sob pressão externa e flexão na etapa de instalação.

2.1.2. Colapso de Dutos sanduíche

Para entender o comportamento estrutural do duto sanduíche, é necessário entender como ocorrem as falhas desta estrutura. Dois fatores de grande importância são a flambagem e o colapso. Para entender melhor estas situações, é necessário recordarmos os conceitos envolvidos.

Em cilindros geometricamente perfeitos sob pressão externa, a pressão de flambagem se refere à pressão crítica de flambagem, a partir da qual o equilíbrio fundamental bifurca para dois caminhos de equilíbrio. O estado fundamental de equilíbrio é o mesmo que o estado de equilíbrio de pré-flambagem e o caminho estável pós pressão de flambagem é

conhecido como o caminho pós-flambagem. Flambagem elástica indica que a flambagem ocorre com o material no regime elástico, e flambagem plástica se refere à ocorrência de flambagem apenas o material se comporte no regime plástico.

Imperfeições geométricas e materiais elasto-plásticos são considerados para os tubos reais. Não há ponto de bifurcação, independente da pressão. Conforme a pressão externa aumenta, a rigidez do tubo decresce gradualmente até que quando a pressão de colapso é atingida, a rigidez não é suficiente para evitar a deformação do tubo.

É possível realizar estudos analíticos para entender melhor o colapso e a flambagem dos dutos sanduíche sobre pressão hidrostática. Foram desenvolvidos modelos em estado plano de tensões e também há estudo tridimensional de flambagem de estruturas sanduíche, correspondente aos trabalhos de Arjomandi and Taheri [2] e Besides, Kardomateas e Simitse [3], respectivamente.

Castello [4] utilizou a Equação de Colapso Elástico de Tubos de Timoshenko (2-1)

$$P_e = \frac{3EI}{(1-\nu^2)R^3} \quad (2-1)$$

para prever a pressão de colapso no caso de dutos sanduíches (2-2).

$$P_{co} = \frac{P_0 t + P_e t - \sqrt{36R_m^2 P_e^2 \delta_0^2 + 12R_m P_0 P_e \delta_0 t + 12R_m P_e^2 \delta_0 t + P_0^2 t^2 - 2P_0 P_e t^2 + P_e^2 t^2 + 6R_m P_e \delta_0}}{2t} \quad (2-2)$$

Chen [5] utilizou diversos testes em modelos para ajustar uma equação de colapso para o caso dos dutos sanduíche que possuem SHCC como material anular (2-4) com o auxílio do software MATHEMATICA (2-4), levando em consideração a ovalização (2-3) dos modelos. A geometria proposta por Chen é vista na Figura 6.

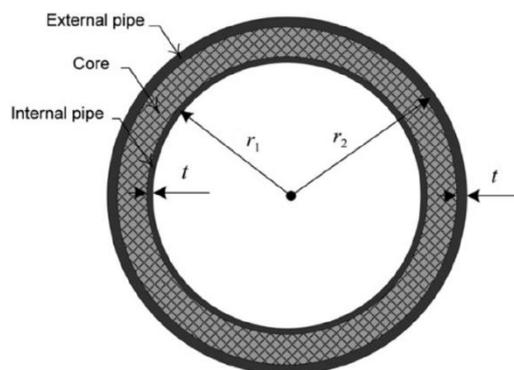


Figura 6 – Geometria utilizada por Chen [5]

$$\Delta_0 = \frac{D_{\max} - D_{\min}}{D_{\max} + D_{\min}} \quad (2-3)$$

$$P_{co} = 18.1359 + (r_2/r_1)^{3.62496} (t/r_1)^{1.11268} \Delta^{-0.695743} \quad (2-4)$$

Castello e Chen usaram a mesma câmara hiperbárica (Figuras 7 e 8) para os testes.



Figura 7 – Câmara hiperbárica do LTS/COPPE

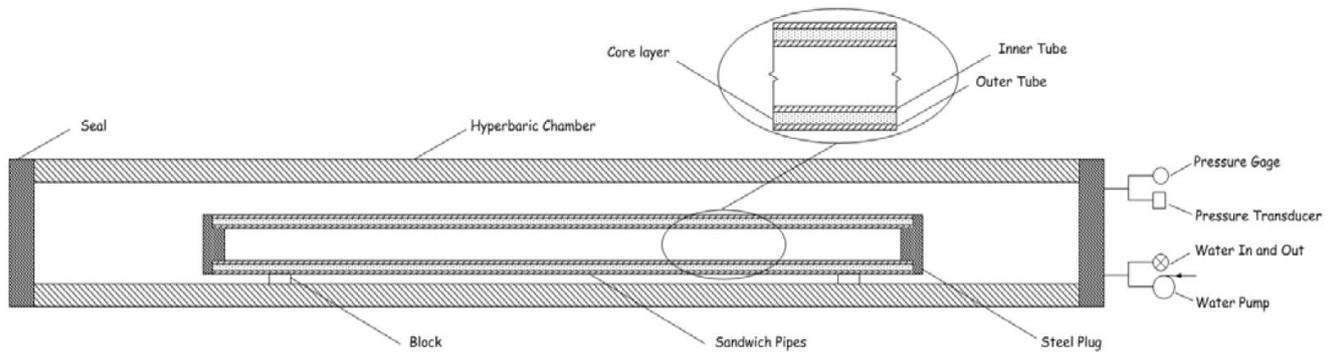


Figura 8 – Esquema dos testes de colapso realizados na câmara hiperbárica

Há dois modos diferentes para o colapso do duto sanduíche, o colapso “U” e o colapso plano, respectivamente Figuras 9 e 10.



Figura 9 – Colapso “U”



Figura 10 – Colapso plano

2.1.3. A influência da ovalização cruzada na pressão de colapso de Dutos Sanduíche

A ovalização dos dutos sanduíche é determinada pela equação 2-3.

$$\Delta_0 = \frac{D_{\max} - D_{\min}}{D_{\max} + D_{\min}} \quad (2-3)$$

Os dutos que são utilizados para o estudo experimental ficam sujeitos às imperfeições geométricas inerentes aos processos de fabricação. Além disso, durante o transporte e armazenamento dos dutos, mais imperfeições geométricas podem ser criadas.

A ovalização está diretamente ligada à pressão de colapso. Devido a isso, temos que levá-la em consideração para que os testes experimentais não sejam mal interpretados e os cálculos numéricos não representem a realidade.

Com o auxílio do dispositivo de medição a laser FARO (Figura 11), é possível realizar a medição da geometria real das seções do duto.



Figura 11 – Instrumento usado para medir a ovalização

Dividindo o duto em segmentos e medindo algumas seções é possível ter um conjunto de dados precisos para os modelos numéricos. A Figura 12 mostra um exemplo de marcação para obtenção de medidas de seções.

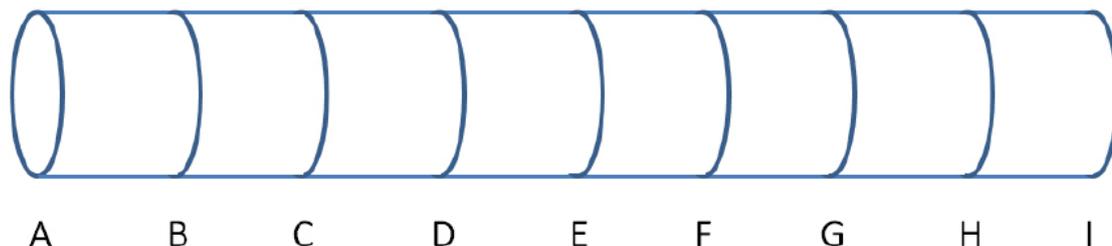


Figura 12 – Marcação das diferentes seções do tubo

Dois seções de um mesmo duto podem apresentar diferentes ovalizações, como podemos ver na Figura 13.

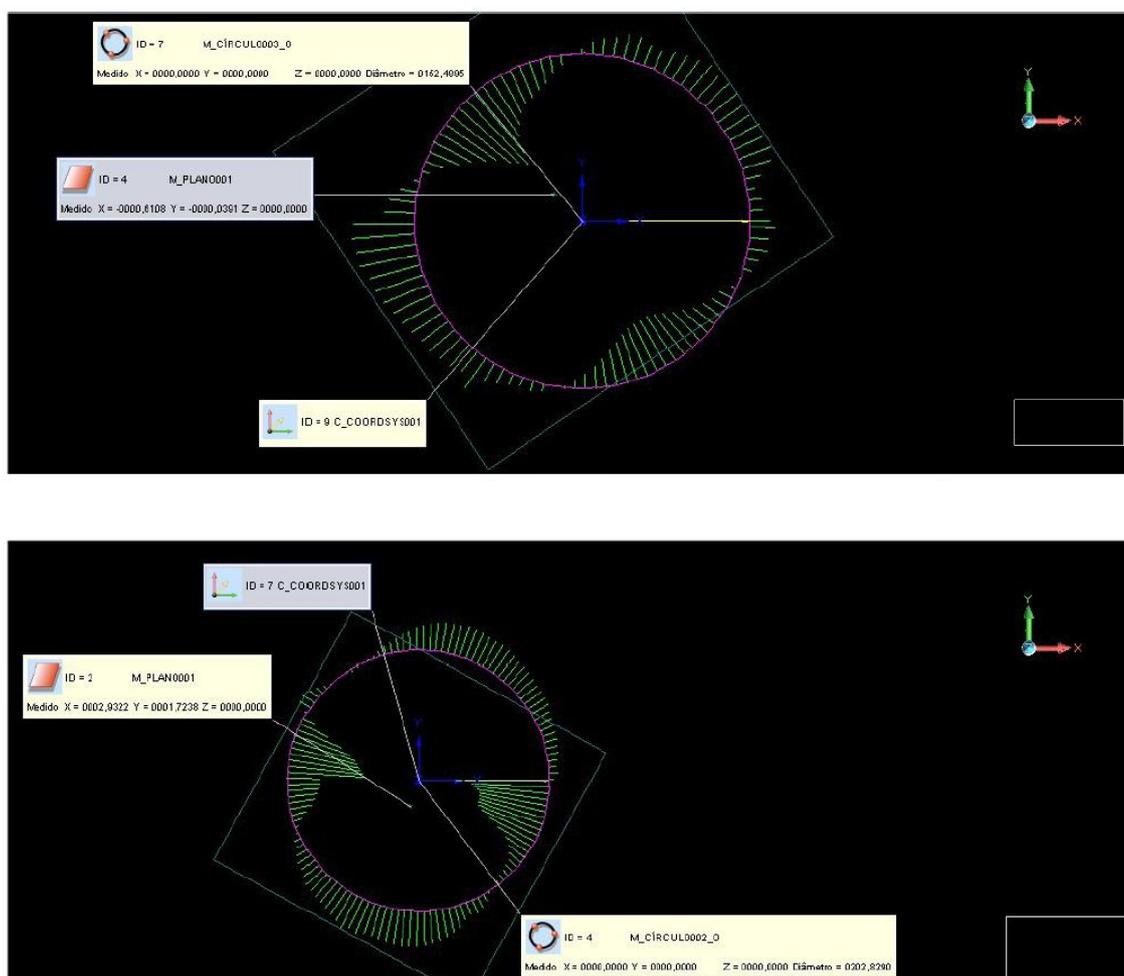


Figura 13 – Diferentes ovalizações para duas seções distintas de um mesmo tubo

As linhas verdes representam a variação em relação a uma circunferência perfeita. O sentido das linhas representa a variação positiva ou negativa do raio. Positivo para fora e negativo para dentro.

Os dutos interno e externo possuem suas ovalizações individuais. Já foi investigado que a orientação das ovalizações influencia na pressão de colapso dos dutos sanduíche.

Em um estudo realizado [31] pelo grupo de pesquisa do LTS/COPPE as ovalizações idealizadas como elipses, é possível perceber esta característica.

O modelo proposto é composto por duas elipses. As suas elipses possuem suas ovalizações. O eixo maior da elipse do tubo interno coincide com o eixo maior do tubo externo. Esta situação é considerada sem ovalização cruzada (figura 14).

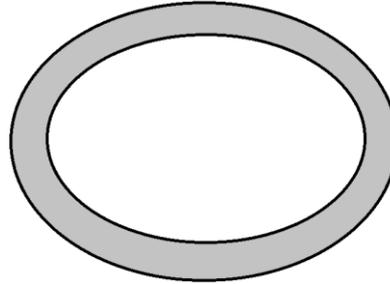


Figura 14 – Seção com ovalizações elípticas alinhadas

A ovalização cruzada investigada foi de 90 graus. Nesta situação o raio maior do tubo externo coincide com o raio menor do tubo interno (figura 15).

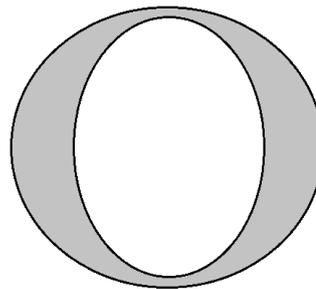


Figura 15 – Seção com ovalizações elípticas desalinhadas em 90°

A legenda dos resultados é explicada nas figuras 16 e 17:

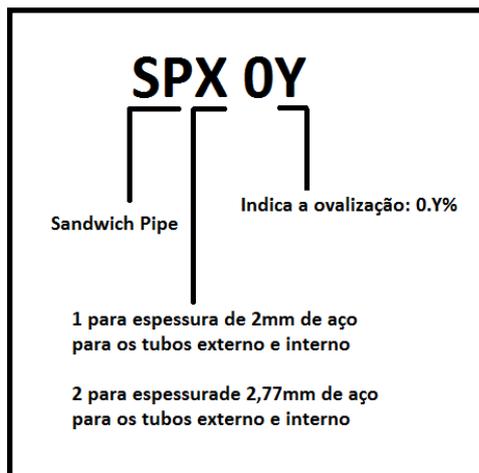


Figura 16 – Nomenclatura dos protótipos

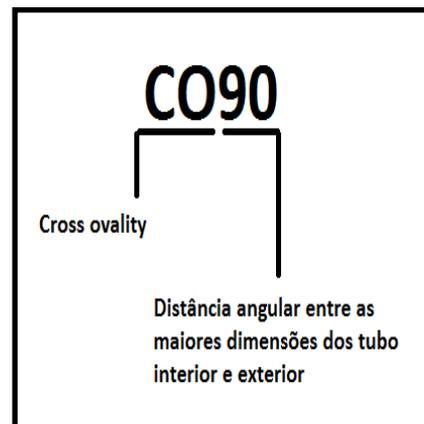


Figura 17 – Nomenclatura de ovalização

A geometria dos tubos utilizados nos estudos numéricos são apresentados nas tabelas 3 e 4:

Tabela 3 – Geometria dos protótipos SP1

SP1			
Tubo interno	D ext	6	inch
		152,40	mm
	R ext	76,20	mm
	t	2,00	mm
Tubo externo	D ext	8,00	inch
		203,20	mm
	R ext	101,60	mm
	t	2,00	mm
Anular	Raio Externo	99,60	mm
	Raio Interno	76,20	mm

Tabela 4 – Geometria dos protótipos SP2

SP2			
Tubo interno	D ext	6	inch
		168,28	mm
	R ext	84,14	mm
	t	2,77	mm
Tubo externo	D ext	8,00	inch
		219,08	mm
	R ext	109,54	mm
	t	2,77	mm
Anular	Raio Externo	106,77	mm
	Raio Interno	84,14	mm

Os resultados das simulações numéricas podem ser vistos nas tabelas 6 e 7

Tabela 5 – Resultados sem ovalização cruzada

Modelo	Pressão de colapso (Mpa)
SP1 03	31,37
SP1 04	29,85
SP1 05	30,24
SP2 03	36,24
SP2 04	35,27
SP2 05	34,61

Tabela 6 – Resultados com ovalização cruzada

Modelo	Pressão de colapso (Mpa)
CO90 - SP1 03	33,56
CO90 - SP1 04	30,66
CO90 - SP1 05	33,5
CO90 - SP2 03	39,45
CO90 - SP2 04	39,26
CO90 - SP3 05	39,09

A tabela 7 mostra a variação dos resultados com ovalização e sem ovalização cruzada:

$$\frac{(CO90 - CO0)}{CO0}$$

Tabela 7 – Resultado com ovalização cruzada

Caso	Variação percentual
SP1 03	6,98
SP1 04	2,71
SP1 05	10,78
SP2 03	8,86
SP2 04	11,31
SP2 05	12,94

Os resultados obtidos demonstram que as ovalizações desalinhadas fazem com que a pressão necessária para colapsar as amostras seja maior. Com isso torna-se importante avaliar as ovalizações previamente para que a ovalização cruzada não seja um fator que prejudique a interpretação dos resultados. Estes resultados indicam que há como obter um aumento significativo na pressão de colapso de acordo com a fabricação, e este fator pode ser explorado a favor da confiabilidade do sistema.

2.2. Transferência de Calor em Dutos

2.2.1. Meios de transferência de calor

Há três maneiras em que ocorre a troca de calor na natureza: condução, convecção e radiação (ilustradas na figura 18). Quando há um gradiente de temperatura em algum meio, seja ele gasoso, líquido ou sólido, a condução irá ocorrer através do meio. Caso um fluido em movimento esteja em contato com alguma superfície, e entre esses dois elementos haja um gradiente de temperatura, teremos convecção entre o fluido e a superfície. E por fim, todas as superfícies sólidas com temperatura irão emitir energia via ondas eletromagnéticas, o que é chamado de radiação. No caso de dutos, as duas formas relevantes de perda de calor são a convecção e a condução.

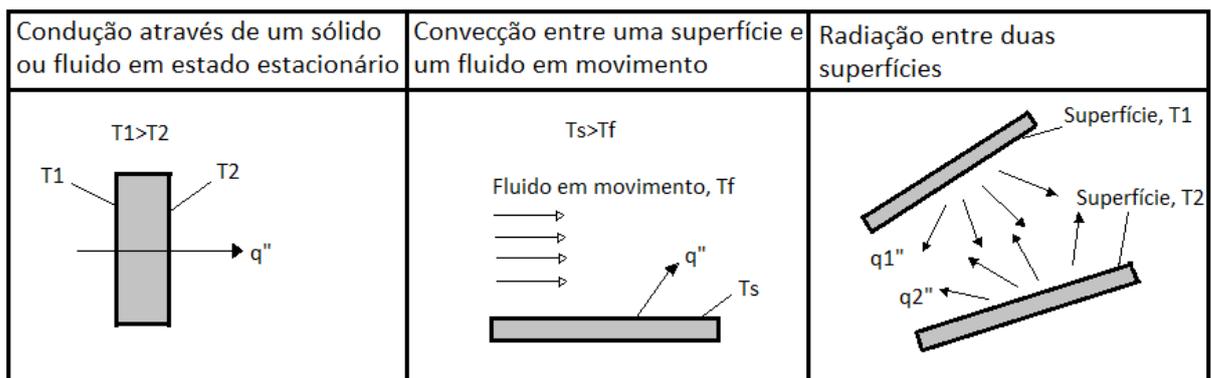


Figura 18 – As três diferentes formas de troca de calor

2.2.2. O problema de transferência de calor para um duto submarino

Para o caso de dutos submarinos haverá condução de calor, pois a temperatura da água do mar é diferente da temperatura do duto. O duto perderá calor para o mar, pois a temperatura da água do mar é mais baixa que a temperatura do fluido transportado.

Também teremos as perdas por convecção. A convecção ocorre tanto externamente como internamente. O fluido escoava dentro do duto e cede calor para este. Por fora do duto a água do mar em movimento devido aos efeitos das cargas naturais faz com que o duto perca calor para o oceano.

Dependendo da temperatura do óleo escoado pode haver a formação de hidratos ou parafinas. Um exemplo disso pode ser visto nas Figuras 19 e 20.



Figura 19 – Flowline obstruído devido à formação de parafina



Figura 20 – Seção de flowline obstruída por parafina

2.2.3. Perda de calor por condução

No caso unidimensional temos que a perda de calor por condução em uma placa plana é dada pela Lei de Fourier.

$$q'' = -k \cdot \frac{dT(x)}{dx} \quad (2-5)$$

onde,

q'' : Taxa de transferência de calor na direção x por unidade de área (W/m^2);

k: Condutividade térmica do material ($W/m.K$);

$dT(x)/dx$: Gradiente de temperatura na direção x.

Quando a condutividade térmica do material é constante ao longo da placa teremos uma distribuição linear de temperatura através da espessura. Com isso temos

$$q'' = -k \cdot \frac{T_2 - T_1}{x_2 - x_1} \quad (2-6)$$

Extrapolando o raciocínio para uma situação tridimensional, podemos calcular a temperatura em qualquer ponto com o auxílio da equação de Fourier, desde que a distribuição de temperatura seja conhecida.

Ao aplicarmos um balanço de energia a um volume de controle tridimensional com condições de contorno de temperatura, obtemos o perfil de temperatura de acordo com a equação da difusão do calor.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2-7)$$

onde,

\dot{q} : taxa de geração de calor por unidade de volume (W /m³)

ρ : densidade (kg/m³);

c_p : calor específico (kJ/kg.K);

x, y, z : coordenadas(m);

t : tempo (s).

Podemos escrever a equação de difusão do calor em coordenadas cilíndricas:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(k \frac{\partial T}{\partial \phi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2-8)$$

Onde,

r : coordenada radial (m);

z : coordenada axial (m);

ϕ : medida angular na direção radial (rad).

Ainda é possível fazer mais uma simplificação. A razão de aspecto de um flowline é muito alta. A estrutura tem alguns centímetros de largura por quilômetros de comprimento. Devido a isso, as perdas de calor que ocorrem na direção axial e circunferencial podem ser desprezadas, de acordo com Bai [6]. A equação de difusão de calor no caso de dutos de grande comprimento sem isolamento ativo é convenientemente escrita como:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2-9)$$

É fácil de perceber que no estado estacionário o segundo membro da equação (2-9) valerá zero. Assim sendo conseguimos resolver a equação analiticamente. A solução dessa equação é o fluxo total de calor por unidade de comprimento do duto.

$$q_r = -2 \pi k \frac{T_2 - T_1}{\ln(r_2 / r_1)} \quad (2-10)$$

Onde,

r_1, r_2 : Raio interno e raio externo, respectivamente (m);

T_1, T_2 : Temperatura nos pontos correspondentes do raio interno e externo (K);

q_r : Taxa de fluxo de calor por unidade de comprimento (W/m).

2.2.4. Perda de calor por convecção

Tanto a superfície interna quanto a superfície externa do duto está em contato com fluidos em movimento. Haverá convecção quando existir um gradiente de temperatura entre as superfícies do duto e o fluido que está em contato com elas.

Perda de calor por convecção interna

Esse fenômeno depende de qual fluido está sendo escoado, da velocidade do escoamento e do diâmetro do tubo. Há uma análise adimensional proposta por Dittus e Boelter [7] para sistemas de transportes de fluidos. Essa contribuição é válida se considerarmos que o escoamento encontra-se no regime turbulento ($Re > 2100$) e que há apenas uma fase do fluido.

Para o caso de projeto de um duto, é interessante saber a relação entre as propriedades que regem o fenômeno físico e a contribuição de cada uma.

$$Nu_i = 0.0255 \cdot Re_i^{0.8} \cdot Pr_i^n \quad (2-11)$$

Onde,

$$Nu_i = \frac{h_i D_i}{k_f} \quad (2-12)$$

$$Re_i = \frac{D_i V_f \rho_f}{\mu_f} \quad (2-13)$$

$$Pr_i = \frac{c_{pf} \mu_f}{k_f} \quad (2-14)$$

n : 0,3 se o fluido está sendo resfriado e 0,4 se o fluido está sendo aquecido

h_i : Coeficiente de convecção interna (W/(m².K))

D_i : Diâmetro interno do tubo (m)

k_f : Condutividade térmica do fluido escoado (W/(m.K))

V_f : Velocidade do fluido (m/s)

ρ_f : Densidade do fluido (kg/m³)

μ_f : Viscosidade do fluido (g/(cm.s))

C_{pf} : Calor específico do fluido interno (J/(kg.K))

[8]. Em caso de escoamento laminar ($Re < 2100$), podemos usar a equação de Hausen

$$Nu_i = 3.66 + \frac{0.0668 \left(\frac{D_i}{L_o} \right) Re_i Pr_i}{1 + 0.4 \left[\left(\frac{D_i}{L_o} \right) Re_i Pr_i \right]^{2/3}} \quad (2-15)$$

Onde L_o é a distância a partir da entrada do fluido até o ponto de interesse. Na maioria dos casos a fração $\frac{D_i}{L_o}$ tende a zero, fazendo com que $Nu_i = 3,66$.

Tabela 8 – Coeficientes convectivos típicos para escoamento turbulento [6]

Fluido	Coeficiente de convecção interna h_i (W/(m ² .K))
água	1700-11350
gases	17-285
óleos	55-680

Tabela 9 – Condutividade típica para óleo cru e hidrocarbonetos na fase líquida [6]

Temperatura	-18°C	93°C
Gravidade API	W/(m.K)	W/(m.K)
10	0,118	0,111
20	0,128	0,119
30	0,135	0,128
40	0,144	0,135
50	0,152	0,144
60	0,161	0,152
80	0,178	0,168
100	0,192	0,182

Utilizando a equação de Newton podemos calcular a taxa de calor trocado por convecção no interior do flowline.

$$Q_i = A_i \cdot h_i \cdot \Delta T = 2\pi r_i L h_i (T_i - T_1) \quad (2-16)$$

Onde

Q_i : Taxa de transferência de calor por convecção (W)

h_i : Coeficiente de convecção interna (W/(m².K))

L : Comprimento do duto

r_i : Raio interno

A_i : Área interna

T_i : Temperatura do fluido interno

T_1 : Temperatura da superfície interna do flowline

Perda de calor por convecção externa

Proposto por Hilpert (1993), a correlação de convecção externa média é vastamente utilizada na indústria de equipamentos submarinos.

$$Nu_o = C Re_o^m Pr_o^{1/3} \quad (2-17)$$

Onde,

$$Nu_o = \frac{h_o D_o}{k_o} \quad (2-18)$$

$$Re_o = \frac{D_o V_{f o}}{\mu_o} \quad (2-19)$$

$$Pr_o = \frac{c_{p o} \mu_o}{k_o} \quad (2-20)$$

h_o : Coeficiente de convecção externa (W/(m².K))

D_o : Diâmetro externo do tubo (m)

k_o : Condutividade térmica do fluido externo (W/(m.K))

V_o : Velocidade do fluido externo (m/s)

ρ_o : Densidade do fluido externo (kg/m³)

μ_o : Viscosidade do fluido externo (g/(cm.s))

$c_{p o}$: Calor específico do fluido externo (J/(kg.K))

C, m: Constantes dependentes do número de Reynolds (listadas na tabela 12)

Tabela 10 – Valores das constantes C e m [6]

Re ext	C	m
0,4 – 4	0,989	0,330
4 – 40	0,911	0,385
40 – 4000	0,683	0,466
4000 – 40000	0,193	0,618
40000 - 400000	0,027	0,805

Utilizando a equação de Newton podemos calcular a taxa de calor trocado por convecção no exterior do duto.

$$Q_o = A_o \cdot h_o \cdot \Delta T_o = 2\pi r_o L h_o (T_A - T_o) \quad (2-21)$$

Onde

Q_o : Taxa de transferência de calor por convecção (W)

h_o : Coeficiente de convecção externa (W/(m².K))

L : Comprimento do duto

r_o : Raio externo

A_o : Área externa

T_o : Temperatura do fluido externo

T_4 : Temperatura da superfície externa do flowline

2.2.5. Coeficiente de troca térmica global (U-value)

Uma maneira astuta de se calcularem as trocas térmicas entre uma estrutura submarina e o meio é através do U-value. Trata-se de artifício que engloba as perdas por condução e convecção ao longo de todo comprimento do duto.

A grande vantagem deste artifício é que torna-se mais fácil comparar diferentes opções de isolamento.

Suponhamos uma estrutura genérica de acordo com a Figura 21:

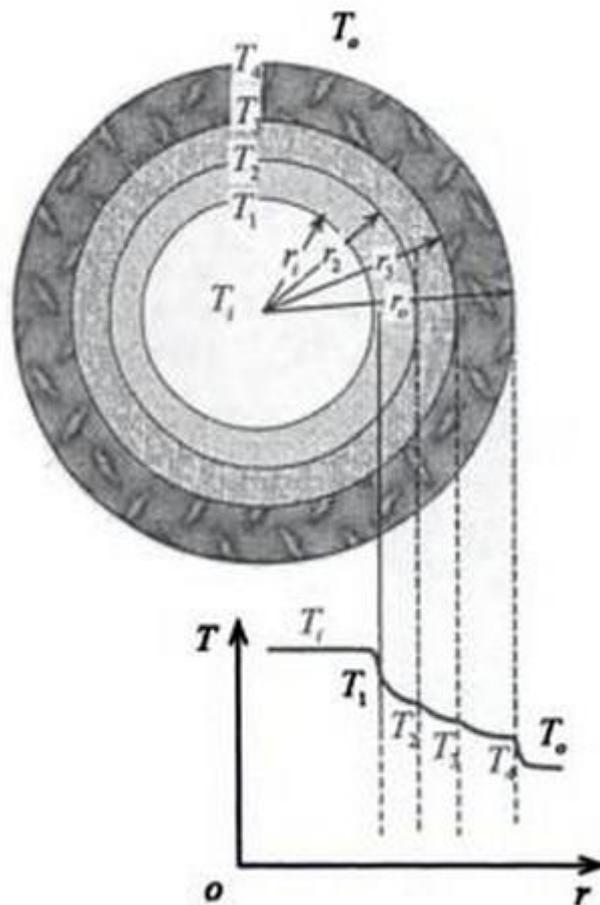


Figura 21 – Distribuição de temperatura ao longo de um flowline duplamente isolado

Há uma camada de aço e duas camadas de isolamento térmico. Com o U-value é possível escrever a perda de calor radial do duto apenas em função da área de troca de calor e dos valores das temperaturas do fluido interno e externo.

$$Q_r = UA(T_i - T_o) \quad (2-22)$$

O valor de U-value é composto pela soma dos resultados das trocas térmicas por convecção e condução. Neste caso o U-value contará com duas parcelas provenientes das trocas de calor por convecção e três parcelas advindas das trocas de calor por condução.

Com isso temos que a taxa de troca de calor global é

$$Q_r = \frac{T_i - T_o}{\frac{1}{2\pi r_i L h_i} + \frac{\ln(r_1/r_i)}{2\pi k_1 L} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi k_2 L} + \frac{\ln(r_o/r_2)}{2\pi k_3 L} + \frac{1}{2\pi r_o L h_o}} \quad (2-23)$$

No caso do duto sanduíche teremos a mesma equação. A diferença é que o duto sanduíche possui duas camadas de aço e uma de isolamento. Portanto, o valor do U-value do duto sanduíche fica definido pela equação 2-23

A temperatura do fluido transportado é importante na definição do U-value por conta de dois fatores. Primeiramente, a troca de calor é proporcional ao gradiente de temperatura, vide equação (2-23), portanto o valor do coeficiente de troca térmica global necessário para um projeto depende da temperatura em que o fluido sai do reservatório.

As trocas de calor de um duto submarino são feitas por meio de condução e convecção, o que torna importante sabermos a velocidade do fluido para determinar o quanto de calor é trocado por convecção. Além disso, o regime do escoamento interfere na troca de calor por convecção.

Outro motivo pelo qual é necessário um estudo de caso é a composição do fluido. A composição de água, óleo e gás interferem no regime de trocas de calor do duto.

Softwares como o OLGA e PIPESIM utilizam a mesma metodologia de cálculo para considerar a resistência térmica provida pelo solo, calculam um fator de troca térmica [W/m².K], que deve ser somado ao coeficiente global de troca térmica do duto. Caso o duto esteja parcialmente enterrado deve-se considerar fatores de redução e também considerar as trocas com o a água do mar. Cada tipo de solo possui diferentes valores de condutividade térmica. Segundo a publicação Subsea Pipelines and Risers [6] a areia molhada tem condutividade térmica variando entre 0,43 e 0,69 W/m.K.

2.2.6. U-value em sistemas existentes

Melve [10] dividiu os tipos possíveis de isolamento térmico em três categorias.

Tabela 11 – Isolamentos apropriados em função da temperatura [10]

Categoria	Mínimo (°C)	Máximo (°C)	Isolamento apropriado
Temperatura baixa	-10	70	Poliuretano, Polipropileno, Espuma sintética a partir de epoxy e poliuretano
Temperatura média	70	120	polipropileno, Espuma sintética de epoxy
Temperatura alta	120	200	sistemas de polipropileno, Espumas fenólicas, PiP com espuma de poliuretano, materias inorgânicos de isolamento

Loch [11] forneceu os valores de U-value para dutos de parede simples e PiP isolados com polipropileno sintático.

Tabela 12 – Coeficiente de troca térmica global para diferentes casos de duto de parede simples [6]

Duto simples	U value [W/(m².K)]	
Diâmetro externo (pol.)	Tubo sem isolamento	Isolamento de PPF (t= 50mm, k = 0,17 W/(m.K))
4,5	871	4,65
8,625	544	4,04
12,175	362	3,81

Tabela 13 – Coeficiente de troca térmica global para diferentes casos de duto PiP [6]

Duto PiP		U value [W/(m².K)]
Diâmetro externo (pol)	Diâmetro interno (pol)	Isolamento de PPF (k = 0,17 W/(m.K))
8,625	4,5	1,56
12,75	8,625	1,44
18	12,175	1,02

McKechnie e Hayes [12] documentaram diferentes pipelines em operação e fizeram um gráfico (figura 22) que relaciona o seu comprimento com seu coeficiente global de troca térmica.

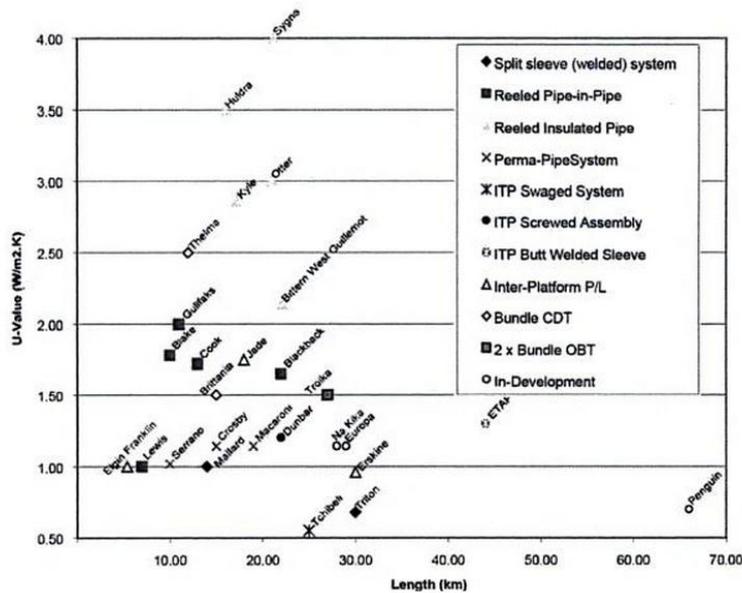


Figura 22 – Coeficiente de troca térmica global encontrado para diferentes aplicações [12]

Os valores que nos interessam são apenas os de dutos submarinos. Não é possível saber, a partir do trabalho publicado, qual a origem dos pipelines. Entretanto é possível garantir que a categoria de “Reeled Pipe-in-Pipe” é de grande importância para o projeto, pois se adequa ao escopo do trabalho.

Há cinco casos desta categoria, podemos vê-los na Figura 23. Todos os pontos se encontram entre 1 e 2, para o valor de U.

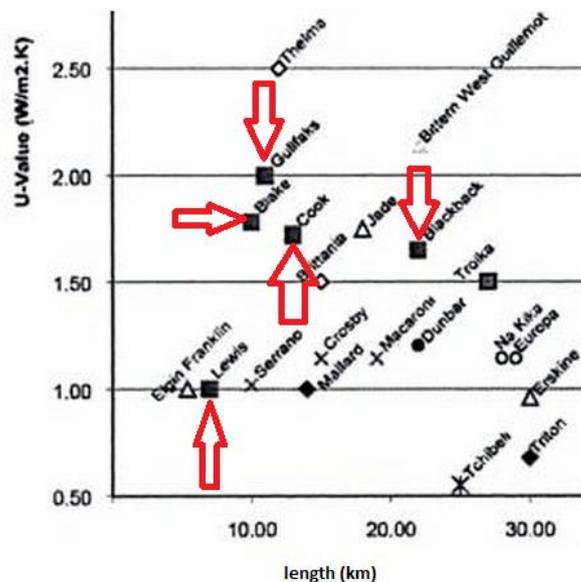


Figura 23 – Coeficiente de troca térmica global encontrado para diferentes projetos de pipelines

Grealish and Roddy [13] publicaram a faixa de valores para coeficiente térmicos globais atingíveis.

Tabela 14 – Valores atingíveis de coeficiente de troca térmica global

Método para controle de temperatura	Faixa de U-value (W/m ² .K)
Isolamento externo integral (incluindo multicamadas)	1.7 - 5
Módulos de isolamento	2.0 - 8.0
Isolamento térmico para sistema PiP	0.3 - 2.0

2.3. Métodos de Instalação de Dutos Submarinos

2.3.1. Embarcações PLSV (Pipe Laying Support Vessels)



Figura 24 – Navios PLSVs J-Lay e S-lay respectivamente

São os navios que são utilizados para fazer o lançamento das linhas, Figura 24. Eles são específicos para cada tipo de lançamento. O navio utilizado depende da lâmina d'água, do tipo do duto a ser lançado, da capacidade de carga do navio e do diâmetro da linha.

2.3.2. Método S-lay

Esse método tem esse nome pois os dutos quando são lançados acabam por ficar com a forma de “S”, como vemos abaixo. No método S-lay apenas dutos rígidos são lançados, e eles chegam em tramos na embarcação. Os inúmeros tramos são soldados a bordo e são lançados como uma linha contínua.

2.3.2.1. Elementos envolvidos na construção submarina pelo método S-lay

A figura 25 mostra os principais elementos envolvidos nesta situação.

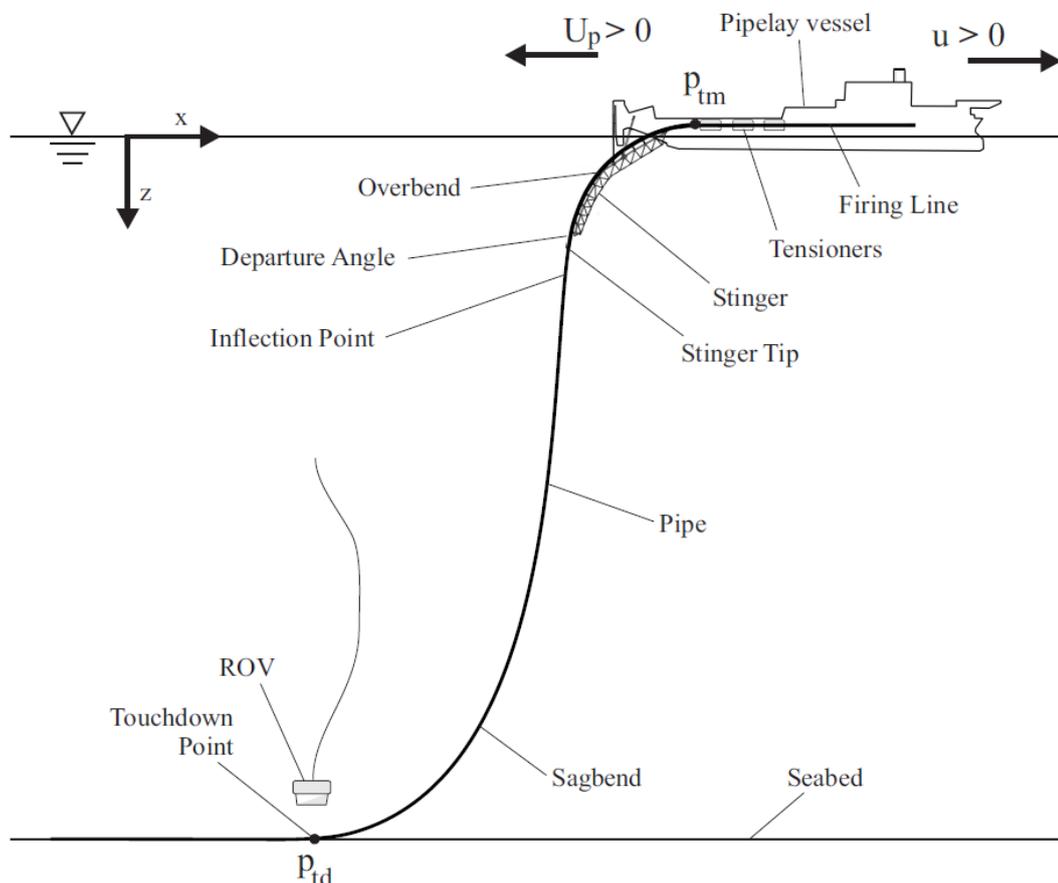


Figura 25 - Esquema de construção submarina pelo método S-lay, Jensen [14]

- Firing Line: Nome dado aos tramos soldados dentro da embarcação
- Overbend: Região onde o duto sofre momento e tração. A parte superior do duto está sendo tracionada e a parte inferior está sendo comprimida.
- Sagbend: Região onde o duto sofre momento e tração. A parte superior do duto está sendo comprimida e a parte inferior está sendo tracionada
- Inflection point: Ponto da linha em que muda a concavidade.
- Tensioners: São os tensionadores. Equipamentos que seguram a linha e faz o lançamento controladamente.
- Stinger: Estrutura treliçada usada para lançar os dutos
- Stinger Tip: É a extremidade do stinger

- Departure Angle: É o ângulo em que o duto abandona o stinger. É medido em relação com a linha d'água
- ROV: É um veículo submersível operado remotamente que é usado para inspecionar a operação.
- Pipe: É o duto que está sendo lançado
- Seabed: Trata-se do leito marinho.
- Touchdown Point: Ponto crítico, no qual há maior tensão na linha. É quando o duto encosta no leito mar.
- u: Velocidade de avanço da embarcação
- Up: Velocidade de lançamento da linha

O Stinger



Figura 26 - Navio PLSV S-lay com Stinger



Figura 27 - Vista a ré de navio PLSV S-lay

O stinger é uma estrutura treliçada localizada a ré da embarcação (Figuras 26 e 27) que tem como função proporcionar um ângulo de lançamento favorável para fazer o lançamento dos dutos. As linhas saem das estações de solda e vão direto para o stinger.

O comprimento do stinger está diretamente relacionado com o tipo de duto que será lançado e com a lâmina d'água. Quanto maior for a tensão de escoamento do material do duto menor pode ser o raio do stinger. E com um maior comprimento é possível obter um menor raio de curvatura.

Outro fator importante que permite variar fortemente o raio de curvatura é o número de articulações. O comum é que haja uma ou duas articulações. Quanto maior o número de articulações, mais elaborado é o projeto do stinger.



Figura 28 – Duto sendo lançado com auxílio de stinger

Estocagem da carga para lançamento pelo método S-lay

A carga chega por transbordo (Figuras 29 e 30). Grande parte do espaço de uma embarcação S-lay é destinada às estações de trabalho. Há estações de soldagem, aplicação de coating e de verificação. Devido a isso, não possui grande quantidade de carga estocada (Figura 31). É necessário que haja um suprimento constante da embarcação.

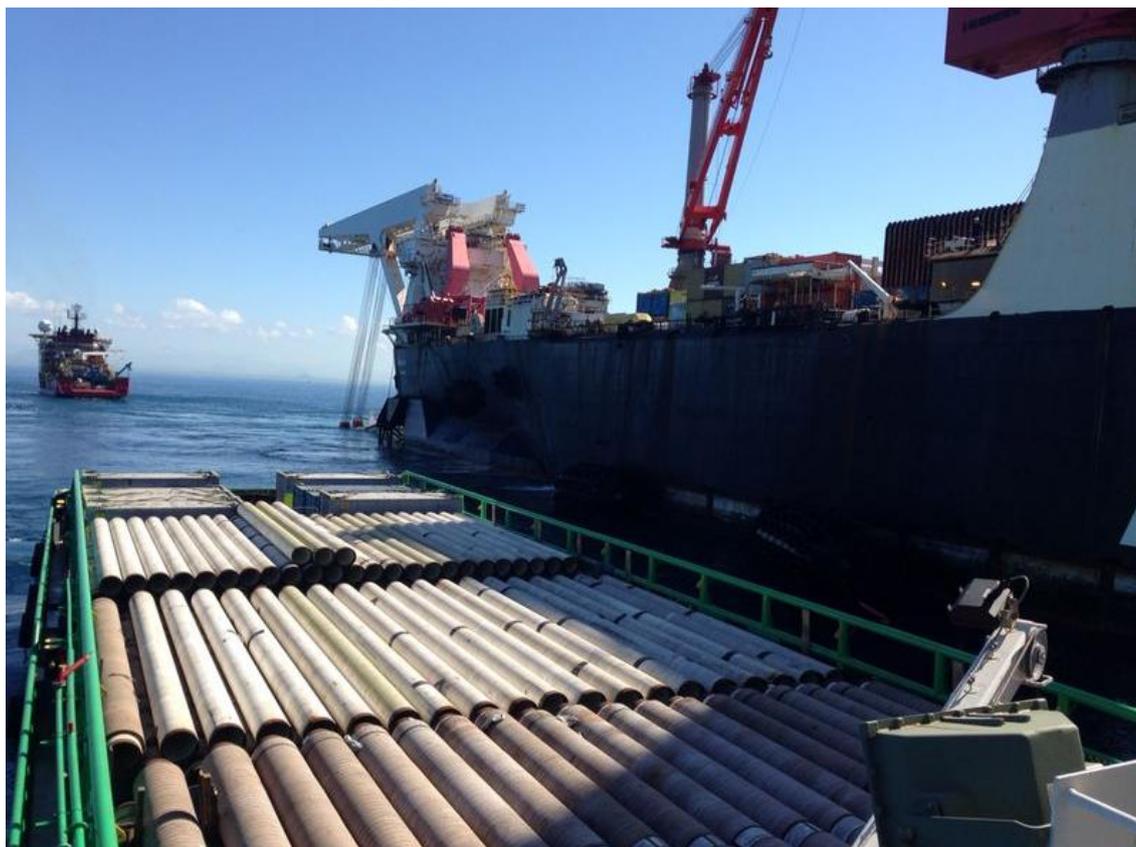


Figura 29 – Embarcação PLSV S-lay sendo suprida



Figura 30 – Transbordo de carga de navio supridor para navio PLSV S-lay



Figura 31–Carga estocada dentro de embarcação PLSV S-lay

Estações de Trabalho Dentro de uma Embarcação PLSV S-lay

Os dutos seguem do porão para as firing-lines (Figura 32) e lá são soldados (Figura 33) e verificados, além de terem o coating das uniões aplicados (Figura 34).



Figura 32 – Compartimento das estações de trabalho em navio PLSV S-Lay



Figura 33 - Operação de soldagem de dutos



Figura 34 - Aplicação do revestimento na conexão entre dois tramos

2.3.2.2. Esforços no Duto na construção submarina pelo método S-lay

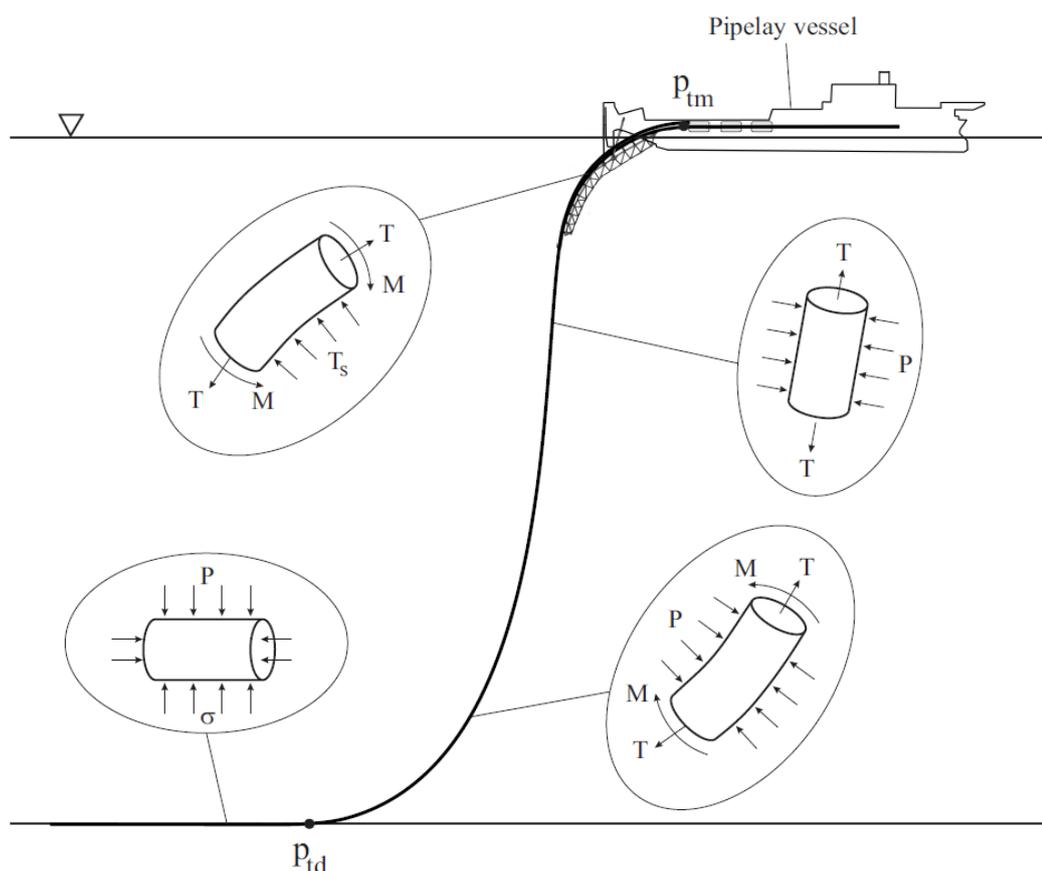


Figura 35 - Comportamento mecânico do duto durante o lançamento S-lay, Jensesn [14]

A Figura 35 apresenta os esforços no duto durante o lançamento pelo método S-lay. Primeiramente o duto passa pelo stinger e começa a fletir por causa de seu próprio peso e de sua rigidez. A parte superior encontra-se tracionada e a parte inferior encontra-se comprimida. Após do ponto de inflexão há uma parte que o duto enxerga apenas tração e pressão hidrostática.

Após essa parte ele flete devido ao peso da linha de forma a tracionar o fundo e comprimir a parte superior. Então o duto toca o leito marinho e conforme o navio avança ele vai se acomodando no leito marinho.

A combinação de flexão e tração faz com que a carga na seção do duto seja altíssima, fazendo com que as regiões de sagbend e overbend sejam mais críticas do que a região em que o duto só experimenta tração.

É importante comentar também que a região próxima ao touch down point é a região mais crítica, pois é onde o raio de curvatura é menor.

O método de lançamento S-lay é indicado para águas rasas e intermediárias. Há situações em que esse método é empregado para lançar linhas em águas profundas, porém não é usual. Há outros métodos mais adequados par fazer essa operação.

2.3.3. Método J-lay

O método J-Lay tem esse nome porque os dutos, ao serem lançados, ficam com uma configuração parecida com a letra “J”, como pode ser visto na Figura 38. Este método lança principalmente dutos flexíveis e é aplicado em águas profundas.

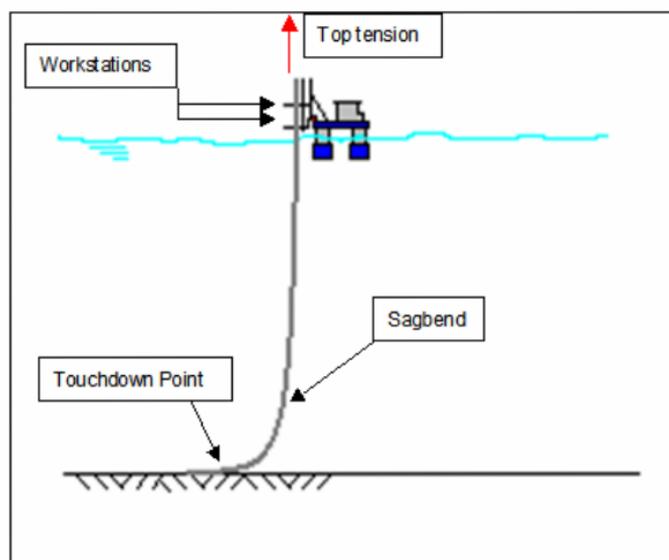


Figura 38 - Ilustração do método J-Lay.

Assim como no método S-Lay, todo o processo de montagem do duto é realizado na embarcação com abastecimento de material proveniente de embarcações de suporte. A montagem é feita em estações de trabalho localizadas na torre de lançamento, e devido à necessidade de soldagem da tubulação na posição vertical, é o método de instalação de linhas mais lento. Um dos complicadores do projeto deste barco é o *Moonpool*, por onde é realizado o lançamento.

2.3.3.1. Elementos envolvidos na construção submarina pelo método J-lay

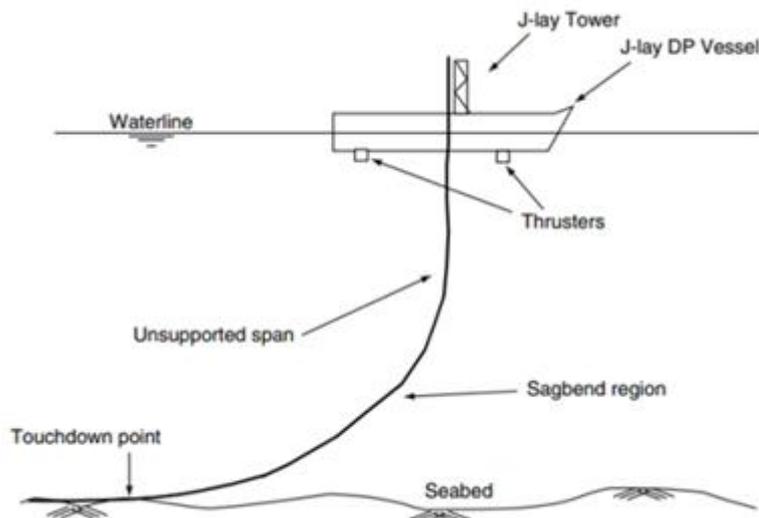


Figura 39 – Esquema de construção submarina pelo método J-Lay, Jensen [14]

Os elementos envolvidos no lançamento J-Lay podem ser vistos na Figura 39 e são praticamente os mesmos do S-Lay e os pontos diferentes são:

- O lançamento é praticamente vertical, com ângulo variando de 0° a 15° .
- Pelo fato de o lançamento ser na posição vertical, o uso do stinger é dispensado e a região de overbend não existe (A ausência da região de overbend é o grande motivo pelo qual este método foi desenvolvido principalmente para águas profundas).
- Utilização da torre de lançamento, onde as operações de construção são feitas com o duto na posição vertical.
- Presença de *Moonpool* na embarcação, por onde os dutos são lançados.

Torre de Lançamento

Uma característica particular do lançamento J-Lay é a torre de lançamento (Figura 42). Para que os dutos possam ser lançados na posição vertical, eles são içados verticalmente para a torre e, dentro dela, estão as estações de trabalho onde são feitos o alinhamento, a soldagem, a inspeção e o revestimento. Para aumentar a produtividade e reduzir o tempo de instalação, algumas otimizações vêm sendo desenvolvidas e utilizadas, tais como o sistema de soldagem e inspeção automáticos (Figura 40).

A torre traz também uma complicação. Ela eleva muito o centro de gravidade da embarcação, podendo torná-la instável em diversas condições. Para contornar este problema, as

semi-submersíveis, que são naturalmente mais estáveis, são frequentemente utilizadas no lançamento pelo método J-Lay, um exemplo disto é apresentado na figura 41.



Figura 40 - Embarcação com torre para lançamento J-Lay.



Figura 41 - Saipem 7000 – Semi-sub com torre para lançamento J-Lay.

O Sistema de Lançamento é composto dos seguintes itens:

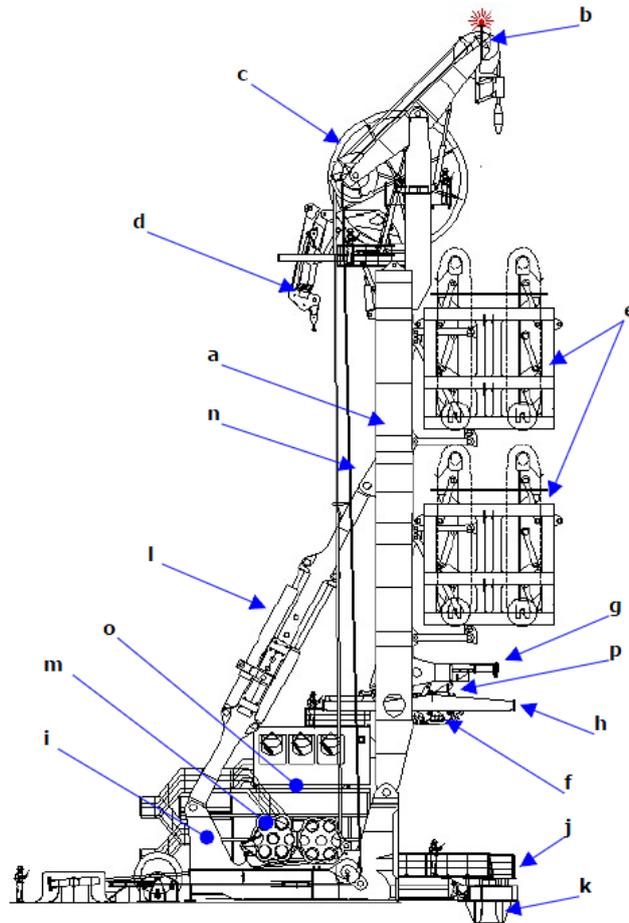


Figura 42 – Componentes do sistema de lançamento J-lay

- a) Estrutura da Torre;
- b) Conjunto de Polias de A&R;
- c) Roda tipo Raio Controlado;
- d) Guindaste auxiliar SWL 15t no topo da Torre;
- e) Tensionadores (2x) - SWL 170t cada;
- f) Track Passivo (raio = 3,7m);
- g) Centralizador de Cabo;
- h) Monovia;
- i) Estrutura de Apoio e Articulação da Torre (Base frame);
- j) Mesa de Trabalho;
- k) Centralizador de Dutos (Tulipa);
- l) Ajustadores de Inclinação da Torre (Adjusters);
- m) Guincho de A&R SWL 360t;
- n) Guincho de A&R SWL 125t;
- o) Sistema de Controle;
- p) Olhais de Transferencia de Carga.

Moonpool

O *Moonpool* (Figura 43) é uma particularidade das embarcações que lançam dutos pelo método J-Lay. Ele nada mais é do que uma abertura no fundo do casco que permite a passagem do duto a partir da torre de lançamento, como podemos ver na Figura 44.



Figura 43 - Ilustração do *Moonpool* de um navio sonda

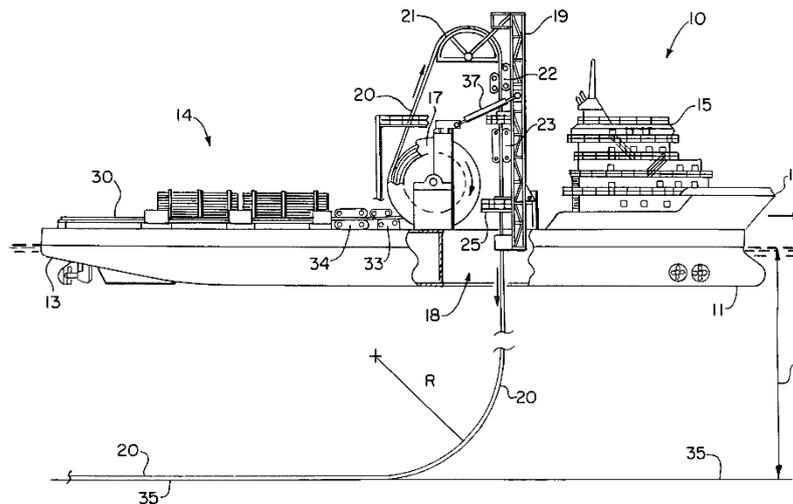


Figura 44 - *Moonpool* (número 18) de uma embarcação que lança dutos pelo método J-Lay

2.3.3.2. Vantagens e Desvantagens do método J-lay

As principais vantagens do método J-Lay são:

- É possível atingir o assoalho submarino com menos comprimento de duto que no método S-lay. Com menos linha suspensa você consegue que as tensões no topo sejam menores.
- Não há região de overbend

- O ponto de touchdown não está tão distante da embarcação quanto no S-Lay, devido à menor tensão envolvida, então o posicionamento do touchdown é mais fácil e os dutos podem ser instalados de maneira mais acurada.
- Não é necessário utilizar ferramentas especiais submarinas, tais como tratores para montagem de linha.
- A complexidade do stinger horizontal é eliminada, já que os dutos são lançados praticamente na posição vertical, como já foi citado.

As principais desvantagens do método J-Lay são:

- É um método com velocidade de lançamento menor que o S-lay, pois devido a configuração do sistema de lançamento vertical, há apenas uma estação de trabalho. Portanto, ao invés de ter uma linha de produção, há apenas uma estação de trabalho, o que diminui a produtividade da operação.
- A piora na estabilidade devido ao peso adicionado pela torre de lançamento, que eleva o centro de gravidade.

2.3.3.3. Esforços no Duto na construção submarina pelo método S-Lay

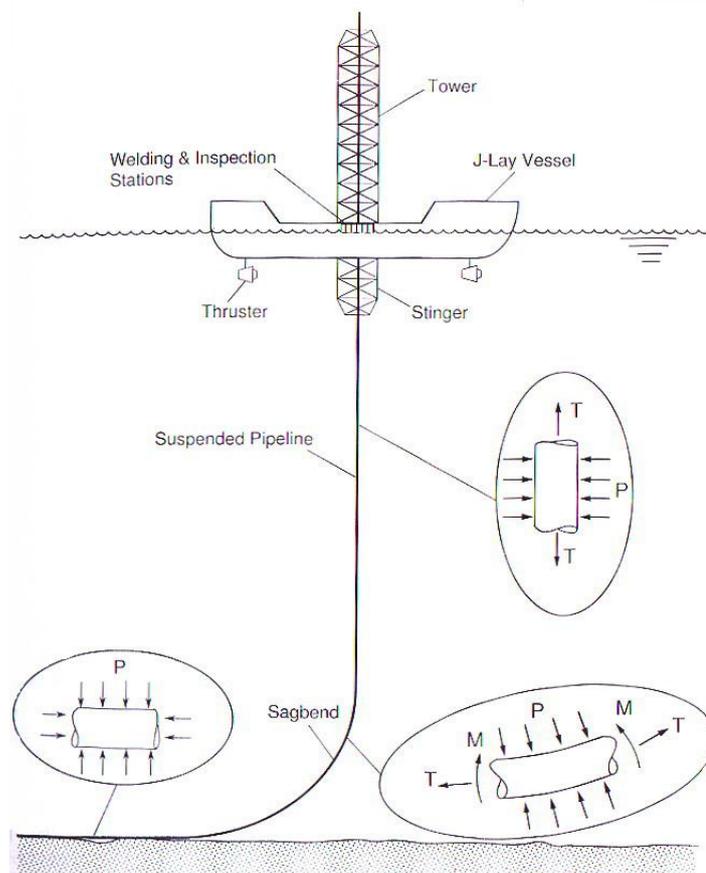


Figura 45 - Ilustração das tensões aplicadas no duto no lançamento J-Lay, Jensen [14]

No método J-Lay os esforços no duto (Figura 45) são bem parecidos com os do método S-Lay, já explicado. A única diferença é que, como o duto é lançado verticalmente, ele experimenta apenas tração e pressão hidrostática. Depois disso, na região de sagbend, o duto flete devido ao peso da linha de forma a tracionar o fundo e comprimir a parte superior. E então o duto toca o leito do mar e se acomoda.

Da mesma maneira que no S-Lay, a combinação de flexão e tração fazem com que a carga na seção do duto seja muito alta, tornando a região de sagbend mais crítica do que a região em que o duto só enxerga tração.

É digno de nota mencionar que apesar de essa configuração não apresentar overbend, a região do sagbend é muito mais crítica do que no S-lay, pois o raio de curvatura é muito menor. O motivo do raio ser tão pequeno é que o peso da linha fica apoiado no touch down point, que fica a uma distância longitudinal pequena da torre de lançamento.

2.3.4. O Método Reel lay

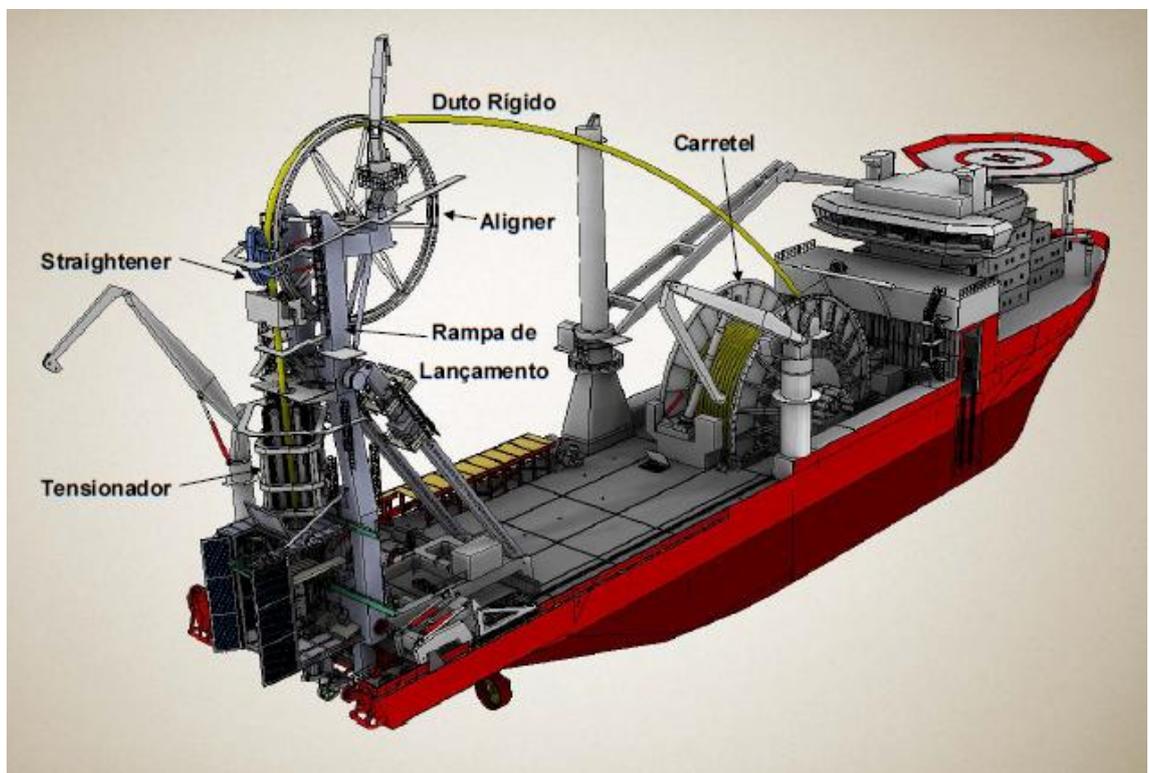


Figura 46 – Equipamentos utilizados por um PLSV para lançar dutos pelo método Reel lay, Charnaux [15]

Esse método é caracterizado pelo armazenamento em cestas, carretéis ou bobinas dos dutos que serão lançados, vide Figura 46. A diferença é que as bobinas (Figura 47) são carregadas nas fábricas dos dutos, e então carrega-se a bobina com os dutos rígidos ou flexíveis para dentro do navio.



Figura 47 - Bobinas carregas prontas para serem embarcadas

As cestas ou carretéis (figura 48) são equipamentos dos navios PLSVs que armazenam os dutos que são fabricados e transferidos para a embarcação através das spoolbases (Figura 49).



Figura 48 - Carretel de um navio sendo carregado em uma spoolbase

O método S-lay e J-lay trabalham com estações de trabalho para a produção da linha contínua a ser lançada, já o método Reel lay recebe a linha contínua já pronta e a armazena em cestas ou carretéis.



Figura 49 – Spoolbase

3. REGRAS DE PROJETO PARA DUTOS RÍGIDOS

3.1. A física do problema

Durante a instalação, comissionamento, operação ou recolhimento, os dutos submarinos podem estar sujeitos a situações onde a pressão externa excede a pressão interna ou ao contrário. A pressão diferencial agindo nos dutos submarinos pode causar a explosão ou o colapso destas estruturas. Para evitar que isso aconteça é necessário levar em consideração o material do duto, a geometria, as propriedades químicas do duto e dos produtos transportados, o método de fabricação, o método de armazenamento e o método de instalação.

As regras de projeto comerciais para PIP consideram que a pressão externa é suportada exclusivamente pelo duto externo, e a pressão interna é suportada apenas pelo duto interno, e a camada anular tem como função prover isolamento térmico. No caso dos dutos sanduíche a camada anular também colabora com resistência estrutural, todavia não existem regras de projeto pois se trata de uma tecnologia emergente.

A variação da pressão na linha e a variação da lâmina d'água em que o duto se encontra é recorrente devido a manobras de engenharia de reservatório e ao caminho que um duto segue no leito marinho. O pipeline não é um segmento único de dutos, ele é separado por tramos conectados entre si por acessórios chamados conectores, um exemplo de conector pode ser visto na Figura 50.



Figura 50 - Conector submarino

A pressão de projeto utilizada é sempre a pressão decorrente da maior profundidade encontrada no tramo. Não se utiliza uma espessura única ao longo da linha toda, pois a diferença de lâmina d'água no caminho de um pipeline pode variar centenas de metros, vide Figura 51.

Para o caso do tramo 2 temos:

$$P_i(h) = P_d(H_{max}) * \gamma - (\rho_{int} * g * h + P_o) \quad H_1 \leq h \leq H_{max} \quad (4-1)$$

Sendo:

P_i : Pressão interna [N/mm^2]

$P_d(H_{max})$: Pressão de projeto em função da altura máxima de coluna d'água [N/mm^2]

P_o : Pressão de operação da linha [N/mm^2]

γ : Fator de segurança

ρ_{int} : Densidade do fluido interno [kg/m^3]

g : Aceleração da gravidade [m/s^2]

h : Altura da coluna d'água em determinado ponto [m]

H_1 : Altura da coluna d'água no ponto da conexão flowline x flowline [m]

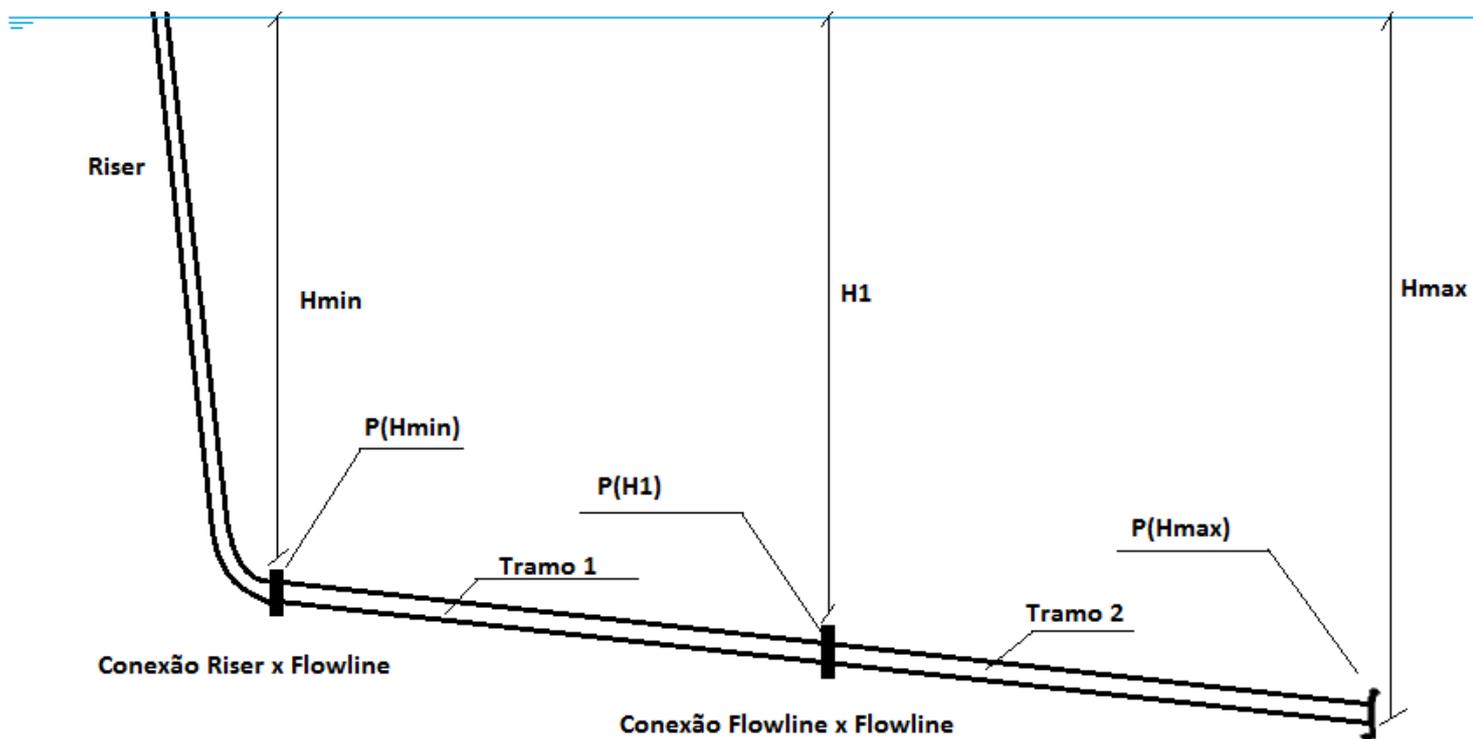


Figura 51 - Rota de um pipeline

$$P_e(h) = \rho_{sw} * g * h \quad (4-2)$$

Sendo:

$P_e(h)$: Pressão externa em função da altura de coluna d'água [N/mm^2]

ρ_{sw} : Densidade da água do mar [kg/m^3]

g: Aceleração da gravidade [m/s^2]

h: Altura de coluna d'água em determinado ponto [m]

3.2. Regras de projeto disponíveis

3.2.1. API RP 1111, "Design, Construction, Operation and Maintenance of Offshore Hydrocarbon Pipelines (Limit State Design)"

Esta regra [16] data de 1999 e apresenta valores menos conservativos do que os valores do DnV, e fornece metodologias para cálculos de acordo com diferentes critérios.

A espessura da parede do duto interno deve resistir à pressão de operação e dos testes de comissionamento, como teste de pressão hidrostática, teste de vazamento e teste de sobrepressão acidental. Em uma situação de projeto real o valor máximo deve ser usado, entretanto neste trabalho usaremos a espessura proveniente do critério de pressão de operação, seção 4.3.1 da regra.

No caso de instalação por meio do método de carretel, o critério a ser verificado é o critério de Flexão, seção 4.3.2.2 da regra. Esta regra usa a teoria de flexão pura de viga com material isotrópico. Assume-se que as seções planas permanecem planas, o que faz com que seja possível obter as deformações a partir de simples considerações geométricas. Neste caso, o critério precisa ser aplicado para os dutos externos e internos.

O critério utilizado para o colapso externo encontra-se na seção 4.3.2.1 da regra, e considera a pressão externa máxima de operação com o duto vazio e internamente despressurizado (situação de instalação).

Também existe o critério de propagação de colapso (4.3.2.3), que faz com que seja necessária a aplicação de buckle arrestors (Figura 52) caso o duto seja reprovado neste critério.



Figura 52 - Buckle arrestor

3.2.2. DnV OS-F101, "Offshore standard OS-F101 - Submarine Pipeline Systems (2007)"

Esta regra [17] apresenta valores mais conservativos, com espessuras maiores tanto para os dutos internos e externos. Trata-se de uma regra mais atual com critérios mais rigorosos.

Para o duto interno aplica-se o critério 5D 200, que leva em consideração o estado limite do escoamento e de explosão. A espessura selecionada é a maior entre as espessuras calculadas com as pressões dos testes de comissionamento e de operação.

Caso o projeto demande instalação por carretel, o critério de deslocamento controlado (5D 608) é aplicável para evitar o colapso durante o enrolamento e desenrolamento. Este critério também é obtido a partir da Teoria de Flexão Pura de um material isotrópico, entretanto é aqui que encontra-se a maior discrepância entre as espessuras da regra API RP 1111 e DnV OS-F101(2007).

Para o colapso devido à pressão externa, também utiliza-se a condição mais crítica, da linha vazia e despressurizada, com a profundidade máxima. O critério de colapso devido à pressão externa 5D 401/402 se aplica nos dutos externos, e neste caso considera-se a ovalização do duto de acordo com seu método de fabricação e de lançamento.

Ainda para o duto externo utiliza-se o critério de propagação de colapso. Para águas profundas e ultra profundas este critério faz com que o projeto fique excessivamente caro, portanto é recomendável o uso de *buckle arrestors*.

3.3. Critérios governantes para o caso de estruturas do tipo PiP

Tabela 15 – Critérios governantes e opcionais em função dos componentes

Componentes	Critério governante	Critério opcional
Duto interno	Pressão interna	Colapso (duto externo avariado) e Enrolamento
Duto externo	Pressão externa	Enrolamento e propagação de colapso

3.3.1. Critério de pressão externa segundo API RP 1111

As equações apresentadas na seção 4.3.2 da regra podem ser agrupadas em uma equação que pode ser utilizada para se determinar a espessura.

$$Pc^2 \cdot a^2 \cdot OD^6 + Pc^2 \cdot b^2 \cdot OD^2 \cdot t^4 - a^2 \cdot b^2 \cdot t^6 = 0 \quad (4-3)$$

Sendo:

a: 2* Tensão de escoamento mínima do material [N/mm²]

$$b: \frac{2 * E}{(1 - \nu^2)} [N/mm^2]$$

t: Espessura [mm]

OD: Diâmetro externo [mm]

Pc: Pressão de colapso [N/mm²]

E:Módulo de Young [N/mm²]

v: Coeficiente de Poisson

Após a solução do polinômio de sexta ordem, a espessura procurada é a raiz real de menor valor. Para obter a pressão externa ao qual o sistema encontra-se submetido, é necessário relacionar a pressão de colapso com a pressão externa por meio de um fator de colapso.

$$P_c = \frac{P_e}{f_0} \quad (4-4)$$

O valor de f_0 é 0,6 para tubos expandidos a frio, como tubos feitos pelo processo DSAW (Soldagem por arco submerso duplo). A Figura 53 ilustra esse processo de fabricação.



Figura 53 - Processo de soldagem DSAW

Já para tubos sem costura ou fabricados pelo processo ERW (soldagem por resistência elétrica), o fator de colapso é 0,7. A Figura 54 ilustra o processo ERW.

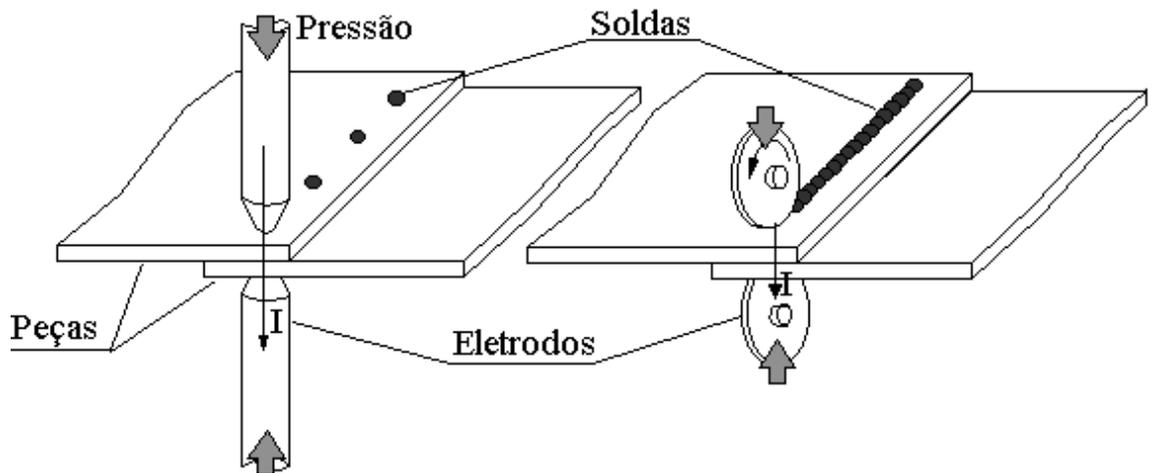


Figura 54 - Processo de soldagem ERW

Essa diferença ocorre devido ao fato de que os tubos expandidos a frio possuem menor resistência à compressão na direção circunferencial comparado à resistência à tração devido ao efeito Bauschinger. O aço ao ser deformado plasticamente a frio durante o processo de fabricação do duto aumenta sua resistência à tração e diminui sua resistência à compressão de acordo com a regra do DnV [16].

A espessura final é dada por:

$$t_{final} = t + \frac{t_{corr}}{1-ntol} \quad (4-5)$$

Onde:

t_{final} : Espessura final do duto [mm]

t : Espessura [mm]

t_{corr} : Espessura de corrosão admissível [mm]

$ntol$: Fator de tolerância de fabricação

3.3.2. Critério de pressão externa segundo DnV OS-F101 2007

Baseado na regra da seção 5 (D504), podemos expor o critério na forma:

$$Pc^3 \cdot OD^5 - Pc \cdot a^2 \cdot OD^3 \cdot t_{min}^2 - (Pc^2 \cdot b + Pc \cdot ov \cdot b \cdot a) \cdot OD^2 \cdot t_{min}^3 + b \cdot a^2 \cdot t_{min}^5 = 0 \quad (4-6)$$

Onde:

Pc : Pressão de colapso, $Pc = Pe \cdot \gamma_m \cdot \gamma_{sc}$ [N/mm²]

Pe : Pressão externa [N/mm²]

γ_m : Fator de resistência ao colapso (Tabela 5-4, seção 5 da regra)

γ_{sc} : Fator de classe de segurança de resistência (Tabela 5-5, seção 5 da regra)

OD: Diâmetro externo [mm]

t_{min} : Espessura obtida a partir da equação (4-6)[mm]

a: $2 \cdot (SMYS - f_{y,temp}) \cdot \alpha_{fab} \cdot \alpha_u$ [N/mm²]

SMYS: Tensão de escoamento mínima do material [N/mm²]

$f_{y,temp}$: Fator de redução de tensão de escoamento devido ao efeito da temperatura

α_{fab} : Fator de fabricação do material (Tabela 5-7, seção 5 da regra)

α_u : Fator de resistência de material (Tabela 5-6, seção 5 da regra)

b: $\frac{2 \cdot E}{(1 - \nu^2)}$ [N/mm²]

ov: Ovalização residual

A equação (4-6) fornece 5 raízes e o menor valor real é o valor da espessura desejada t_{min} .

$$t_{nom} = \frac{t_{min} + t_{corr}}{1 - ntol} \quad (4-7)$$

Onde:

t_{nom} : Espessura de regra [mm]

t_{corr} : Espessura de corrosão admissível

$ntol$: Fator de tolerância de fabricação

3.3.3. Critério de pressão interna segundo API RP 1111

De acordo com a regra de projeto 4.3.1, temos que a espessura de regra para que não ocorra explosão pode ser obtida a partir da equação abaixo:

$$t_{nom} = \frac{OD}{2} \cdot \left(1 - e^{\frac{-DP}{a}} \right) \quad (4-8)$$

Onde:

t_{nom} : Espessura de regra [mm]

OD: Diâmetro externo [mm]

DP: Pressão diferencial (interna menos externa) [N/mm²]

a: $f_c \cdot 0,45 \cdot f_d \cdot f_e \cdot f_t$

SMYS: Tensão de escoamento mínima do material [N/mm²]

SMTS: Tensão última mínima do material [N/mm²]

fc: Fator de condição de pressão (depende se é comissionamento, operação ou teste de sobrepressão)

fd: Fator de explosão de projeto (depende se é flowline ou riser)

fe: Fator de junta soldada

ft: Fator de redução de tensão de escoamento devido ao efeito da temperatura

Com isso temos que a espessura final é dada por:

$$t_{final} = t_{nom} + \frac{t_{corr}}{1-ntol} \quad (4-9)$$

Onde:

t_{final} : Espessura de regra [mm]

t_{corr} : Espessura de corrosão admissível

$ntol$: Fator de tolerância de fabricação

3.3.4. Critério de pressão interna segundo DnV OS-F101 2007

Ao recorrermos à seção 5, D400 da regra do Dnv, podemos determinar a espessura necessária para que a pressão diferencial não cause uma explosão.

$$t_{min} = \frac{OD \cdot \gamma_{sc} \cdot \gamma_m \cdot (P_i - P_e)}{2 \cdot C + \gamma_{sc} + \gamma_m \cdot (P_i - P_e)} \quad (4-10)$$

Sendo:

OD: Diâmetro externo [mm]

γ_m : Fator de resistência ao colapso (Tabela 5-4, seção 5 da regra)

γ_{sc} : Fator de classe de segurança de resistência (Tabela 5-5, seção 5 da regra)

Pi: Pressão interna [N/mm²]

Pe: Pressão externa [N/mm²]

$$C: \frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \max\left(f_y, \frac{f_u}{1,15}\right)$$

f_y : Fator de redução da tensão de escoamento devido à temperatura

f_u : Fator de redução da tensão de escoamento devido à temperatura

Agora resta apenas ajustar a espessura de acordo com a corrosão e a tolerância de fabricação:

$$t_{nom} = \frac{t_{corr} + t_{min}}{1 - ntol} \quad (4-11)$$

Onde:

t_{nom} : Espessura de regra [mm]

t_{corr} : Espessura de corrosão admissível

$ntol$: Fator de tolerância de fabricação

4. CORRELAÇÃO NUMÉRICO-ANALÍTICA

Os valores utilizados para a correlação serão os valores obtidos durante a pesquisa desenvolvida no Laboratório de Tecnologia Submarina da COPPE durante a graduação pelo autor enquanto fez parte de um grupo de pesquisa sobre Dutos Sanduíche.

O modelo numérico baseado no método de elementos finitos representa um Duto Sanduíche com anular de SHCC. Foi desenvolvido um modelo de 1/4 de anel com modelos tridimensionais no software ABAQUS, sua malha pode ser vista na Figura 55a. A curva de material utilizado (AISI 316) pode ser visto na figura 55b e o resultado de uma análise é apresentado na figura 55c.

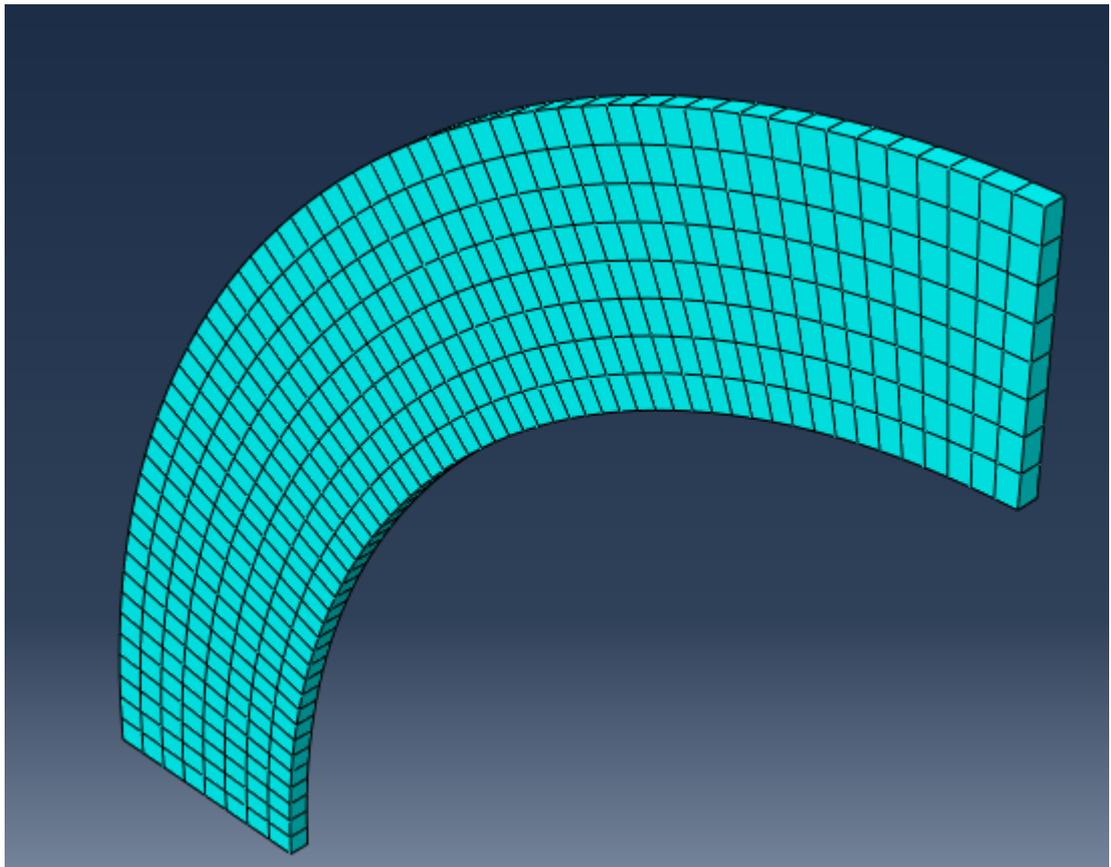


Figura 55a – Malha do modelo numérico

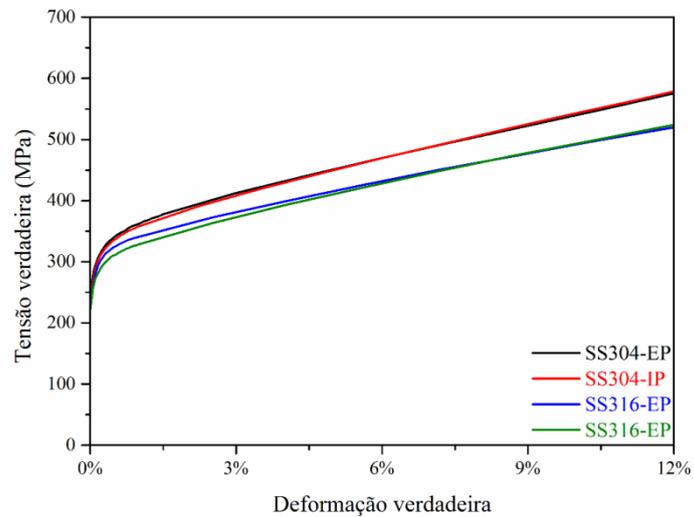


Figura 55b – Curva Tensão x Deformação dos aços AISI304 e AISI 316

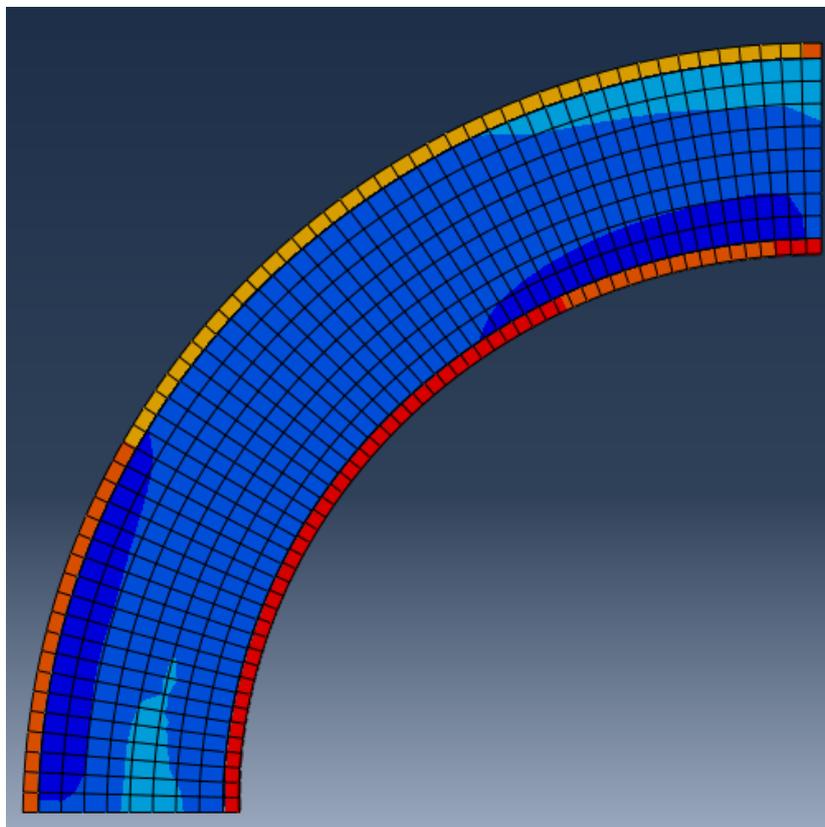


Figura 55c – Campo de tensões típico de um Duto Sanduíche sob pressão hidrostática

O acoplamento e as condições de simetria estão ilustrados nas Figuras 56 e 57. O acoplamento tem como intuito transmitir o carregamento de um nó central para os nós da seção transversal por meio da acoplação de seus graus de liberdade. A simetria foi utilizada para que tivéssemos um anel de duto sanduíche representado por um quarto de anel, para que economizar tempo de processamento.

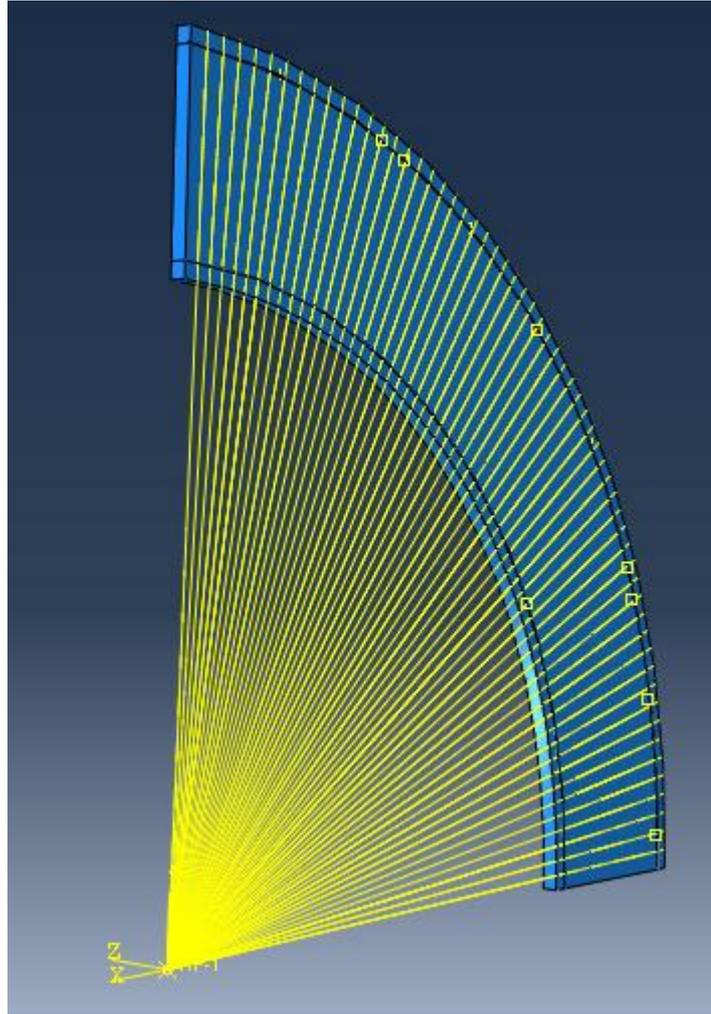


Figura 56 – Acoplamento do modelo

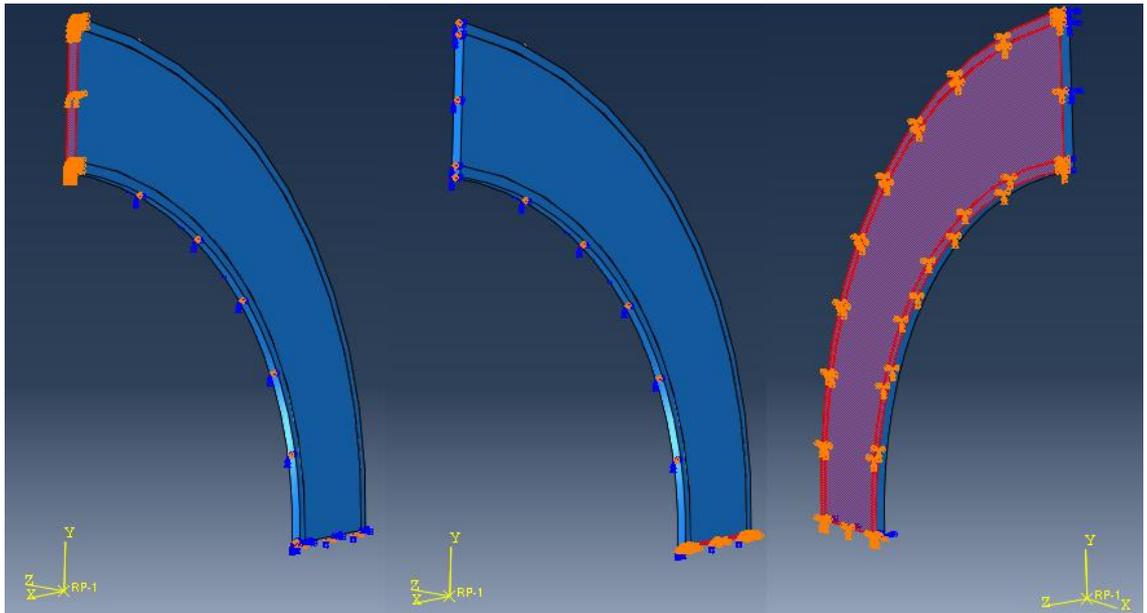


Figura 57 – Simetrias em x,y e z, respectivamente

O objetivo de fazer a correlação com os resultados analíticos (de acordo com a formulação de Castello [4]) é validar a comparação feita do Duto Sanduíche com os outros sistemas de transporte de fluidos submarinos. A correlação pode ser vista na Tabela 16. A discrepância entre os resultados varia de acordo com a geometria. A primeira geometria é proveniente do trabalho de An Chen [5], e as demais foram obtidas de trabalho do próprio autor, já citados na seção 2.1.3, Tabela 5.

O valor do módulo de elasticidade do aço (205 Gpa) é mais de dez vezes maior que do concreto com fibra de PVA (20Gpa [24]). A tensão de escoamento também é considerada na formulação analítica, a tensão de escoamento do SHCC utilizada é de 41,39Mpa [24]. O aço nesta sessão é o AISI 316, pois foi o aço usado nos modelos numéricos, diferentemente do aço utilizado pelas regras de projeto do DnV e API.

Tabela 16 – Correlação numérico-analítica

Diâmetro interno [pol]	Espessura interna [mm]	Diâmetro externo [pol]	Espessura externa [mm]	Pressão de colapso analítica [Mpa]	Pressão de colapso numérica [Mpa]	Diferença
5,84	1,8	6,92	2	25,6	27,6	-7%
6	2	8	2	31,33	31,37	~ 0%
6	2,77	8	2,77	39,97	36,24	10%

É possível notar que, apesar do número reduzido de resultados numéricos, a formulação analítica utilizada apresenta boa correlação com os experimentos e, por isso, as análises apresentadas nos capítulos a seguir utilizaram essa formulação para calcular a pressão de colapso do duto sanduíche.

5. METODOLOGIA

O objetivo principal do trabalho é verificar em que condições o duto sanduíche é uma opção vantajosa em relação aos demais sistemas de transporte de fluido submarino. Para atingirmos esse objetivo utilizaremos diferentes variáveis para que consigamos abranger diferentes cenários de aplicação.

Utilizaremos duas regras de projeto (API RP 111 e DnV OS-F101), dois materiais (aço X60 e X70), três lâminas d'água diferentes (1500m, 2000m, 2500m) e três diferentes tipos de sistemas de transporte de fluidos diferentes (PIP, duto de parede simples e duto sanduíche).

Não há regras de projeto para dutos sanduíche, portanto usaremos modelos desenvolvidos no laboratório que já apresentaram boa correlação numérico-analítica-experimental para o projeto destes sistemas. Os modelos desenvolvidos no LTS/COPPE não possuem coeficiente de segurança, portanto os termos das equações relacionados à segurança não serão utilizados, com isso poderemos fazer uma comparação mais igualitária.

Com os dutos projetados faremos uma comparação do peso de aço e de anular que cada um necessita. Com a massa de cada componente calculada será possível ordená-los de acordo com seus custos.

5.1. Projeto de Dutos Sanduíche

A equação (2-2) fornece a pressão de resistência limite de um duto PIP [4]. Esta fórmula relaciona a pressão de colapso plástico e a pressão de colapso elástico com as propriedades geométricas e físicas dos materiais.

$$P_{co} = \frac{P_0 t + P_e t - \sqrt{36 R_m^2 P_e^2 \delta_0^2 + 12 R_m P_0 P_e \delta_0 t + 12 R_m P_e^2 \delta_0 t + P_0^2 t^2 - 2 P_0 P_e t^2 + P_e^2 t^2 + 6 R_m P_e \delta_0}}{2t} \quad (2-2)$$

Onde a pressão de colapso plástico é dada por

$$P_0 = \frac{\sigma_{0i} t_i}{R_{mi}} + \frac{\sigma_{0a} t_a}{R_{ma}} + \frac{\sigma_{0e} t_e}{R_{me}} \quad (5-1)$$

onde:

σ_0 : Tensão de escoamento [N/mm²]

t : Espessura [mm]

R_m : Raio médio [mm]

Os subscritos "e", "a" e "i" indicam duto externo, anular e duto interno, respectivamente,

Castello [4] reescreveu a pressão de colapso elástica a partir da equação de colapso de Timoshenko (2-1).

$$P_e = \frac{3EI_{eq}}{(1-\nu^2)R_m^3} \quad (5-2)$$

Sendo:

$$EI_{eq}: E_i I_i + E_a I_a + E_e I_e \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$\nu: \frac{\nu_{aço} + \nu_{anular}}{2} \text{ (coeficiente de Poisson equivalente)}$$

R_m : Raio médio da seção transversal contendo todas as camadas [mm]

Sato e Patel [18] propuseram uma formulação analítica para a pressão de colapso de dutos sanduíche ao tratá-los como anéis suportados internamente por um fundação elástica.

$$P_{cr} = P_{crs} + \frac{1}{n^2 - 1} k \quad (5-3)$$

Onde:

P_{cr} : Pressão de colapso do duto sanduíche [N/mm²]

P_{crs} : Pressão de colapso do duto externo [N/mm²]

k : Fator que envolve parâmetros do material anular [N/mm²]

n : Número de modo de colapso

E temos também que

$$k = E_c \frac{2n(\nu_c - 1) - 2\nu_c + 1}{4\nu_c^2 + \nu_c - 3} \quad (5-4)$$

Onde:

E_c : Módulo de elasticidade do material anular [N/mm²]

ν_c : Coeficiente de Poisson do material anular

n : Número do modo de colapso

E a pressão de colapso do duto externo é dada por

$$P_{crs} = \left(\frac{t_1}{r_1}\right)^3 \frac{E_p(n^2 - 1)}{(1 - \nu_p^2) \left(\left(\frac{t_1}{r_1}\right)^2 + 12\right)} \quad (5-5)$$

Onde:

t_1 : Espessura do duto externo [mm]

r_1 : Raio médio do duto externo [mm]

E_p : Módulo de elasticidade do material dos dutos [N/mm²]

ν_p : Coeficiente de Poisson do material dos dutos

n: Número do modo de colapso

Segundo Arjomandi [19], esta formulação possui grandes margens de erro para dutos sanduíche com paredes espessas e materiais anulares de baixa dureza.

5.2. Características físicas, geométricas e financeiras dos sistemas escolhidos

Inicialmente foram desconsiderados todos os fatores de segurança das fórmulas do DnV e API. Em seguida definimos que a pressão de colapso da fórmula será a pressão hidrostática correspondente à lâmina d'água da aplicação, pois é uma maneira mais clara para se fazer a comparação. A pressão interna de operação definida foi de 2900psi, o que corresponde a 20MPa.

As profundidades escolhidas foram listadas na Tabela 17:

Tabela 17 – Profundidades avaliadas

Profundidade (m)
1500
2000
2500

5.2.1. Características Geométricas

Foram estipuladas seis geometrias diferentes para o duto PIP (Tabela 18), de acordo com a regra API 5L:

Tabela 18 – Geometrias avaliadas para o duto PIP

Geometria	Tubo externo (pol)	Tubo interno (pol)
1	14	10,75
2	14	8,625
3	14	6,625
4	12,75	10,75
5	12,75	8,625
6	12,75	6,625

Para o Duto de Parede Simples foram feitas seis geometrias diferentes (tabela 19), variando a espessura do isolamento térmico para que ficasse dentro da faixa alcançável pelos Dutos Sanduíche para efeito de comparação. A espessura do isolante varia insignificativamente de acordo com a lâmina d'água e o grau do aço, pois a variação de milímetros do aço não é suficiente para alterar o valor do coeficiente global de troca térmica.

Buscamos valores que fossem iguais aos valores de U-Value fornecidos pelos Dutos Sanduíche com as condutividades térmica escolhidas: 0,05, 0,10, 0,15 e ,0,28 (valor obtido experimentalmente, de acordo com sessão 5.2.2.). As tabelas com os valores dos coeficientes globais de troca térmica podem ser vistas mais adiante na sessão 5.3.2..

Tabela 19 – Geometrias avaliadas para o duto de parede simples

Sistema equivalente	Diâmetro (pol)	Espessura de isolamento (mm)/ k do SP =0,05	Espessura de isolamento (mm)/ k do SP =0,10	Espessura de isolamento (mm)/ k do SP =0,15	Espessura de isolamento (mm)/ k do SP =0,28
SP -14x10,75	10,75	464	173	105	53
SP -14x8,625	8,625	1407	350	192	91
SP -14x6,625	6,625	3133	614	279	121
SP -12,75x10,75	10,75	210	93	58	30
SP -12,75x8,625	8,625	710	251	144	69
SP -12,75x6,625	6,625	2371	454	236	101

5.2.2. Características Físicas

Os materiais escolhidos também estão de acordo com a norma API e seus requisitos, de acordo com a tabela 20.

Tabela 20 – Graus de aço avaliados

Grau de aço	Tensão de escoamento mínima [MPa]	Tensão de escoamento máxima [MPa]	Tensão última mínima [MPa]	Tensão última máxima [MPa]
X60	414	565	517	758
X70	483	621	565	758

O valores da condutividade térmica do polipropileno sintático foram obtidos a partir da tese de Doutorado de An Chen [5]. A condutividade térmica do aço foi obtida na publicação de Van Vlack [20] e a condutividade térmica do concreto com fibra de PVA foi avaliada a partir de testes experimentais.

Utilizamos o equipamento *Thermal Conductivity Analyzer* (Figura 58) do fabricante *C-Therm* para a avaliação da condutividade térmica do material. De acordo com o manual a incerteza do equipamento é de 5%.



Figura 58 – Equipamento *Thermal Conductivity Analyzer*

O equipamento consiste em um núcleo para o hardware da máquina e um sistema de aquisição de dados composto por uma resistência e sensores (Figura 59).



Figura 59 – Detalhe da resistência do equipamento

As amostras foram cortadas de corpo de prova para ensaio de compressão. Elas consistem em discos com 50 milímetros de diâmetro e 5 milímetros de espessura. As figuras 60 e 61 mostram as amostras obtidas.



Figura 60–Amostras cortadas



Figura 61 - Amostra de SHCC

A execução do teste segue o seguinte procedimento:

- Aplicar o agente de contato sobre a resistência (Figura 62). No caso do SHCC o agente de contato aplicável foi a água destilada (Figura 63), pois as pastas térmicas disponíveis eram apenas para metais ou polímeros. A água é o melhor agente térmico pois possui condutividade térmica exaustivamente testada e é um agente de fácil aplicação e remoção.



Figura 62–Aplicação do agente de contato



Figura 63–Água destilada fornecida pelo fabricante

- Posicionar a amostra em cima da resistência e colocar um peso em cima da mostra, com o intuito de viabilizar um melhor contato. A massa do peso utilizado foi de 500 gramas (Figura 64).



Figura 64–Amostra pronta para ser ensaiada

- Por fim, o teste é iniciado com o auxílio do software do equipamento e os dados são processados pelo mesmo software. Uma imagem do arquivo de saída pode ser visto na Figura 65.

C-THERM TCI™ Thermal Conductivity Analyzer				Test					
Test TCI-THINK-147				Report Generated on: 12-fev-2015 17:31:33					
Instrument: TH91-13-00554				Software Version: 3.0.3.1		Test started on: 12-fev-2015			
Test Polymers				Performed by: Administrator		User ID: ADMIN			
Project shcc5									
Materia Pyrex									
Material Lot:									
#	Repea	Sensor ID	Start Time	Effusivit	$\frac{W^2 \cdot s}{(m^2) \cdot K}$	Conductivit (W/mK)	Ambient T (°C)	DeltaT (°C)	V0 (mV)
1	1	H161	17:29:28	611		0,270	28,28	1,69	5.194,79
2	1	H161	17:30:39	354		0,040	28,22	1,94	5.194,05
Notes:									
Last Edited By:				Last Edited On:					

Figura 65–Arquivo de saída com as medições feitas

Os testes foram feitos com 4 amostras, e os resultados podem ser vistos na Tabela 21.

Tabela 21 – Condutividade térmica das amostras

Amostra	Condutividade térmica (W/m.K)
SHCC1	0,289
SHCC2	0,270
SHCC3	0,269
SHCC4	0,270
Valor médio	0,275

Também foram utilizados valores alternativos para o valor da condutividade térmica do concreto, pois pode ser um indicativo de qual valor precisamos atingir para que o Duto Sanduíche se torne viável. Por fim a condutividade térmica do ar foi obtida a partir do trabalho de Lemmon e Jacobsen [21]. A tabela 22 lista a condutividade térmica dos materiais.

Tabela 22 – Condutividade térmica dos materiais

Material	Condutividade térmica (W/m.K)
Aço	47
Ar	0,026
Polipropileno	0,2
Concreto (experimental médio)	0,275
Concreto alternativo 1	0,05
Concreto alternativo 2	0,10
Concreto alternativo 3	0,15

5.2.3. Características de Custo

Os elementos envolvidos na produção dos sistemas de transporte de fluidos estudados são: aço X60, aço X70, concreto, fibra PVA de alta resistência, polipropileno. A Tabela 23 com os custos pode ser vista logo abaixo, e em seguida maiores detalhes sobre cada componente. Podemos perceber que a fibra de PVA é o material mais caro, entretanto, de acordo com a Tabela 23 vemos que ela corresponde a apenas 1,4% do concreto. Isso faz com que o composto cimentício seja uma opção muito barata para material anular, custando 164 dólares contra os 1435 dólares do polipropileno.

Tabela 23 – Custo dos componentes

Componente	Custo	Razão dos custos
Aço X60	500 dólares/tonelada	1,00
Aço X70	500 dólares/tonelada	1,00
Polipropileno	1435 dólares/tonelada	2,87
Composto cimentício	164 dólares/ tonelada	0,33

Preço do aço

Os graus de aço X60 e X70 foram encontrados com o mesmo preço (Figura 66) em um catálogo do fabricante Shandong Witsteel International Trading Company, Ltd [22]. O valor adotado será de 500 dólares por tonelada para o aço X60 e X70.



Tubulação de aço (X60, X70, X80, N60, N70, N80, J55)

Preço Unitário:	US \$ 500 / Tonelada
Quantidade Mínima:	20 Toneladas
Termos de Comércio:	FOB, CFR, CIF
Condições de Pagamento:	LC, T/T, OA
Tempo Válido de Preço:	11/6/2014 ~ 12/23/2014

Perfil de Fornecedor

 Shandong Witsteel International Trading Co., Ltd.

 Audited Supplier

Shandong China

Tipo de Negócio: Fabricante, Empresa Comercial, Grupo de Empresas

Principais Produtos: em Chapa de Aço, Fio-máquina, Chapa de Aço, Tubo de Aço, Barra de Aço, Cotovelo, T, Flange, Válvulas

Serviço OEM/ODM: Não

Figura 66 – Tubulação de aço oferecida por fornecedor Chinês

Preço do polipropileno

O polipropileno (PP) é uma resina termoplástica que se apresenta em dois tipos, os homopolímeros e os copolímeros. Os homopolímeros são polimerizados a partir de um monômero e os copolímeros são polimerizados a partir de dois ou mais monômeros. No caso do polipropileno, os monômeros utilizados em sua polimerização são o propeno, no caso de homopolímero, e propeno mais eteno, no caso de copolímero.

O polipropileno normalmente utilizado como material anular para Dutos Sanduíche ou isolante de Dutos de Parede Simples são copolímeros, pois estes polímeros são mais resistentes a impactos e baixas temperaturas.

Comercialmente o PP é encontrado de duas maneiras diferentes [23], filmes bobinados (Figura 67) e grãos para injeção (Figura 68). A cotação utilizada é do PP vendido em grãos.



Figura 67 – Bobina de polipropileno



Figura 68 – Grãos de polipropileno

Podemos perceber que há uma tendência de queda no preço do polipropileno, como indicam os dados da Figura 69.

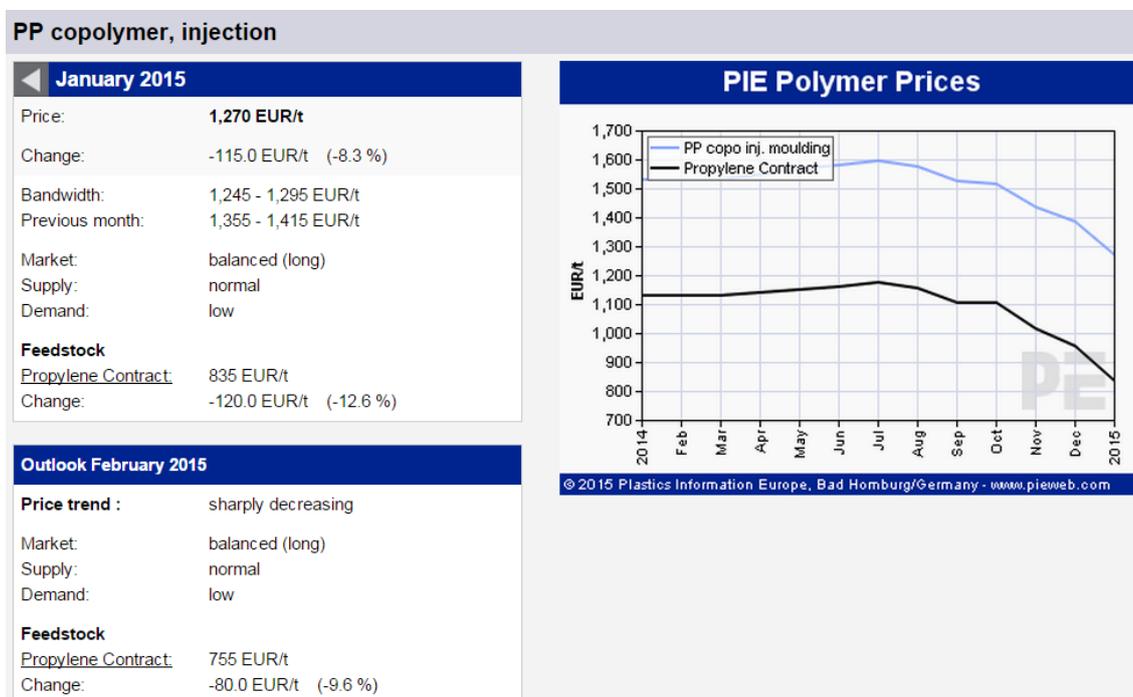


Figura 69 – Preço do PP copopolímero para injeção

Outra característica importante que foi descoberta a respeito do PP é a volatilidade de seu preço, vide Figura 70. Por conta disso, utilizaremos o valor da cotação para o mês de janeiro de 2015, 1270 euros por tonelada.

Year	Average reference price	Minimum reference price	Maximum reference price	Volatility	Average reference price Change against prev. year	
	EUR/t	EUR/t	EUR/t		EUR/t	%
2015	1,220	1,220	1,220		-250.0	-17.0
2014	1,470	1,335	1,540	35.0	+43.3	+3.0
2013	1,427	1,350	1,495	42.8	-11.7	-0.8
2012	1,438	1,245	1,590	101.9	-20.8	-1.4
2011	1,459	1,280	1,610	61.2	+165.0	+12.8
2010	1,294	1,070	1,385	42.5	+375.0	+40.8
2009	919	805	1,080	45.8	-318.8	-25.8
2008	1,238	870	1,360	86.7	-13.3	-1.1
2007	1,251	1,205	1,290	9.7	+7.1	+0.6
2006	1,244	1,165	1,290	28.6	+192.5	+18.3

Copyright: 2015 Plastics Information Europe, Bad Homburg, Germany - www.pieweb.com

Figura 70 – Histórico de preço do PP copolímero para injeção

Preço da fibra de PVA

O álcool polivinílico é um polímero que é misturado em forma de fibra picotada ao concreto e serve como opção de material anular para o duto sanduíche. O concreto misturado com a fibra de PVA (Figura 71) tem suas propriedades mecânicas melhoradas, sua resistência à compressão aumenta e a fissuração do material diminui, conferindo maior resistência estrutural ao duto sanduíche.



Figura 71 – Fibra de PVA

O maior efeito das fibras sobre o comportamento das pastas sobre compressão acontece após o início da fissuração. As fibras na pasta ligam as superfícies das fissuras, criando pontes de tensões, que retardam a propagação das fissuras e previnem uma falha catastrófica devido à fragmentação do anular.

O efeito sobre a resistência à compressão com o uso de fibra é variado e foi pesquisado por Magalhães [24]. A adição das fibras pode acarretar uma maior viscosidade na pasta, diminuindo a trabalhabilidade, o que pode aumentar a porosidade das pastas e diminuir a resistência à compressão e o módulo de elasticidade do material. Por outro lado, o uso da fibra pode causar um efeito de confinamento da matriz, diminuindo a segregação da pasta, podendo resultar em um aumento de resistência à compressão. Mesmo que tenha uma diminuição na resistência, a adição de fibras promove um aumento na capacidade de absorção de energia do material, tornando a pasta mais dúctil após a fissuração. Isto evita a formação de fraturas maiores e o colapso do anular.

O preço utilizado será de 2000 dólares por tonelada, pois é o valor médio da faixa de preços divulgada pelo fornecedor consultado, de acordo com a Figura 72.



Polyvinyl alcohol PVA fiber

FOB Price: US \$1.5 - 2.5 / Kilogram | [Get Latest Price](#)

Min. Order Quantity: 1 Metric Ton/Metric Tons 1kg for sample is OK

Supply Ability: 60000 Metric Ton/Metric Tons per Year

Port: Any port of China

Payment Terms: L/C,D/A,D/P,T/T,Western Union,MoneyGram

[Contact Supplier](#) [Leave Messages](#)

Figura 72 – Cotação da fibra de PVA

Preço do concreto

O material para o anular do Duto Sanduíche testado foi o concreto com fibras de PVA. O concreto utilizado para os testes experimentais feitos possui sete componentes, e a proporção de cada um deles pode ser visto na Tabela 24.

Tabela 24 – Proporção dos componentes

Componente	Proporção (kg/m ³)	Razão (%)
Cimento	488,1	24,16
Areia Fina	516,1	25,55
Cinza Volante	593,5	29,38
Água	360,0	17,82
Superplastificador	30,0	1,49
Modificador de Viscosidade	3,2	0,16
Fibras de PVA	29,0	1,44

O preço da fibra de PVA já foi avaliado previamente, portanto trataremos dos outros seis componentes.

O cimento, Figura 73, foi cotado a partir do site do fabricante *Votorantim* a um custo de 178 dólares por tonelada.



Figura 73 – Saca de cimento

A areia fina seca, figura 74, foi encontrada pelo preço de 18 dólares por tonelada de acordo com o fornecedor *Concrelagos*.



Figura 74 – Areia fina

A cinza volante (Figura 75) é um resíduo da queima de carvão em usinas termoeletricas que é utilizado na mistura do concreto para fornecer maior resistência a meios agressivos, como esgoto, água do mar, solos sulfurosos e a agregados reativos.



Figura 75 – Cinza volante

O preço da Pozolona (um tipo de cinza volante) foi encontrado no site do fabricante Luoyang Jihe Micro Silica Fume Company Ltd. O valor adotado foi de 200 dólares por tonelada, como podemos ver na Figura 76.



Micro Silica

Silica fume - a very reactive pozzolan used in concrete

FOB Price: US \$100 - 300 / Ton | [Get Latest Price](#)

Min. Order Quantity: 1 Ton/Tons

Supply Ability: 3600 Ton/Tons per Month

Port: Fangcehng/ Tianjin

Payment Terms: L/C,T/T

[Contact Supplier](#) [I'm Away](#)

[Add to Inquiry Cart](#) [Add to My Favorites](#)

PROFESSIONAL
Luoyang Jihe Micro Silica Fume Co. Ltd.

ZOOM

Figura 76 – Preço da Pozolona

A água na cidade do Rio de Janeiro possui um cálculo que depende do consumo total, do tipo do estabelecimento e da Região em que se encontra. Por isso usaremos um preço conservativo de 20 reais por metro cúbico.

Os superplastificantes são aditivos químicos que podem ser adicionados às misturas de concreto para fazê-las mais trabalháveis. A resistência final do concreto é inversamente proporcional à quantidade de água adicionada, chamada "razão água-cimento". Para se produzir um concreto mais resistente é necessário adicionar menos água à mistura, o que a torna menos trabalhável, sendo necessário o uso de superplastificantes.



plasticizer in concrete water reducing agent with high concentration water reducing agent, water reducing superplasticizer

FOB Price: US \$1,200 - 1,450 / Ton | [Get Latest Price](#)

Min. Order Quantity: 10 Ton/Tons plasticizer in concrete

Supply Ability: 50000 Ton/Tons per Month plasticizer in concrete

Port: ChongQing

Payment Terms: L/C,D/A,D/P,T/plasticizer in concrete

[Contact Supplier](#) [Leave Messages](#)

[Add to Inquiry Cart](#) [Add to My Favorites](#)

mytongzhou.en.alibaba.com

ZOOM

Figura 77 – Preço do superplastificante

Foi encontrado superplastificante a um preço médio de 1325 dólares por tonelada (Figura 77) fornecido por *Tongzhou Company Ltd.*

O modificador de viscosidade é um aditivo para concreto e argamassa, que melhora consideravelmente as propriedades reológicas e viscoelásticas do concreto. O preço médio encontrado foi de 4,85 dólares por tonelada (Figura 78), segundo o fabricante *Henan Botai Chemical building Materials Company Ltd.*



HPMC construction additives cement viscosity modifying agent

FOB Price: US \$4.2 - 5.5 / Kilogram | [Get Latest Price](#)

Min. Order Quantity: 500 Kilogram/Kilograms Minimum order depend on customer

Supply Ability: 10000 Ton/Tons per Year High quality HPMC

Port: Qingdao

Payment Terms: L/C,D/A,D/P,T/T,Western Union,MoneyGram,Paypal

[Contact Supplier](#) [Leave Messages](#)

[Add to Inquiry Cart](#) [Add to My Favorites](#)

Figura 78 – Preço do modificador de viscosidade

Com isso temos que o preço do concreto (sem a fibra de PVA) é, de acordo com a tabela 25, 137 dólares por tonelada.

Tabela 25 – Custo dos componentes do concreto sem fibra de PVA

Componente	Custo (dólar/ton)
Cimento	178
Areia Fina	18
Cinza Volante	200
Água Deionizada	12
Superplastificante	1325
Modificador de Viscosidade	4850
Concreto	136,85

Levando em consideração as densidades fornecidas pelo fabricante *Votorantim*, e considerando o peso da água, cimento, cinza volante e areia fina como peso representativo do concreto (98,3% do peso), temos a densidade do concreto, que vale 1473,12kg/m³. A tabela 26 mostra a densidade dos componentes representativos para o cálculo da densidade do concreto.

Tabela 26 – Densidade dos componentes representativos do concreto

Componente	kg/m ³
cimento	1100
areia fina	1300
cinza volante	2300
água	1000

6. Resultados

Para fazer as comparações projetamos os Dutos sanduíche da forma que a pressão de colapso fosse a mesma que os outros sistemas. Não utilizamos os valores de coeficientes de segurança para que a comparação fosse a mais precisa possível.

No caso dos dutos de parede simples a espessura do isolamento foi calculada de forma a obter o mesmo U-value obtido pela configuração equivalente de duto sanduíche, com intuito de comparar projetos que apresentam a mesma pressão de colapso e o mesmo isolamento térmico.

6.1. Geometria dos diferentes sistemas

As Tabelas 27 e 28 mostram a espessura dos dutos interno e externo dos Dutos Sanduíche com anular de concreto para o aço X60 e X70. Os valores em 0,1 em vermelho indicam que nestes casos o anular consegue resistir sozinho ao colapso para a lâmina d'água estudada ou a formulação de colapso utilizada não é precisa nesta faixa.

Tabela 27 – Espessura dos dutos interno e externo do SP (SHCC) para aço X60

Duto Sanduíche (SHCC) - Aço X60				
Profundidade (m)	OD (pol)	t disponível (mm)	ID (pol)	t disponível (mm)
2511,1	14	3,7	10,75	3,70
2504,0	14	1,45	8,625	1,45
2755,3	14	0,1	6,625	0,10
2502,3	12,75	4,6	10,75	4,60
2515,4	12,75	2,1	8,625	2,10
2557,0	12,75	0,3	6,625	0,30
2014,0	14	2,6	10,75	2,60
1988,2	14	0,5	8,625	0,50
2755,3	14	0,1	6,625	0,10
2007,3	12,75	3,5	10,75	3,50
2016,7	12,75	1,2	8,625	1,20
2421,0	12,75	0,1	6,625	0,10
1502,9	14	1,45	10,75	1,45
1772,8	14	0,1	8,625	0,10
2755,3	14	0,1	6,625	0,10
1502,3	12,75	2,35	10,75	2,35
1496,9	12,75	0,25	8,625	0,25
2421,0	12,75	0,1	6,625	0,10

Tabela 28 – Espessura dos dutos interno e externo do SP (SHCC) para aço X70

Duto Sanduíche (SHCC) - Aço X70				
Profundidade (m)	OD (pol)	t disponível (mm)	ID (pol)	t disponível (mm)
2501,0	14	3,15	10,75	3,15
2510,9	14	1,25	8,625	1,25
2766,6	14	0,1	6,625	0,10
2500,5	12,75	3,95	10,75	3,95
2518,2	12,75	1,8	8,625	1,80
2512,2	12,75	0,2	6,625	0,20
2001,2	14	2,2	10,75	2,20
2002,8	14	0,45	8,625	0,45
2766,6	14	0,1	6,625	0,10
2005,4	12,75	3	10,75	3,00
2000,5	12,75	1	8,625	1,00
2432,6	12,75	0,1	6,625	0,10
1508,5	14	1,25	10,75	1,25
1782,0	14	0,1	8,625	0,10
2766,6	14	0,1	6,625	0,10
1495,5	12,75	2	10,75	2,00
1520,2	12,75	0,25	8,625	0,25
2432,6	12,75	0,1	6,625	0,10

As Tabelas 29 e 30 mostram a espessura dos dutos interno e externo para os Dutos Sanduíche com anular de polipropileno para os aços X60 e X70.

Tabela 29 – Espessura dos dutos interno e externo do SP (PP) para aço X60

Duto Sanduíche (PP) - Aço X60				
Profundidade (m)	OD (pol)	t disponível (mm)	ID (pol)	t disponível (mm)
2531,49	14	3,7	10,75	3,70
2489,28	14	1,7	8,625	1,70
2493,58	14	0,2	6,625	0,20
2504,72	12,75	4,4	10,75	4,40
2549,43	12,75	2,3	8,625	2,30
2565,38	12,75	0,7	6,625	0,70
2043,60	14	2,7	10,75	2,70
2023,32	14	0,9	8,625	0,90
2423,03	14	0,1	6,625	0,10
2018,89	12,75	3,4	10,75	3,40
2012,92	12,75	1,4	8,625	1,40
2131,04	12,75	0,1	6,625	0,10
1515,15	14	1,6	10,75	1,60
1561,61	14	0,1	8,625	0,10
2423,03	14	0,1	6,625	0,10
1496,65	12,75	2,3	10,75	2,30
1541,37	12,75	0,6	8,625	0,60
2131,04	12,75	0,1	6,625	0,10

Tabela 30 – Espessura dos dutos interno e externo do SP (PP) para aço X70

Duto Sanduíche (PP) - Aço X70				
Profundidade (m)	OD (pol)	t disponível (mm)	ID (pol)	t disponível (mm)
2531,02	14	3,4	10,75	3,40
2522,93	14	1,6	8,625	1,60
2509,02	14	0,2	6,625	0,20
2522,83	12,75	4,1	10,75	4,10
2548,15	12,75	2,1	8,625	2,10
2538,75	12,75	0,6	6,625	0,60
2001,28	14	2,4	10,75	2,40
2011,20	14	0,8	8,625	0,80
2430,74	14	0,1	6,625	0,10
1998,32	12,75	3,1	10,75	3,10
2026,62	12,75	1,3	8,625	1,30
2138,68	12,75	0,1	6,625	0,10
1531,22	14	1,5	10,75	1,50
1567,31	14	0,1	8,625	0,10
2430,74	14	0,1	6,625	0,10
1536,19	12,75	2,2	10,75	2,20
1510,66	12,75	0,5	8,625	0,50
2138,68	12,75	0,1	6,625	0,10

As Tabelas 31 e 32 mostram as espessuras do duto interno e externo para o sistema PIP com ar como isolante térmico. A formulação utilizada para estes casos é a formulação do DNV [17] sem fatores de segurança.

Tabela 31 – Espessura dos dutos interno e externo do PIP (ar) para aço X60

PIP (Ar) - Aço X60				
Profundidade (m)	OD (pol)	t regra(mm)	ID (pol)	t regra (mm)
2500	14	12,18	10,75	6,35
2500	14	12,18	8,625	5,09
2500	14	12,18	6,625	3,91
2500	12,75	11,09	10,75	6,35
2500	12,75	11,09	8,625	5,09
2500	12,75	11,09	6,625	3,91
2000	14	10,05	10,75	6,35
2000	14	10,05	8,625	5,09
2000	14	10,05	6,625	3,91
2000	12,75	9,15	10,75	6,35
2000	12,75	9,15	8,625	5,09
2000	12,75	9,15	6,625	3,91
1500	14	7,90	10,75	6,35
1500	14	7,90	8,625	5,09
1500	14	7,90	6,625	3,91
1500	12,75	7,20	10,75	6,35
1500	12,75	7,20	8,625	5,09
1500	12,75	7,20	6,625	3,91

Tabela 32 – Espessura dos dutos interno e externo do PIP (ar) para aço X70

PIP (Ar) - Aço X70				
Profundidade (m)	OD (pol)	t regra(mm)	ID (pol)	t regra (mm)
2500	14	10,66	10,75	5,46
2500	14	10,66	8,625	4,38
2500	14	10,66	6,625	3,36
2500	12,75	9,71	10,75	5,46
2500	12,75	9,71	8,625	4,38
2500	12,75	9,71	6,625	3,36
2000	14	8,82	10,75	5,46
2000	14	8,82	8,625	4,38
2000	14	8,82	6,625	3,36
2000	12,75	8,03	10,75	5,46
2000	12,75	8,03	8,625	4,38
2000	12,75	8,03	6,625	3,36
1500	14	6,97	10,75	5,46
1500	14	6,97	8,625	4,38
1500	14	6,97	6,625	3,36
1500	12,75	6,35	10,75	5,46
1500	12,75	6,35	8,625	4,38
1500	12,75	6,35	6,625	3,36

As Tabelas 33 e 34 apresentam as espessuras dos Dutos de Parede Simples de acordo com a regra do DnV[17] sem fatores de segurança.

Tabela 33 – Espessura dos dutos de Parede Simples para aço X60

Duto de Parede Simples - Aço X60		
Profundidade (m)	Diâmetro (pol)	t (mm)
2500	10,75	9,35
2500	8,625	7,51
2500	6,625	5,76
2000	10,75	7,72
2000	8,625	6,19
2000	6,625	4,76
1500	10,75	3,07
1500	8,625	4,87
1500	6,625	3,74

Tabela 34 – Espessura dos dutos de Parede Simples para aço X70

Duto de Parede Simples - Aço X70		
Profundidade (m)	Diâmetro (pol)	t (mm)
2500	10,75	8,19
2500	8,625	6,57
2500	6,625	5,05
2000	10,75	6,78
2000	8,625	5,44
2000	6,625	4,18
1500	10,75	5,35
1500	8,625	4,3
1500	6,625	3,3

6.2. Coeficiente global de troca térmica para os diferentes sistemas

O isolamento térmico é obtido majoritariamente pelo isolante térmico, pois os metais possuem alta condutividade térmica. O concreto é um material poroso de condutividade térmica 0,57 W/m.K, o que faz dele o material anular mais condutor. Em seguida temos o polipropileno com 0,2W/m.K e o ar com 0,026 W/m.K, que é o melhor isolante térmico para este tipo de aplicação.

A opção de usar concretos com condutividades térmicas idealizadas se dá devido ao fato de que o material SHCC ainda está sendo desenvolvido, e o valor da condutividade térmica pode variar de acordo com a composição da mistura. Portanto os cálculos foram feitos com alguns valores hipotéticos.

Também fizemos os cálculos para o valor experimental médio, de 0,275 W/m.K, pois julgamos importante saber em que patamar o Duto Sanduíche com anular de SHCC se encontra hoje. As Tabelas 35 e 36 mostram os valores obtidos analiticamente para o coeficiente global de troca térmica para os sistemas estudados.

Tabela 35 - Coeficiente global de troca térmica com aço X60

U values para sistemas com aço X60 [W/m ² K]							
Profundidade (m)	OD (pol)	ID (pol)	Pipe in pipe	Duto sanduíche			
			U (Ar)	U (SHCC, k=0,10)/ Parede Simples	U (SHCC, k=0,15)/ Parede Simples	U (SHCC, k=0,28)/ Parede Simples	U(PP)
2500	14	10.75	0.84	2.55	3.80	6.78	5.04
2500	14	8.625	0.39	1.31	1.96	3.55	2.61
2500	14	6.625	0.24	0.84	1.25	2.28	1.67
2500	12.75	10.75	1.62	4.33	6.42	11.15	8.40
2500	12.75	8.625	0.51	1.65	2.46	4.44	3.28
2500	12.75	6.625	0.28	0.96	1.43	2.60	1.91
2000	14	10.75	0.79	2.49	3.71	6.64	4.93
2000	14	8.625	0.38	1.30	1.94	3.52	2.59
2000	14	6.625	0.24	0.84	1.25	2.28	1.66
2000	12.75	10.75	1.44	4.13	6.13	10.74	8.06
2000	12.75	8.625	0.49	1.62	2.43	4.38	3.23
2000	12.75	6.625	0.27	0.96	1.43	2.60	1.90
1500	14	10.75	0.74	2.43	3.62	6.51	4.81
1500	14	8.625	0.37	1.29	1.93	3.51	2.56
1500	14	6.625	0.23	0.84	1.25	2.28	1.66
1500	12.75	10.75	1.30	3.95	5.86	10.35	7.72
1500	12.75	8.625	0.47	1.60	2.39	4.33	3.19
1500	12.75	6.625	0.27	0.96	1.43	2.60	1.90

*No caso do duto de parede simples há apenas diâmetro interno

Tabela 36 – Coeficiente global de troca térmica com aço X70

U values para sistemas com aço X70 [W/m ² K]								
Profundidade (m)	OD (pol)	ID (pol)	Pipe in pipe	Duto sanduíche				
			U (Ar)	U (SHCC, k=0,05)/ Parede simples	U (SHCC, k=0,10)/ Parede Simples	U (SHCC, k=0,15)/ Parede Simples	U (SHCC, k =0,28)/ Parede Simples	U(PP)
2500	14	10,75	0,80	1,27	2,52	3,76	6,78	5,01
2500	14	8,625	0,39	0,66	1,31	1,95	3,55	2,61
2500	14	6,625	0,24	0,42	0,84	1,25	2,28	1,67
2500	12,75	10,75	1,49	2,13	4,21	6,25	11,15	8,29
2500	12,75	8,625	0,50	0,82	1,64	2,45	4,44	3,27
2500	12,75	6,625	0,28	0,48	0,96	1,43	2,60	1,91
2000	14	10,75	0,76	1,24	2,47	3,68	6,64	4,90
2000	14	8,625	0,38	0,65	1,30	1,94	3,52	2,58
2000	14	6,625	0,23	0,42	0,84	1,25	2,28	1,66
2000	12,75	10,75	1,35	2,05	4,05	6,01	10,74	7,96
2000	12,75	8,625	0,48	0,81	1,62	2,42	4,38	3,22
2000	12,75	6,625	0,27	0,48	0,96	1,43	2,60	1,90
1500	14	10,75	0,73	1,21	2,42	3,60	6,51	4,80
1500	14	8,625	0,37	0,65	1,29	1,93	3,51	2,56
1500	14	6,625	0,23	0,42	0,84	1,25	2,28	1,66
1500	12,75	10,75	1,24	1,97	3,89	5,78	10,35	7,69
1500	12,75	8,625	0,46	0,80	1,60	2,39	4,33	3,18
1500	12,75	6,625	0,27	0,48	0,96	1,43	2,60	1,90

*No caso do duto de parede simples há apenas diâmetro interno

6.3. Custo para os diferentes sistemas

Nas Tabelas 37 e 38 podemos ver os custos em dólares por metro de cada sistema de transporte de fluido submarino em função da geometria, do grau do aço e da profundidade correspondente à sua pressão de colapso. Percebemos que há uma ordem crescente para o valor dos sistemas: Duto Sanduíche com anular de SHCC, Duto de Parede Simples com isolamento térmico de polipropileno, PIP com anular de ar e Duto sanduíche com anular de polipropileno.

O fato do anular do duto sanduíche ter função estrutural faz com que a quantidade de aço necessária seja menor em relação aos outros sistemas. Entretanto as duas opções de Dutos Sanduíche encontram-se no extremo da lista, isto ocorre devido à proporção dos materiais poliméricos na composição do anular. A fibra de PVA corresponde a apenas 1,4% do concreto, enquanto o anular integral de Polipropileno faz com que este sistema torne-se o mais caro entre os estudados.

É possível perceber também que o grau do aço interfere significativamente no preço do sistema. No caso de pipelines, cuja extensão é de quilômetros, diferenças da ordem de grandeza de 2% a 5% (encontradas neste trabalho) são de grande influência para o controle de custos do projeto.

Tabela 37 – Custo para os sistemas com aço X60

Custo (dólares/metro) para sistemas com aço X60									
Profundidade(m)	OD (pol)	ID (pol)	SP(SHCC)	SP (PP)	SW (PP) - 1	SW (PP) - 2	SW (PP) - 3	SW (PP) - 4	PIP (Ar)
2500	14	10,75	35,17	73,05	504,46	156,60	99,14	61,89	70,14
2500	14	8,625	22,54	88,25	2652,34	298,81	142,10	67,56	62,94
2500	14	6,625	16,84	100,56	11048,65	603,61	185,27	67,53	57,61
2500	12,75	10,75	36,32	54,27	190,15	89,54	65,28	47,27	61,61
2500	12,75	8,625	22,47	68,5	1017,95	194,36	104,16	54,61	54,41
2500	12,75	6,625	14,37	80,44	6530,49	375,48	147,98	56,29	49,08
2000	14	10,75	27,33	67,1	499,47	151,61	94,16	56,91	61,66
2000	14	8,625	16,29	83,95	2649,10	295,58	138,87	64,32	54,47
2000	14	6,625	16,84	100,08	11046,77	601,73	183,38	65,65	49,13
2000	12,75	10,75	28,92	48,6	185,17	84,56	60,30	42,29	54,58
2000	12,75	8,625	16,9	64,42	1014,71	191,13	100,92	51,37	47,38
2000	12,75	6,625	13,24	78,16	6528,61	373,60	146,09	54,40	42,05
1500	14	10,75	19,08	61,72	487,04	139,19	81,73	44,48	53
1500	14	8,625	13,65	80,17	2645,83	292,30	135,59	61,04	45,8
1500	14	6,625	16,84	100,08	11049,23	604,19	185,85	68,11	40,47
1500	12,75	10,75	21,13	43,46	172,74	72,13	47,87	29,86	47,42
1500	12,75	8,625	10,98	60,31	1011,43	187,85	97,64	48,10	40,22
1500	12,75	6,625	13,24	78,16	6531,07	376,06	148,56	56,87	34,89

*No caso do duto de parede simples, há apenas duto interno

(1),(2),(3),(4), representam os Dutos de parede Simples com U-value equivalentes ao SPs com condutividade térmica 0,05, 0,1, 0,15 e 0,28 W/m.K

Tabela 38– Custo para os sistemas com aço X70

Custo (dólares/metro) para sistemas com aço X70									
Profundidade(m)	OD (pol)	ID (pol)	SP(SHCC)	SP (PP)	SW (PP) - 1	SW (PP) - 2	SW (PP) - 3	SW (PP) - 4	PIP (Ar)
2500	14	10,75	31,26	74,83	500,92	153,06	95,60	58,35	61,33
2500	14	8,625	21,23	88,78	2650,04	296,51	139,80	65,26	55,12
2500	14	6,625	16,84	100,56	11053,13	608,09	189,74	72,01	50,52
2500	12,75	10,75	31,96	55,96	186,61	86,01	61,74	43,73	53,85
2500	12,75	8,625	20,62	69,51	1015,65	192,06	101,86	52,31	47,64
2500	12,75	6,625	13,8	80,89	6534,97	379,96	152,45	60,76	43,04
2000	14	10,75	24,47	68,89	496,57	148,71	91,25	54,00	53,95
2000	14	8,625	15,96	84,49	2647,25	293,72	137,01	62,46	47,74
2000	14	6,625	16,84	100,08	11045,67	600,62	182,28	64,55	43,14
2000	12,75	10,75	25,54	50,3	182,27	81,66	57,40	39,39	47,71
2000	12,75	8,625	15,66	64,93	1012,85	189,27	99,06	49,52	41,5
2000	12,75	6,625	13,24	78,16	6527,51	372,50	144,99	53,30	36,9
1500	14	10,75	17,64	62,32	492,12	144,26	86,80	49,55	46,44
1500	14	8,625	13,65	80,17	2644,40	290,87	134,16	59,62	40,23
1500	14	6,625	16,84	100,08	11043,98	598,93	180,59	62,86	35,63
1500	12,75	10,75	18,75	44,04	177,81	77,21	52,94	34,93	41,5
1500	12,75	8,625	10,98	60,83	1010,00	186,42	96,22	46,67	35,29
1500	12,75	6,625	13,24	78,16	6525,82	370,81	143,30	51,61	30,69

*No caso do duto de parede simples, há apenas duto interno

(1),(2),(3),(4), representam os Dutos de parede Simples com U-value equivalentes ao SPs com condutividade térmica 0,05, 0,1, 0,15 e 0,28 W/m.K

7. CONCLUSÕES

O projeto faz uma análise comparativa do isolamento térmico, resistência estrutural e custos de material entre o duto sanduíche e os outros sistemas de transporte de fluidos submarinos, portanto trataremos separadamente de cada uma dessas análises.

7.1. Isolamento térmico

O cálculo executado foi proposto por Yong Bai e Qiang Bai no livro texto *Subsea Pipelines and Risers* [6]. Os valores das condutividades térmicas foram obtidos a partir de teses de Doutorado e verificados em informações comerciais. Os cenários do trabalho são todos de águas profundas, por conta disso a temperatura externa é sempre considerada a 4°C.

Para o caso do composto cimentício, foi realizada uma medida experimental da condutividade térmica. O valor médio encontrado, 0,28W/m.k, está dentro da faixa esperada. A condutividade térmica do concreto é 0,57W/m.K e a da fibra de álcool polivinílico (PVA) é 0,2 W/m.K.

É importante ressaltar que a condutividade térmica dos materiais varia de acordo com a temperatura [30], e para o caso do SHCC o ensaio foi conduzido a temperatura ambiente de 28°C. Dependendo da composição, velocidade e temperatura do fluido nós podemos ter diferentes condutividades térmicas para o anular.

Durante o projeto de um duto submarino, a determinação do *U-value* requerido é feita a partir de um estudo de garantia de escoamento que não foi realizado no presente trabalho. No estudo de garantia de escoamento, variáveis importantes como comprimento, temperatura e tipo de fluido transportado, velocidade de escoamento, diferentes fases do fluido e soterramento dos dutos devem ser consideradas.

O comprimento é importante, pois quanto mais longo é o duto, maior área há para trocar calor, o que faz com que um menor *U-value* seja necessário. Entretanto, pode haver algum cenário em que um *U-value* menos crítico seja uma opção viável.

O estudo paramétrico realizado mostrou que, quando valores críticos de *U-value* são necessários, os PIPs mostram-se a única solução viável, entretanto, o custo associando à utilização dessa opção é bastante elevado, conforme mostrado nas Tabelas 37 e 38. Nos projetos onde o coeficiente global de troca térmica não é tão crítico, ou seja, valores maiores do que 1,5 são suficientes, os dutos sanduíche com SHCC podem ser uma opção vantajosa.

O composto cimentício permite que aditivos sejam empregados com o objetivo de diminuir a condutividade térmica. A vantagem na utilização dos dutos sanduíche pode ser maior caso sejam obtidos compostos que reduzam a condutividade térmica para valores como 0,15 ou 0,1 W/m.K. Analisando as Tabelas 37 e 38 é possível notar que reduzindo a condutividade do SHCC de 0,28 para 0,15W/m.K, seria possível, em qualquer situação estudada, reduzir o diâmetro do duto externo em mais de 1” e mesmo assim conseguir melhores valores de *U-value*.

7.2. Resistência estrutural

Foi possível concluir que os dutos sanduíche necessitam de menos aço do que os outros tipos de dutos, porém eles acabam se tornando mais pesados em algumas aplicações devido ao peso do concreto.

Durante as contas do modelo analítico e elaboração de modelos numéricos foi possível perceber que, conforme a razão diâmetro sobre espessura diminui, há um ganho na capacidade de resistir ao colapso externo. Entretanto, o duto interno apresenta melhora mais acentuada para a mesma quantidade de material adicionada, pois neste caso a razão D/t diminui mais significativamente.

No caso de dutos sanduíche com espessuras iguais, o duto interno sofre mais esforços que o duto externo. É possível que a adoção de espessuras diferentes para o duto externo e duto interno, não estudada nesse trabalho possa contribuir para uma melhor otimização da estrutura sanduíche.

O SHCC como material anular se mostrou muito adequado do ponto de vista estrutural. Há ganhos significativos na pressão de colapso conforme a espessura do anular aumenta, como podemos ver na Tabela 39.

Tabela 39 – Pressão de colapso em função da espessura do anular

P colapso (MPa)	OD (pol)	t externa (mm)	ID (pol)	t interna (mm)
31,61	12	2,00	6	2,00
28,61	11	2,00	6	2,00
25,23	10	2,00	6	2,00
21,38	9	2,00	6	2,00
16,92	8	2,00	6	2,00
11,53	7	2,00	6	2,00

O grau do aço também interfere na resistência estrutural do Duto Sanduíche. Como era esperado o grau de aço X70 provê mais resistência ao colapso do que o aço de grau X60. Para um mesmo diâmetro o aço de grau maior faz com que a espessura necessária para atingir a pressão de colapso de projeto seja menor.

7.3. Custos

O Duto Sanduíche com SHCC se mostrou a opção mais barata em todas as situações estudadas. Isto aconteceu devido ao fato de que os dutos sanduíche usam menos aço do que os demais sistemas e também por causa do custo do SHCC, que é muito baixo. Utilizamos a regra do DnV [17] para a realização da comparação dos custos pois ela fornece valores mais conservadores, por conta disso não há risco da quantidade de aço ter sido subestimada. Foram calculados apenas os custos com material. Fabricação, instalação e operação não foram avaliados.

Este trabalho mostrou que na atual conjuntura econômica, o Duto Sanduíche com anular de SHCC é mais barato que o duto de parede simples com revestimento de polipropileno. O custo do polipropileno é alto, o que faz com que seja uma opção menos vantajosa financeiramente.

O duto sanduíche de polipropileno é mais caro pois, além de ter o material anular nove vezes mais caro que o concreto, o polipropileno contribui menos do ponto de vista estrutural, o que faz com que a quantidade de aço utilizada seja menor.

O duto PIP com ar como isolante é a segunda opção mais cara, pois devido à ausência do anular é necessária uma quantidade significativamente maior de aço, que é um componente caro para os sistemas de transporte de fluidos submarinos.

É interessante ressaltar também que a fabricação do SHCC é fácil, pois necessita apenas dos equipamentos tradicionais para a fabricação de concreto comum.

A fibra de álcool polivinílico de alta resistência é adicionada a mistura de forma similar a feita para os outros componentes do composto, não acarretando a necessidade de equipamentos adicionais, apenas despeja-se a fibra com os outros componentes.

Em contra partida, o polipropileno possui um processo de fabricação mais caro, pois é necessário tratamento térmico no material para que ele possa ser transformado e depois aplicado no duto, por meio de maquinário elaborado (figura 82). A montagem do duto externo sobre o duto interno revestido com PP pode ser difícil.

Vale ressaltar que no presente trabalho, os custos de fabricação não foram considerados, porém é perceptível que o processo de fabricação do duto sanduíche é simples quando o SHCC é utilizado, o que pode acarretar em um valor final ainda menor para o duto sanduíche, aumentando a vantagem de custo em relação aos outros sistemas disponíveis.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Chen, An, "Colapso de Dutos Sanduíches com núcleo de compostos cimentícios reforçados com fibras dePVA sob pressão hidrostática", Tese de Doutorado, UFRJ, Rio de Janeiro, 2012.
- [2] Arjomandi K, Taheri F. Elastic buckling capacity of bonded and unbounded sandwich pipes under external hydrostatic pressure. *Journal of Mechanics of Materials and Structure*; 2009
- [3] Han J-H, Kardomateas G.A. and Simitse G.J., "Elasticity, Shell Theory and Finite Element Results for the Bucking of Long Sandwich Cylindrical Shells Under External Pressure", *Composites Part B: Engineering*, vol. 35, pp. 591-598, Sept-Dec 2004 (Special Issue on Marine Composite Structures, edited by Y.D.S. Rajapakse and D. Hui), 2004.
- [4] Castello, Xavier, "Influência a adesão entre as camadas na resistência ao colapso de dutos sanduíche", Tese de Doutorado, UFRJ, Rio de Janeiro, 2011.
- [5] Chen, A, Esfen S, Collapse and Buckle Propagation of Sandwich Pipes: A Review. *International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*; 2015.
- [6] Bai Y, Qiang B, *Subsea Pipelines and Risers*, Primeira edição, 2005.
- [7] Dittus, F. W. and Boelter, L. M. K., *Heat transfer in automobile radiators of the tubular type*. University of California Publications in Engineering, 1930.
- [8] Hausen, H.: *Neue Gleichungen für die Wärmeübertragung bei freier und erzwungener Strmung*. Allg.Wmetchnik, 1959.
- [9] Hilpert, R. *Forsch Giebete Ingenierw.*, 1933.
- [10] B. Melve, D. Ali, J. C. Hubert, S. Hommedal, *Qualification of Subsea Thermal Insulation for Extreme Temperatures*, *International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, 2004.
- [11] Loch, K., www.worldoil.com/August-2000-Deepwater-soil-thermally-insulates-buried-flowlines, acesso em novembro de 2014
- [12] J G McKechnie and D T Hayes, Andrew Palmer and Associates, "Pipeline Insulation Performance for Long Distance Subsea Tie-backs", 2001.
- [13] Grealish, F., Roddy, I. *State-of-the-Art on Deep Water Thermal Insulation Systems*, *International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Oslo, Norway, 2002.
- [14] Jensen, Gullik, "Offshore Pipelaying Dynamics" Tese de Doutorado, NTNU, 2010.

- [15] Chamoux, Carlos, "Influência da instalação de sapatas de anodo sobre a flambagem de dutos sujeitos ao enrolamento", Tese de Mestrado, PUC, Rio de Janeiro, 2008.
- [16] American Petroleum Institute, API RP 1111, "Design, Construction, Operation and Maintenance of Offshore Hydrocarbon Pipelines (Limit State Design)", 2009.
- [17] Det Norske Veritas, DnV OS-F101, "Offshore standard OS-F101 - Submarine Pipeline Systems", 2007.
- [18] Sato M, Patel MH. Exact and simplified estimations for elastic buckling pressures of structural pipe-in-pipe cross sections under external hydrostatic pressure. *Journal of Marine Science and Technology*, 2007.
- [19] K. Arjomandi, F. Taheri, A new look at the external pressure capacity of sandwich pipes *Marine Structures* 24 (2011).
- [20] Callister, W. *Materials Science and Engineering: An Introduction*, Sétima edição, 2008.
- [21] Lemmon E. W., Jacobsen, R. T., *Viscosity and Thermal Conductivity Equations for Nitrogen, Oxygen, Argon, and Air*, *International Journal of Thermophysics*, 2004.
- [22] Shandong Witsteel International Trading Company Ltd., www.witsteel.en.made-in-china.com, acesso em janeiro de 2014.
- [23] Plastic Information Europe, www.pie.com, acesso em janeiro de 2014.
- [24] Magalhães, Margareth, "Caracterização Experimental de Compostos Cimentícios Reforçados com Fibra de PVA: Processo de Fratura, Propriedades Térmicas, Deformações Diferidas e Estabilidade Térmica", Tese de Doutorado, UFRJ, Rio de Janeiro, 2010.
- [25] Votorantim, www.votorantim.com.br, acesso em janeiro de 2014.
- [26] Concrelagos, www.concrelagos.com.br, acesso em janeiro de 2014.
- [27] Luoyang Jihe Micro Silica Fume Company Ltd., www.jhmicrosilica.com, acesso em janeiro de 2014.
- [28] Sichuan Tongzhou Chemical Technology Company, Ltd, www.tongzhouchemical.com, acesso em janeiro de 2014.
- [29] Henan Botai Chemical Building Materials Company Ltd., www.botaichen.net, acesso em janeiro de 2014.
- [30] Çengel, Yunus, *Heat Transfer: A Practical Approach*, Segunda edição, 2002.
- [31] Bessa, D., Relatório de conclusão de bolsa de graduação PFRH35,