



OTIMIZAÇÃO TÉCNICO-ECONÔMICA DE ESPESSURAS DE PAREDES DE DUTOS SANDUÍCHES

Alexandre Paranhos Bastos

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Oceânica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Oceânica.

Orientadores: Ison Paranhos Pasqualino

Virgílio José Martins Ferreira Filho

Rio de Janeiro
Outubro de 2018

OTIMIZAÇÃO TÉCNICO-ECONÔMICA DE ESPESSURAS DE PAREDES DE
DUTOS SANDUÍCHES

Alexandre Paranhos Bastos

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

Examinada por:

Prof. Ilson Paranhos Pasqualino, D.Sc.

Prof. Virgílio José Martins Ferreira Filho, D.Sc.

Prof. Marcelo Igor Lourenço de Souza, D.Sc.

Prof. Carlos Magluta, D.Sc.

Prof. Luciana Loureiro da Silva Monteiro, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

OUTUBRO DE 2018

Bastos, Alexandre Paranhos

Otimização técnico-econômica de Espessuras de Paredes de Dutos Sanduíches / Alexandre Paranhos Bastos– Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2018.

XII, 112 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Ilson Paranhos Pasqualino

Virgílio José Martins Ferreira Filho

Tese (Doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Oceânica, 2018.

Referências Bibliográficas: p. 109 - 112.

1.Dutos Sanduíche. 2.Otimização. 3.Pressão de colapso. I. Pasqualino, Ilson Paranhos *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Oceânica. III. Título.

Dedico esta tese à minha mulher, Cipriana, e a meu filho, Alexandre.

AGRADECIMENTOS

A minha mulher Cipriana pelo imenso apoio desde o início desse projeto, que sempre teve palavras de incentivo para o desenvolvimento deste trabalho

Ao meu filho Alexandre que nasceu no meio desse projeto, que com um simples sorriso consegue me passar uma grande energia.

A minha família, base do que sou e porto seguro nos momentos de desânimo e ausências.

Ao Prof. Ilson Paranhos Pasqualino pela atenção, disposição e muitos ensinamentos durante o período de orientação.

Ao Prof. Virgílio José Martins Ferreira Filho, sempre muito disponível e com orientações preciosas para o trabalho

João Fabrício Machado de Castilho, amigo que compartilhou os momentos de angústia e não deixou que a solidão do momento de escrita fosse absoluta, sempre estimulando e apoiando.

Aos amigos Claudio e Paulo pela parceria e “consultoria ad hoc” em informações importantes para esta tese.

A todos os colegas, estudantes deste imenso celeiro acadêmico e profissional que é o LTS. Muita honra participar desse time!

Às secretárias do Programa de Engenharia Naval e Oceânica, Lucianita e Eloisa, pela dedicação e apoio prestados nos trâmites burocráticos para o andamento desta tese.

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

OTIMIZAÇÃO TÉCNICO-ECONÔMICA DE ESPESSURAS DE PAREDES DE DUTOS SANDUÍCHES

Alexandre Paranhos Bastos

Outubro /2018

Orientadores: Ison Paranhos Pasqualino
Virgílio José Martins Ferreira Filho

Programa: Engenharia Oceânica

O escoamento da produção de petróleo por dutos submarinos é de grande importância dentro da cadeia de suprimentos na indústria do petróleo. Uma parte relevante dos investimentos na produção é determinada pelos custos das linhas de submarinas, pois essas linhas necessitam suportar as condições adversas que são submetidas nas grandes profundidades do oceano. Projetos de novos tipos de dutos que atendam a tais adversidades e minimizem os altos custos mostra-se como um objetivo muito importante para a viabilidade de produção de poços em águas ultra-profundas. Uma alternativa que vem sendo estudada é o chamado duto sanduíche, que é uma evolução do PIP e teoricamente apresenta um desempenho mecânico e térmico superior. As pesquisas do duto sanduíche orientam-se na definição dos materiais e do desenho que proporcionem uma boa relação entre custo e performance. Nesse contexto, este trabalho apresenta um modelo matemático de Programação não-Linear que busca definir as espessuras das camadas de dutos submarinos em função dos seus materiais para minimizar o custo de produção do duto sanduíche.

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

TECHNICAL-ECONOMIC OPTIMIZATION OF THICKNESSES OF SANDWICH
DUCTS WALLS

Alexandre Paranhos Bastos

October/2018

Advisors: Iلسon Paranhos Pasqualino
Virgílio José Martins Ferreira Filho

Department: Ocean Engineering

In this work, the outflow of oil production by underwater pipelines is of major importance within the supply chain in the oil industry. A relevant part of the investments in production is determined by the costs of the submarine lines, as these lines need to withstand the adverse conditions that are subjected to the great depths of the ocean. Projects of new types of pipelines that meet such adversities and minimize the high costs prove to be a very important objective for the feasibility of producing wells in ultra-deep waters. An alternative that has been studied is the so-called sandwich pipe, which is an evolution of PIP and theoretically presents superior mechanical and thermal performance. The surveys of the sandwich pipe are oriented in the definition of the materials and the design that provide a good relation between cost and performance. In this context, this work presents a mathematical model of non-linear programming that seeks to define the thicknesses of the layers of submarine pipes in function of their materials to minimize the cost of production of the sandwich pipe.

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	MOTIVAÇÃO	2
1.1	OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS	5
1.2	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	6
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	8
2.1	DUTOS SANDUÍCHES	8
2.1.1	Seleção do Material para Camada Anular.....	9
2.1.2	Resistência Estrutural do Duto Sanduíche	12
2.1.3	Isolamento Térmico do Duto Sanduíche	21
2.1.4	Instalação do Duto Sanduíche.....	23
2.1.5	Conectores de dutos sanduíche	34
2.2	ALGORÍTIMOS DE OTIMIZAÇÃO	36
2.2.1.	Programação Não-Linear	37
2.2.2.	Programação Linear Inteira Mista.....	40
2.2.3.	Programação Não-Linear Inteira Mista.....	40
2.2.4.	Otimização robusta	41
2.2.5	Generalized Reduced Gradient (GRG)	42
3	EQUAÇÃO ANALÍTICA DE PRESSÃO DE COLAPSO.....	44
3.1	EQUAÇÕES EXISTENTES.....	44
3.1.1	Equação de colapso de Timoshenko para o caso duto sanduíche	44
3.1.2	Equação de colapso do duto sanduíche obtida pelo Eureka.....	47
3.1.3	Equação de colapso em função dos raios, espessuras e ovalização	51
3.1.4	Comparação das equações analíticas disponíveis com os testes experimentais.....	52
3.2	EQUAÇÃO DE COLAPSO OBTIDA POR ANÁLISE ADIMENSIONAL	54
3.2.1	Testes experimentais do duto sanduíche	54
3.2.2	Formulação da equação	65
4	MODELO MATEMÁTICO	70
4.1	PROBLEMA E HIPÓTESES CONSIDERADAS	70
4.1.1	Hipóteses técnicas.....	72

4.1.2	Hipóteses de modelagem	73
4.2	MODELO ESQUEMÁTICO E NOTAÇÃO UTILIZADA	75
4.3	FORMULAÇÃO	76
4.3.1	Notação	76
4.3.2	Função Objetivo	77
4.3.3	Restrição de resistência ao colapso	81
4.3.4	Restrição de resistência a tração	84
4.3.5	Restrições de isolamento térmico	85
4.3.6	Restrições de limites	86
4.3.7	Restrições de unicidade	87
5	ANÁLISE DOS RESULTADOS	89
5.1	ANÁLISE DO MODELO	89
5.1.1	Análise da Função Objetivo	89
5.1.2	Análise da Restrição à pressão de colapso	91
5.1.3	Análise da Restrição à tração	92
5.1.4	Análise da Restrição de condutividade térmica	95
5.2	RESULTADOS DO MODELO	97
5.2.1	Dados de entrada	98
5.2.2	Resultados da função objetivo	99
5.2.3	Resultado do material da camada anular	100
5.2.4	Resultados das variáveis contínuas	101
5.2.5	Resultados das restrições estruturais e térmica	102
5.2.6	Tabela resumo dos resultados	103
5.2.7	Comparativo do duto sanduiche com duto de parede simples	104
6	CONCLUSÕES	105
6.1	SUMÁRIO	105
6.2	CONCLUSÕES	106
6.3	TRABALHOS FUTUROS	108
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	109

Lista de Figuras

Figura 1.1: Principais campos e gasodutos nas bacias de Campos e Santos [1].	1
Figura 1.2: Tubos de parede simples.	2
Figura 1.3: Configuração de sistema de parede simples com isolamento térmico.	3
Figura 1.4: PIP com ar.	4
Figura 1.5: PIP com material de isolamento.	4
Figura 2.1: Duto sanduíche com anular de polipropileno, LTS.	9
Figura 2.2: Fabricação do composto SHCC [7]	11
Figura 2.3: Duto sanduíche com anular de composto de cimento e fibra PVA, LTS.	12
Figura 2.4: Geometria do duto sanduíche.	15
Figura 2.5: Corte de seção de duto sanduíche, linha neutra das seções e momentos fletores para os casos com e sem adesão [13]	17
Figura 2.6: Gráfico de complexidade x erro das equações geradas pelo Eureka [15].	19
Figura 2.7: Obstrução por hidrato.	21
Figura 2.8: Distribuição de temperatura ao longo de um <i>flowline</i> duplamente isolado.	22
Figura 2.9: Desenho esquemático do reboque de quase-arraste.	24
Figura 2.10: Navio <i>Seven Oceans</i> da empresa <i>Subsea 7</i> , capaz de instalar em profundidades de até 3000 m de lâmina d'água e armazenar 3500 em toneladas de dutos rígidos [17].	25
Figura 2.11: Linha de produção do método <i>O-Lay</i> [19]	26
Figura 2.12: Armazenamento em espiral do método <i>O-Lay</i> [19]	27
Figura 2.13: Desenho esquemático do método <i>O-Lay</i> [19]	28
Figura 2.14: Curvatura em J da linha submarina no lançamento pelo método <i>J-Lay</i> ...	29
Figura 2.15: Saipem 7000 em operação desde 1998. Capacidade de instalar dutos de 4" a 32" de diâmetro [17].	29
Figura 2.16: Curvatura em S da linha submarina no lançamento pelo método <i>S-Lay</i> .	30
Figura 2.17: Navio <i>Solitaire</i> , um dos maiores navios de lançamento de método <i>S-Lay</i> do mundo, com 300 m de comprimento, excluindo o <i>stinger</i> [18].	31
Figura 2.18: Desenho esquemático do método <i>Steep S-Lay</i> [17].	32
Figura 2.19: Teste de dobramento do duto sanduíche realizado no LTS [7]	33
Figura 2.20: Protótipo do duto sanduíche SP-2A colapsado [7]	33
Figura 2.21: conector de duto sanduíche desenvolvido por Párraga Quispe [21].	34
Figura 2.22: Concentração de tensão no conector para 0,15 mm durante o torque de aperto.	35
Figura 2.23: Concentração de tensão no conector para 0,20 mm durante o torque de aperto.	35
Figura 2.24: Concentração de tensão no conector a exposição de carga combinada de flexão e pressão externa.	35
Figura 2.25: Pontos de uma função não-linear	39
Figura 2.26: Mínimos e Máximos Locais [32]	43
Figura 3.1: Corte de seção de duto sanduíche, linha neutra das seções e momentos fletores para os casos com e sem adesão [14]	45

Figura 3.2: Função analítica do Eureka e valores numéricos utilizados [15].	49
Figura 3.3: Resultados numéricos x analíticos do Eureka [15].	50
Figura 3.4: Gráfico dos valores da pressão de colapso de Da Silva [15] e Castello [14]	51
Figura 3.5: Usinagem do anular de PVDF dos modelos de Castillo [34]	55
Figura 3.6: Corpo de prova sendo posicionado na câmara hiperbárica [14].	55
Figura 3.7: Seção do corpo de prova SP5-II após teste de colapso [14].	56
Figura 3.8: Seção do corpo de prova PIP.M2.G1.I02 colapsado [18].	57
Figura 3.9: Modelos utilizados por Chen [8].	58
Figura 3.10: Modelos de Paz [7] em fabricação.	59
Figura 3.11: Gráfico Equação Analítica x Testes Experimentais	67
Figura 3.12: Gráfico equação analítica polímeros <i>versus</i> experimentais polímeros....	68
Figura 3.13: Gráfico equação analítica cimentícios <i>versus</i> testes experimentais cimentícios.....	69
Figura 4.1: Espessuras das camadas do duto sanduiche.	71
Figura 4.2: conector projetado por Párraga Quispe [20].	80
Figura 4.3: Áreas da figura em função das variáveis	80
Figura 5.1: Custo x Aumento da Espessura	90
Figura 5.2: Gráfico Pco Eq. Analítica cimentícios	91
Figura 5.3: Gráfico Pco Eq. Analítica poliméricos	92
Figura 5.4: Gráfico de tensão em lâmina d'água de 1.500 m pela espessura.....	93
Figura 5.5: Gráfico de tensão em lâmina d'água de 2.000 m pela espessura.....	94
Figura 5.6: Gráfico de tensão em lâmina d'água de 2.500 m pela espessura.....	94
Figura 5.7: Gráfico de tensão em lâmina d'água de 1.500, 2.500 e 2.500 metros pela espessura das paredes do duto interno + externo.....	95
Figura 5.8: Gráfico da taxa de transferência de calor resultante em função da espessura da camada anular preenchida com SHCC	96
Figura 5.9: Gráfico da taxa de transf. de calor em função da condutividade térmica....	97

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Propriedades dos polímeros utilizados como anular, segundo Chen.	10
Tabela 2.2: Pressões de colapso em dutos sanduíche [4]	14
Tabela 2.3: Resultados de análise de elementos finitos no software comercial ABAQUS comparados com testes experimentais de pressão de colapso em dutos sanduíche [3].....	16
Tabela 2.4: Representação dos parâmetros variados para o software Eureka [15].	20
Tabela 3.1: Resultados comparativos da pressão de colapso analítica e numérica	47
Tabela 3.2: Parâmetros utilizados no <i>software</i> Eureka [15].....	48
Tabela 3.3: Intervalos utilizados por Chen [8]	52
Tabela 3.4: Pressões de colapso das equações existentes x testes experimentais	53
Tabela 3.5: Materiais e referências dos modelos utilizados como base de dados.....	60
Tabela 3.6: Resumo de parâmetros geométricos dos modelos.....	61
Tabela 3.7: Relação D/t das camadas dos modelos.....	62
Tabela 3.8: Tensão de escoamento dos materiais das camadas.....	63
Tabela 3.9: Ovalização e pressão de colapso	64
Tabela 5.1: Custos dos materiais, Estefen et al [32].....	89
Tabela 5.2: Custo do conector segundo Coppini et al [33].	89
Tabela 5.3: Materiais utilizados no modelo	98
Tabela 5.4: Propriedades e custo dos materiais.....	99
Tabela 5.5: Parâmetros utilizados no modelo.	99
Tabela 5.6: Resultados dos custos das otimizações.	100
Tabela 5.7: Resultados dos materiais da camada anular	100
Tabela 5.8: Resultados das variáveis contínuas	101
Tabela 5.9: Resultados de restrições estruturais e térmica.	102
Tabela 5.10: Tabela resumo dos resultados.....	103
Tabela 5.11: Duto sanduíche x Duto de parede simples	104

1 INTRODUÇÃO

“Nas grandes batalhas da vida, o primeiro passo para a vitória é o desejo de vencer.” – Mahatma Gandhi

A crescente demanda por petróleo fez com que a exploração de óleo e gás no Brasil se expandisse para águas cada vez mais profundas, uma vez que os campos em terra não possuem grandes reservas e que os campos em águas rasas já se encontram praticamente exauridos, entrando em fase de descomissionamento. Neste sentido, o trabalho de exploração e produção de petróleo foi direcionado para águas profundas e ultra-profundas, ocasionando a descoberta de óleo nas camadas do Pré-Sal, situadas a uma distância de até 350 km da costa.

O pré-sal apresenta grandes desafios tecnológicos dada a profundidade do poço, a lâmina d'água, além da distância com o continente. Um desses desafios afeto ao objeto desse trabalho é o desenvolvimento de dutos para o transporte de óleo e gás, tendo em vista que as operações de *offloading* de óleo são complexas e arriscadas e que o gás produzido só pode ser exportado via duto submarino. Esses dutos necessitam resistir altas pressões internas e externas, além de prover isolamento térmico que garanta o escoamento dos fluidos produzidos.

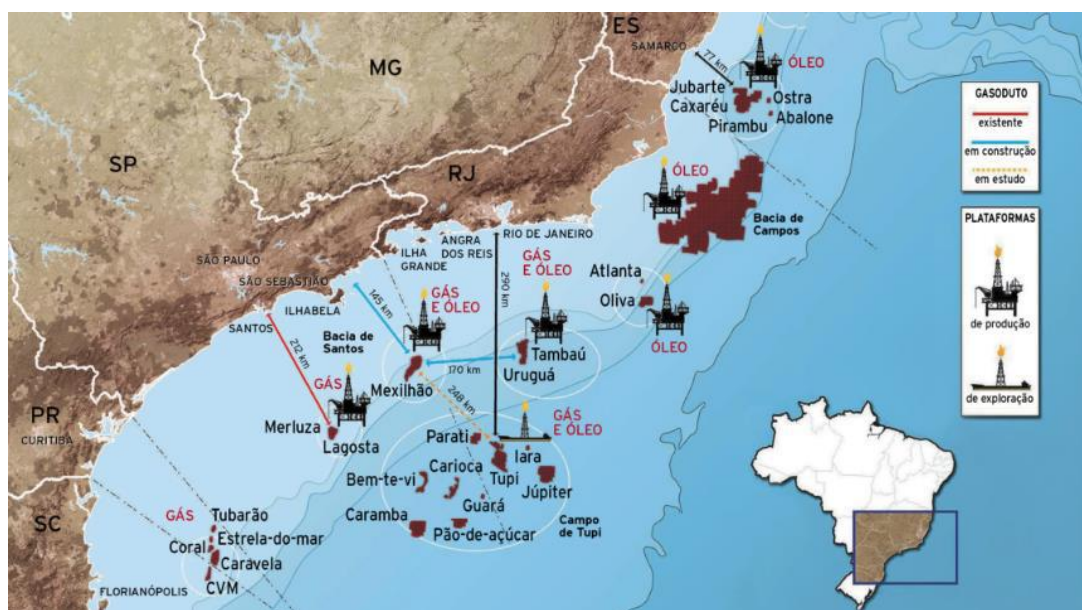


Figura 1.1: Principais campos e gasodutos nas bacias de Campos e Santos [1].

1.1 MOTIVAÇÃO

Atualmente, o transporte de fluidos em grandes profundidades e longas distâncias é realizado por dutos rígidos. O mercado utiliza dois tipos de dutos: o duto de parede simples, que é um tubo feito apenas de aço, e o *pipe-in pipe* (PIP), que é uma concepção composta por dois tubos de aço concêntricos de diâmetros diferentes, podendo ter algum material no espaço anular.



Figura 1.2: Tubos de parede simples.

Os tubos de parede simples **Figura 1.2** são muito utilizados para a construção de dutos submarinos em função de sua simplicidade e excelente relação custo/benefício. Esses dutos são normalmente fabricados em aço API X, a partir do processo de laminação, extrusão ou então conformação à frio e soldagem (processo UOE).

Apesar de possuírem uma única parede, esta é projetada com grande espessura para a obtenção de uma alta resistência à pressão externa, em função disto, os dutos de parede simples são, normalmente, projetados com acréscimo na espessura inicial entre 1,5 e 2 vezes a espessura necessária em função do conservadorismo das normas de projeto.

Ocorre que, a grande espessura da parede dos dutos submarinos gera um incremento significativo do custo de fabricação e instalação dos dutos, dificultando a sua aplicação em cenários de águas profundas e ultra profundas.



Figura 1.3: Configuração de sistema de parede simples com isolamento térmico.

Um ponto importante a ser considerado no duto de parede simples está relacionado a sua baixa capacidade de isolamento térmico. Esse aspecto faz com que seja necessário um revestimento externo adicional para a sua utilização em condições de baixas temperaturas do ambiente externo, tornando o seu custo de produção ainda mais elevado.

Uma boa solução encontrada para o isolamento térmico dos fluidos conduzidos é a utilização de dutos do tipo *pipe-in-pipe* (PIP).

O duto *pipe-in-pipe* é formado por dois tubos concêntricos de diferentes raios com o espaço anular preenchido com ar Figura 1.4 ou com algum material isolante térmico Figura 1.5.



Figura 1.4: PIP com ar.



Figura 1.5: PIP com material de isolamento.

Existe também a possibilidade de utilização do espaço anular do duto para a circulação de água quente em contra-corrente ou para acomodar um sistema de resistência elétrica, provendo um sistema de isolamento térmico ativo.

Apesar de apresentar grande vantagem quanto ao isolamento térmico, pois dificulta a perda de calor do fluido conduzido para o meio externo, sua camada anular não apresenta função estrutural alguma.

Nesse sentido, o projeto do PIP é composto de duas partes: o projeto estrutural e o projeto de isolamento térmico. No projeto estrutural, os dutos internos e externos - normalmente feitos de aço - possuem funções individualizadas nas quais a função do duto interno é resistir à pressão interna exercida pelo fluido produzido. Ao passo que, a função do duto externo é resistir à pressão da coluna hidrostática. Deste modo, os dutos interno e externo são dimensionados de forma independente, não havendo interação estrutural entre eles.

Desse modo, um aspecto vantajoso do PIP está na liberdade de utilização de materiais com ótimas propriedades térmicas, tendo em vista que o isolamento térmico é fator relevante na concepção dos dutos submarinos. Em contrapartida, duto externo provê proteção em relação ao ambiente, permitindo que materiais sem compromisso mecânico sejam empregados, segundo Grealish et al [2].

Entretanto, embora como dito acima o PIP tenha se mostrado como uma boa opção de dutos submarinos, uma outra modalidade de duto, o sanduíche, tido como uma evolução do PIP, vem sendo desenvolvido. Testes experimentais em laboratório vem demonstrando bons desempenhos mecânico e térmico. Assim, os dutos sanduíches serão objeto de estudo e análise nesta tese.

1.1 OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS

O principal objetivo desse trabalho é desenvolver um algoritmo de otimização que possa calcular as espessuras das três camadas do duto sanduíche (tubo interno, camada anular e tubo externo) para um determinado material anular a partir de um diâmetro interno e atendo aos requisitos de pressão e temperatura pré-estabelecidos.

Essa otimização terá por finalidade a reduzir o custo do duto, pois quanto menor for este custo, mais atraente se tornará para o mercado. Além de atender aos requisitos de resistência estrutural e isolamento térmico impostos nas especificações de garantia de escoamento.

Objetivos Específicos:

- Desenvolver uma formulação de Programação Não-Linear Binária (PNLB) para determinar as espessuras das camadas do duto sanduíche, assim como a espessura de cobertura, objetivando o menor custo e atendendo as condições de utilização.
- Elaborar uma formulação para cálculo de pressão de colapso do duto sanduíche a partir dos dados dos testes já realizados no Laboratório de Tecnologia Submarina e compará-la com as formulações existentes na bibliografia.
- Analisar o isolamento térmico em função das diferentes espessuras do anular e do cobertura no duto sanduíche
- Calcular a resistência à tração do duto sanduíche no método de instalação *S-Lay*.
- Demonstrar o comportamento do custo do duto sanduíche em função das espessuras.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

No Capítulo 2 realizou-se a revisão bibliográfica de vários trabalhos sobre duto sanduíche, materiais anulares, resistência estrutural e isolamento térmico. Ainda nesse capítulo, também foi feita a revisão bibliográfica para a elaboração do algoritmo de otimização de programação não-linear, programação linear inteira mista e programação não-linear inteira mista.

O capítulo 3 apresenta o modelo matemático desenvolvido para dimensionamento das espessuras do duto sanduíche, assim como suas considerações e limitações. Devido à complexidade da formulação do cálculo da pressão de colapso, serão mostradas as formulações já desenvolvidas por outros pesquisadores além da equação que foi desenvolvida neste trabalho.

O capítulo 4 mostra os resultados de custo, de resistência ao colapso e tração, isolamento térmico obtidos pelo modelo proposto. Foram realizadas diferentes

simulações para demonstrar o comportamento das restrições em função das espessuras das camadas do duto sanduíche.

Finalmente, no Capítulo 5 traremos as conclusões e sugestões para pesquisas futuras, seguido pelas referências demonstradas no Capítulo 6.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

“Logo que, numa inovação, nos mostram alguma coisa de antigo, ficamos sossegados.” - Friedrich Nietzsche

Nos últimos anos, o duto sanduíche tem atraído interesse considerável de pesquisadores que desenvolvem trabalho sobre o tema. Vários foram os trabalhos apresentados sobre suas características, dentre elas: material anular, resistência ao colapso, condutividade térmica e flexão no momento da instalação.

Neste capítulo também são abordadas algumas referências sobre algoritmos de otimização que serviram de base para a elaboração do modelo matemático desta tese. Dentre eles, podemos citar: programação não-linear, programação linear inteira mista e programação não-linear inteira mista.

2.1 DUTOS SANDUÍCHES

Esse novo tipo de duto vem se mostrando uma boa alternativa para a utilização em águas profundas, pois apresenta uma composição de menor custo em relação aos existentes atualmente no mercado. Em testes experimentais realizados no LTS/COPPE, a concepção com material cimentício dotado de adição de plastificante tem apresentado boa resistência estrutural associada a baixo custo de fabricação [3].

O que diferencia o duto sanduíche do *pipe-in-pipe* é o princípio de comportamento das três camadas (duto interno, externo e camada anular) que atuam em conjunto na função estrutural, resistindo a pressões interna e externa e na capacidade de isolamento térmico. A Figura 2.1 apresenta um exemplo de duto sanduíche com anular de polipropileno que, a princípio provê bom isolamento térmico.



Figura 2.1: Duto sanduíche com anular de polipropileno, LTS.

2.1.1 Seleção do Material para Camada Anular

A seleção do material anular dos dutos sanduíches deve ser muito bem estudada. De acordo com Souza, et al. [4] esse material deve possuir as seguintes características:

- Densidade: Quanto mais leve for o material da camada anular, menores serão os esforços sobre a embarcação devido à redução do peso próprio. Além disso, menores esforços de tração serão solicitados à linha.

- Limite de escoamento: O material constituinte da camada anular deverá resistir aos carregamentos externos sem escoar.

- Elongação no escoamento: Durante o lançamento por carretel o material polimérico deve se deformar sem ocasionar a plastificação;

- Módulo de elasticidade: O material anular deve contribuir com sua rigidez na resistência global do duto sanduíche. Quanto maior o módulo de elasticidade, maior será a pressão crítica para iniciar a falha por instabilidade.

- Condutividade térmica: É necessário assegurar o fluxo da linha evitando a formação de parafina e hidratos. A formação destes produtos indesejáveis provém da queda de temperatura do fluido devido à troca térmica com o meio externo. Por isso, a escolha de bons materiais de isolamento térmico deve ser considerada nesta análise.

- Máxima temperatura em serviço: A temperatura do fluido que emerge do poço pode chegar até 100°C. As propriedades mecânicas dos polímeros são bastante sensíveis a temperaturas elevadas. Portanto este atributo também deve ser considerado na seleção.

- Custo: O componente deve desempenhar tais funções prescritas pelo projeto com o mínimo custo.

Neste caso, essas recomendações foram estabelecidas para polímeros. No caso de materiais cimentícios a temperatura máxima em serviço não constitui uma restrição, no entanto, a questão da fragilidade sob tração deve ser considerada.

Dentre os polímeros pesquisados para material anular, segundo Chen e Estefen [5], tem-se: polipropileno sólido (SPP), policarbonato (PC), espuma sintética de epoxy (ESF), espuma de poliamida de alta densidade (HDPF) e a polieterecetona (PEEK). As propriedades desses materiais estão listadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Propriedades dos polímeros utilizados como anular, segundo Chen.

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 compósitos cimentícios estudados são: cimento puro, concreto reforçado com fibra de aço (SFRC), composto cimentício com encruamento (SHCC).

Segundo Lima [2], o compósito cimentício reforçado com fibras de aço e carbono tem maior resistência à compressão, no entanto as fibras de kevlar e polipropileno, demonstraram uma diminuição a resistência à compressão.

Nawy [6] observou que algumas fibras de reforço ao compósito podem ser de materiais poliméricos, vidro, aço e carbono, pois elas são elementos descontínuos e randomicamente distribuídos com capacidade de aumentar a rigidez e reduzir a propagação e aumento de micro-falhas.

Os dutos sanduíches preenchidos com SHCC, do inglês *Strain-hardening Cementitious Composite*, têm demonstrado boas características térmicas, mecânicas e processo mais simples de montagem como demonstrado por Paz [7]. Ainda de acordo com Paz [7], o compósito SHCC contém maior teor de cimento que o concreto convencional para se ter o controle da reologia do compósito facilitando a dispersão das fibras. Como consequência, o SHCC apresenta um comportamento extremamente dúctil, chegando à capacidade de deformação 300 vezes maior que a de um concreto sem reforço.



Figura 2.2: Fabricação do composto SHCC [7]

Além dos materiais mencionados, um outro estudo foi realizado com composto cimentícios reforçados com fibra de PVA, conforme Chen [8]. A Figura 2.3 apresenta a secção transversal desta concepção.

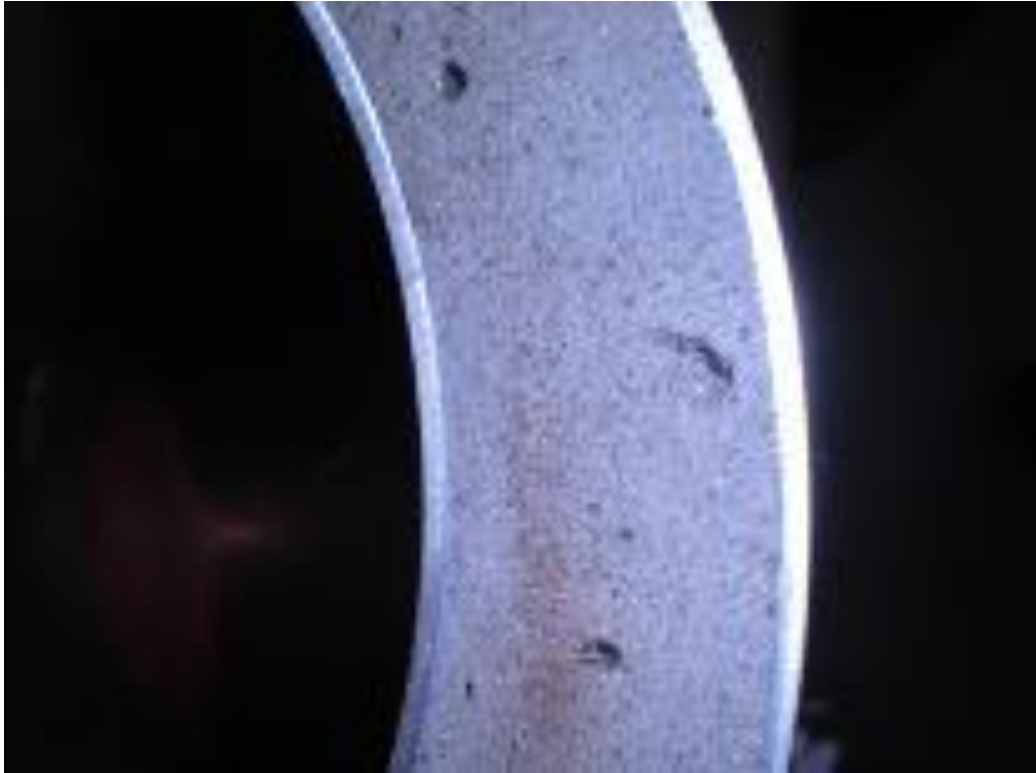


Figura 2.3: Duto sanduíche com anular de composto de cimento e fibra PVA, LTS.

2.1.2 Resistência Estrutural do Duto Sanduíche

Segundo Pasqualino [9], a produção de petróleo em águas profundas necessita de uma extensa rede de dutos de exportação submersas para o escoamento de óleo e gás. Essas linhas estão expostas a severas condições ambientais, tais como pressão externa, correntes marinhas, salinidade, baixa temperatura, entre outros. Sem desprezar a importância dos demais, o carregamento de pressão externa é sem dúvida o fator mais crítico a ser considerado, tornando o valor da pressão de colapso do duto P_{co} o principal parâmetro de projeto.

A pressão de colapso define a resistência de um duto intacto à atuação da pressão externa, no entanto, deve-se considerar a possibilidade de avaria do mesmo, resultando em diminuição dessa capacidade de resistência.

Esta avaria pode ser causada pela colisão de um objeto pesado, por flexão excessiva durante a operação de lançamento ou por fatores ambientais tais como terremotos, correntes marinhas, etc.

A performance estrutural dos dutos deve ser avaliada nos processos de maiores exigências mecânica dos mesmos. Essas exigências apresentam-se no momento de instalação devido a flexão combinada com pressão ou tração dos dutos, no período de produção em função da pressão interna e quando os dutos estão operando em grandes profundidades, ocasionada pelas pressões externas elevadas.

A metodologia utilizada para se avaliar a resistência à pressão externa dos dutos submarinos, consiste no cálculo das pressões de colapso e de propagação, através de análises pelo método de elementos finitos, fórmulas analíticas ou normas. Essas pressões também podem ser avaliadas a partir de testes experimentais utilizando-se câmaras hiperbáricas para testar modelos reduzidos ou em escala real [9].

Pesquisas sobre o duto sanduíche têm apresentado bons resultados no que diz respeito à resistência sob pressões externas (Netto et al. [10]) e às cargas de flexão devido aos métodos de instalação (Pasqualino et al. [9]).

Conforme publicado por Chen e Estefen [5], estudos analíticos foram realizados para entender melhor a pressão de colapso de dutos sanduíche sobre pressão hidrostática. Arjomandi and Taheri [11] desenvolveram modelos em estado plano de tensões, assim como, Besides, Kardomateas e Simitzes [12] realizaram um estudo tridimensional de propagação de estruturas sanduíche.

Muitos testes experimentais de pressão de colapso (P_{co}) em dutos sanduíche já foram realizados, como os de ovalização demonstrado na Tabela 2 de Chen e Estefen [5]. Os dados obtidos nesses testes são de grande importância para análises de resistência desses dutos sob pressão externa.

Tabela 2.2: Pressões de colapso em dutos sanduíche [4]

Rótulo de SP	Tubo	Diâmetro (mm)	Espessura (mm)	Ovalidade (%)	P_{co} (Mpa)
PIP.M1.G1.101*	Interior	49,15	1,62	0,225	43,35
	Exterior	74,97	1,62	0,629	
PIP.M1.G1.102*	Interior	50,36	1,63	0,120	34,09
	Exterior	75,92	1,65	0,266	
PIP.M1.G1.101*	Interior	50,76	1,68	0,205	10,98
	Exterior	62,16	1,47	1,161	
PIP.M1.G1.102*	Interior	50,73	1,67	0,260	12,11
	Exterior	62,28	1,47	0,698	
PIP.M1.G1.102*	Interior	49,64	1,68	0,456	37,64
	Exterior	75,4	1,62	0,301	
PIP.M1.G1.103*	Interior	49,94	1,62	0,186	31,14
	Exterior	75,19	1,61	0,255	
PIP.M1.G1.101*	Interior	49,94	1,70	0,364	20,31
	Exterior	62,1	1,46	0,801	
PIP.M1.G1.102*	Interior	50,03	1,69	0,547	17,13
	Exterior	62,4	1,49	0,552	
DS.PP.P.01**	Interior	51,4	1,53	1,101	18,2
	Exterior	76,82	1,65	0,477	
DS.PP.P.02**	Interior	51,05	1,49	0,670	15,8
	Exterior	76,92	1,64	0,569	
DS.PP.P.03	Interior	51,61	1,53	1,117	17,1
	Exterior	76,9	1,65	0,543	
SP1 – I [#]	Interior	168,3	6,35	0,18	27,9
	Exterior	219,1	6,35	0,40	
SP1 – II [#]	Interior	168,3	6,35	0,20	27,2
	Exterior	219,1	6,35	0,39	
SP2 – I [#]	Interior	168,3	6,35	0,28	21,0
	Exterior	219,1	6,35	0,35	
SP2 – II [#]	Interior	168,3	6,35	0,41	26,4
	Exterior	219,1	6,35	0,34	
SP5 – I [#]	Interior	168,3	6,35	0,53	35,7
	Exterior	219,1	6,35	0,40	
SP5 – II [#]	Interior	168,3	6,35	0,43	29,7
	Exterior	219,1	6,35	0,35	
SP1 ^{##}	Interior	152,4	1,8	0,32	30,5
	Exterior	202,7	2	0,41	
SP2 ^{##}	Interior	152,5	1,8	0,22	30,6
	Exterior	203	2	0,47	
SP3 ^{##}	Interior	152,6	1,8	0,23	29,7
	Exterior	202,9	2	0,39	

*: Etiqueta de SP usada em Estefen et al. (2005), onde M1 e M2 indicaram que os materiais do núcleo eram cimento e polipropileno, respectivamente, e G1 identificou as diferentes geometrias. **: Etiqueta de SP usada em Souza (2008). : Etiqueta OF SP usada em Castello (2011), onde apenas o diâmetro nominal e a espessura foram apresentados. : Etiqueta do SP em An (2012a).

A equação de ovalização (2.1) foi utilizada por Chen [8] para a análise dos dados.

$$\Delta_0 = \frac{D_{max} - D_{min}}{D_{max} + D_{min}} \quad (2.1)$$

Alguns ajustes foram realizados com o software MATHEMATICA. Esse trabalho foi feito em função das ovalizações dos modelos. Na Figura 8 abaixo, onde t é a espessura, pode ser visto a geometria considerada por Chen.

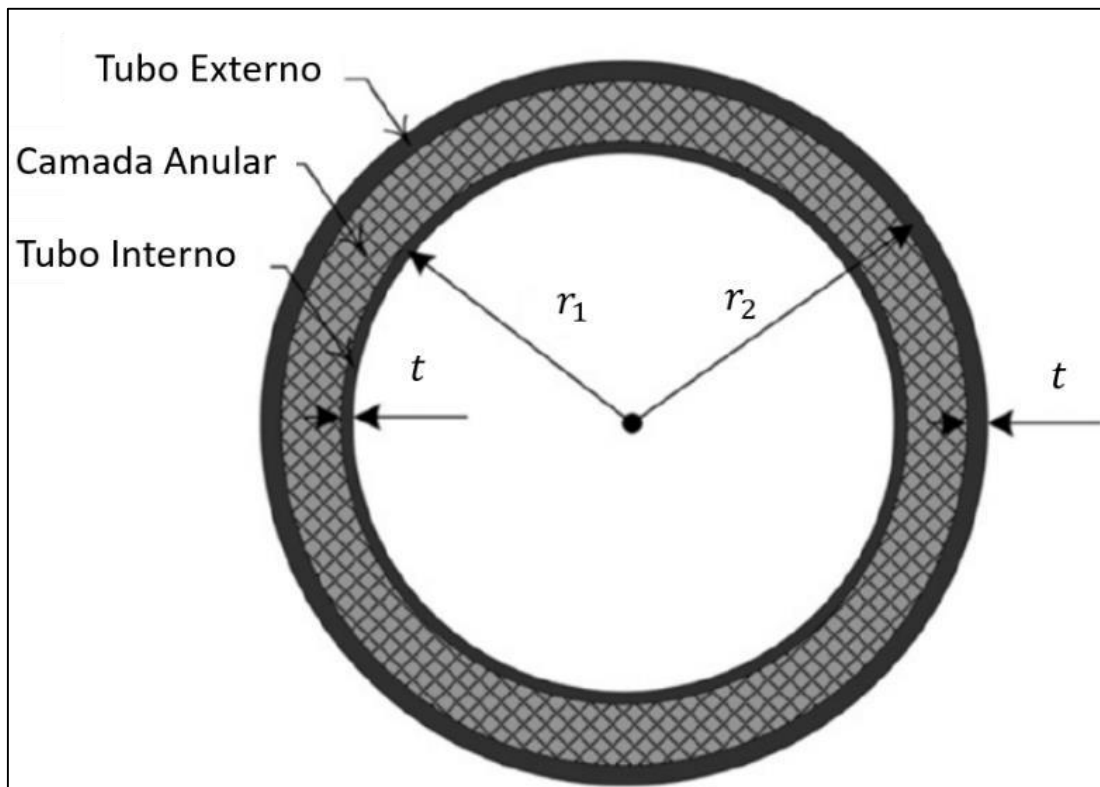


Figura 2.4: Geometria do duto sanduíche.

Muitos estudos com o método de elementos finitos também foram utilizados para analisar as pressões de colapso sob pressão externa, como podemos observar na Tabela 3 elaborada por Chen e Estefen [5].

Tabela 2.3: Resultados de análise de elementos finitos no software comercial ABAQUS comparados com testes experimentais de pressão de colapso em dutos sanduíche [3].

Rótulo de SP	Tipos de Elementos	Características do Modelo	\hat{P}_{co-f} (MPa)	\hat{P}_{co-u} (MPa)	P_{co} (MPa)
PIP.M1.G1.101*	CPE8	Uum quarto de anel	46,23	37,97	43,35
PIP.M1.G1.102*	CPE8	Uum quarto de anel	44,78	38,05	34,09
PIP.M1.G1.101*	CPE8	Uum quarto de anel	24,70	8,110	10,98
PIP.M1.G1.102*	CPE8	Uum quarto de anel	25,74	10,03	12,11
PIP.M1.G1.102*	CPE8	Uum quarto de anel	39,56	12,84	37,64
PIP.M1.G1.103*	CPE8	Uum quarto de anel	38,27	12,52	31,14
PIP.M1.G1.101*	CPE8	Uum quarto de anel	20,84	6,310	20,31
PIP.M1.G1.102*	CPE8	Uum quarto de anel	22,42	6,890	17,13
PIP.M1.G1.102**	C3D20 C3D20H	Metade do anel	32,7	12,3	37,64
PIP.M1.G1.103**	C3D20 C3D20H	Metade do anel	32,2	12,0	41,14
PIP.M1.G1.101**	C3D20 C3D20H	Metade do anel	20,2	6,50	20,31
PIP.M1.G1.102**	C3D20 C3D20H	Metade do anel	21,5	7,00	17,13
DS.PP.P.01**	C3D20 C3D20H	Metade do anel	-	16,4	18,20
DS.PP.P.02**	C3D20 C3D20H	Metade do anel	-	16,2	15,80
DS.PP.P.03**	C3D20 C3D20H	Metade do anel	-	16,6	17,10
SP1 – I [#]	CPEG4	Anel Completo	27,6	-	27,9
SP1 – II [#]	CPEG4	Anel Completo	27,1	-	27,2
SP2 – I [#]	CPEG4	Anel Completo	21,1	-	21,0
SP2 – II [#]	CPEG4	Anel Completo	28,8	-	26,4
SP5 – I [#]	C3D27 C3D27H	Anel Completo	36,5	-	35,7
SP5 – II [#]	C3D27 C3D27H	Anel Completo	29,6	-	29,7
SP1 ^{##}	C3D8R	Uum quarto de anel	35,6	31,5	30,5
SP2 ^{##}	C3D8R	Uum quarto de anel	36,1	32,0	30,6
SP3 ^{##}	C3D8R	Uum quarto de anel	35,3	31,1	29,7

*: SP simulado por Estefen et al. (2005). **: SP simulado por Souza (2008), onde C3D20 era para tubos e C3D20H era para núcleo de polipropileno. #: SP simulado por Castello (2011), onde C3D27 era fortubes, e C3D27H era para núcleo de polipropileno no modelo de comprimento total. ##: SP simulado por An (2012a). P e p significam a pressão de colapso calculada numericamente de SP com condições de interface totalmente unidas e não ligadas, respectivamente.

Algumas formulações analíticas foram desenvolvidas para cálculo da pressão de colapso em dutos com mais de uma camada.

Timoshenko [13] desenvolveu uma equação para colapso de tubos através de equações diferenciais para a curva de deflexão de barras finas com linha de centro circular. Portanto, a pressão crítica de colapso de tubos longos foi definida por:

$$P_e = \frac{3EI}{(1-\nu^2)R^3} \quad (2.2)$$

onde P_e é a pressão colapso em regime elástico do material, EI é a rigidez à flexão, R o raio médio do tubo e ν coeficiente de Poisson equivalente.

Segundo Castello [14], após o limite elástico, a pressão crítica deve ser menor que a obtida pela equação (2.1). A partir desta equação, Castello [14], acrescentou as imperfeições geométricas na forma de ovalização, o momento fletor por multiplicação da carga de compressão circunferencial pela distância entre a geometria oval e a perfeitamente circular. A consideração de que a pressão se apresenta crítica no momento que o material inicia o escoamento em função da soma do momento e do esforço compressivo, resulta a Equação (2.3), onde a pressão de resistência limite está representado por P_{co} .

$$P_{co}^2 - P_{co} \left[P_0 + P_e \left(1 + 6 \frac{R}{t} \delta_0 \right) \right] + P_0 P_e = 0 \quad (2.3)$$

Castello [13], reconhecendo a importância da aderência entre as camadas, propôs que o deslizamento livre entre camadas equivale a calcular a inércia de cada parte do tubo como independente umas das outras. Com isso, a linha neutra (L.N.) de cada camada fica localizada no meio sua respectiva espessura, como demonstrado na Figura 2.5 .

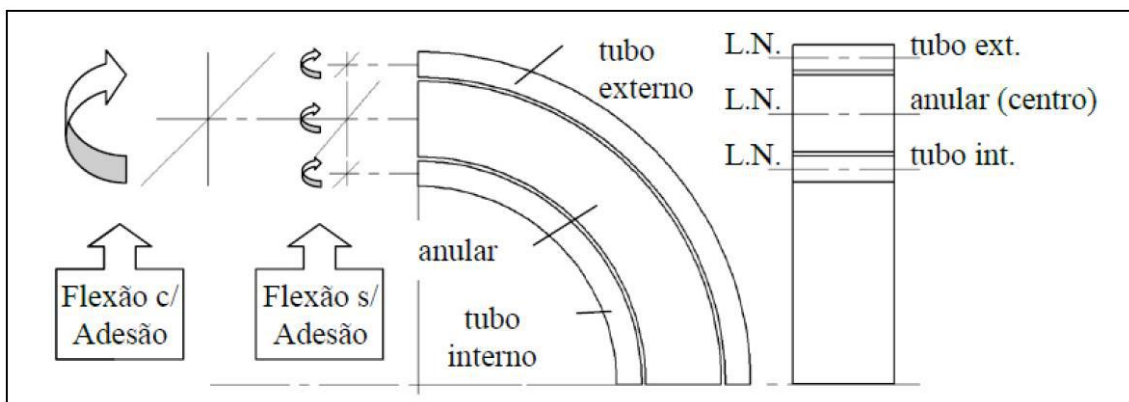


Figura 2.5: Corte de seção de duto sanduíche, linha neutra das seções e momentos fletores para os casos com e sem adesão [13]

Castello [14] reescreveu a pressão de colapso elástica a partir da equação de colapso de Timoshenko [13] para o duto sanduíche, utilizando uma resistência à flexão equivalente (EI_{eq}) e um raio médio (R_m) a partir da seguinte equação:

$$EI_{eq} = E_i I_i + E_a I_a + E_e I_e \quad (2.4)$$

Onde, os subscritos "e", "a" e "i" indicam duto externo, anular e duto interno, respectivamente.

Portanto, segundo Castello [13], a pressão de colapso elástica (P_e) para o caso do duto sanduíche pode ser obtida pela equação:

$$P_e = \frac{3EI_{eq}}{(1-\nu^2)R_m^3} \quad (2.5)$$

O coeficiente de Poisson equivalente (ν) pode ser obtido pela média dos coeficientes do aço e do anular:

$$\nu_{eq} = \frac{\nu_{aço} + \nu_{anular}}{2} \quad (2.6)$$

Ainda segundo Castello [13] o raio médio (R_m) é obtido pelo coeficiente de Poisson através do valor médio dos coeficientes dos materiais, o que resultará na solução da equação de colapso de Timoshenko [12] (2.4) para o caso do duto sanduíche:

$$P_{co} = \frac{P_0 t + P_e t - \sqrt{36R_m^2 P_e^2 \delta_0^2 + 12R_m P_0 P_e \delta_0 t + 12R_m P_e^2 \delta_0 t + P_0^2 t^2 - 2P_0 P_e t^2 + P_e^2 t^2 + 6R_m P_e \delta_0}}{2t} \quad (2.7)$$

Onde a pressão de colapso plástica é dada pela equação:

$$P_0 = \frac{\sigma_0 t_i}{R_{mi}} + \frac{\sigma_0 a t_a}{R_{ma}} + \frac{\sigma_0 e t_e}{R_{me}} \quad (2.8)$$

Onde σ_0 : Tensão de escoamento, t: Espessura, R_m : Raio médio e os subscritos "e", "a" e "i" indicam duto externo, anular e duto interno, respectivamente.

Uma outra formulação para o cálculo da pressão de colapso foi proposta por Da Silva [15]. Trata-se de uma formulação desenvolvida pelo *software* Eureka (Schmidt, 2014), fornecido pela empresa Nutonian, Inc. a partir de 144 resultados de simulação numérica realizados no ABAQUS.

Segundo Da Silva [14], Eureka é um software de modelagem matemática que automatiza o processamento e análise de dados. Fazendo uso de algoritmos evolutivos, o software é capaz de criar modelos preditivos em minutos. Ao decorrer do processamento, o Eureka constrói séries numéricas temporais, gerando e atualizando modelos automaticamente, tornando fácil a criação de algoritmo.

O *software* realiza bilhões de interações buscando equações que resultam nos valores desejados que são previamente informados. Para isso, também necessita os parâmetros que são considerados relevantes para obtenção desses valores. Esse algoritmo não utiliza premissas que orientem as interações.

O Eureka realiza uma varredura das equações e as classifica pelo grau de complexidade e o valor do erro, demonstrando uma relação constante entre a simplicidade e a complexidade das equações encontradas. Além dessa relação entre simplicidade e a complexidade, o *software* também realiza uma classificação em função do erro demonstrado pela equação.

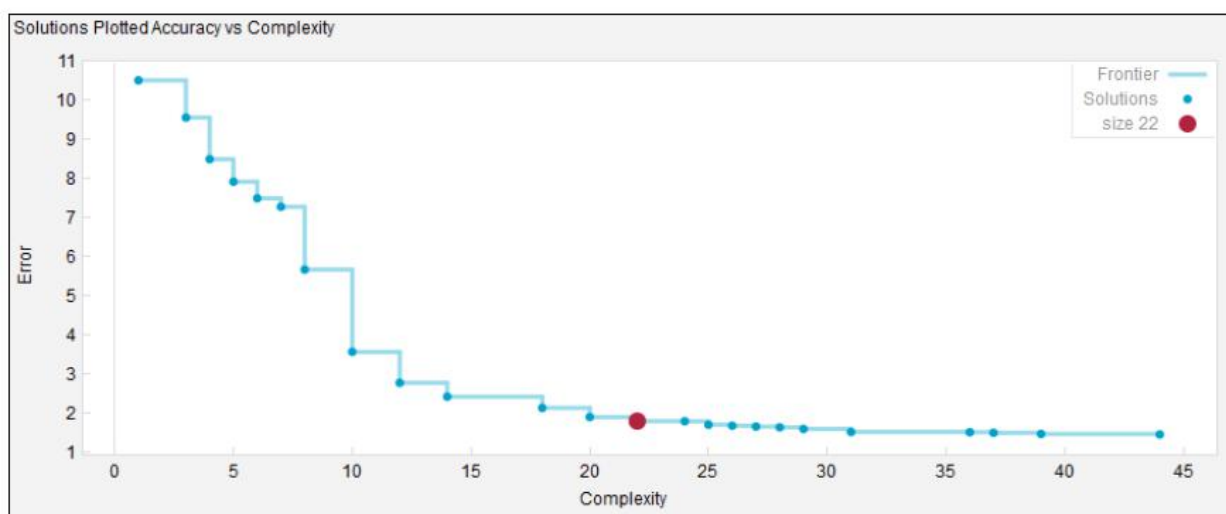


Figura 2.6: Gráfico de complexidade x erro das equações geradas pelo Eureka [15].

Os parâmetros em função das propriedades considerados mais relevantes por Da Silva [15] são apresentadas na tabela abaixo:

Tabela 2.4: Representação dos parâmetros variados para o software Eureka [15].

Parâmetro Variado	Parâmetro Considerado – Input Eureka	Unidade
Geometria	Razão do Diâmetro Externo do Duto Externo pela Espessura do Duto	Adimensional
	Razão do Diâmetro Externo do Duto Externo pela Espessura Total do Duto Sanduiche	Adimensional
Material	Tensão de Escoamento do Aço do Duto Externo	MPa
	Tensão de Ruptura do Aço do Duto Externo	MPa
	Tensão de Escoamento do Aço do Duto Interno	MPa
	Tensão de Ruptura do Aço do Duto Interno	MPa
Ovalização	Nível de Ovalização da Seção do Duto	Adimensional
Fator de Atrito	Nível de Atrito entre as Seções	Adimensional

A equação matemática obtida por Da Silva [14] está apresentada abaixo:

$$P_{colapso} = f\left(\frac{D_{op}}{t_{op}}, \frac{D_{op}}{t_{TOTAL}}, \sigma_{escOP}, \Delta, FA\right) \quad (2.9)$$

$$P_{colapso} = \frac{30,5+44,2FA+0,0418 \cdot \sigma_{escOP}}{\Delta \cdot \left(\frac{D_{op}}{t_{TOTAL}}\right)^2} - 00,486 \cdot \frac{D_{op}}{t_{op}} \cdot \frac{D_{op}}{t_{TOTAL}} \quad (2.10)$$

onde FA é o fator de atrito entre as camadas; σ_{esc} a tensão de escoamento do material do duto externo; Δ o nível de ovalização entre as seções ($\Delta \leq 0.03$); $\frac{D_{OP}}{t_{OP}}$ é a razão entre o diâmetro do duto externo pela espessura do duto externo; $\frac{D_{OP}}{t_{Total}}$ é a razão entre o diâmetro do duto externo pela espessura total do duto sanduíche.

2.1.3 Isolamento Térmico do Duto Sanduíche

O isolamento térmico em dutos submarinos é de extrema importância para a garantia de escoamento, pois esses dutos são instalados em grandes profundidades, onde a temperatura do mar se apresenta muito baixa (em torno de 4°C). Como a temperatura do fluido é mais alta que a do mar, o fluido tende a perder calor por condução caso não haja um bom isolamento térmico.

Outro tipo de perda de calor pode ocorrer por convecção, que basicamente ocorre de duas formas:

- Interna, através do escoamento do fluido que perde calor para o duto.
- Externa, com o movimento de correntes marinhas que também fazem o duto perder calor.

Essas perdas de calor causam grandes riscos ao escoamento do fluido, porque geram a possibilidade da formação de hidratos e/ou parafina que podem reduzir a vazão ou até obstruir o duto.



Figura 2.7: Obstrução por hidrato.

Um método analítico de calcular as transferências de calor entre estruturas de múltiplas camadas e o meio externo é o cálculo do *U-value*. Essa metodologia engloba as perdas por condução e convecção ao longo de todo comprimento do duto.

Através deste método torna-se mais simples comparar os isolamentos térmicos de diferentes configurações de dutos, gerando-se gráficos como mostrado na Figura 2.8, onde T_i é a temperatura interna, T_o a externa e T_1, T_2, T_3 e T_4 são as temperaturas nas interfaces, posicionadas nos raios r_1, r_2, r_3 e r_4 , respectivamente

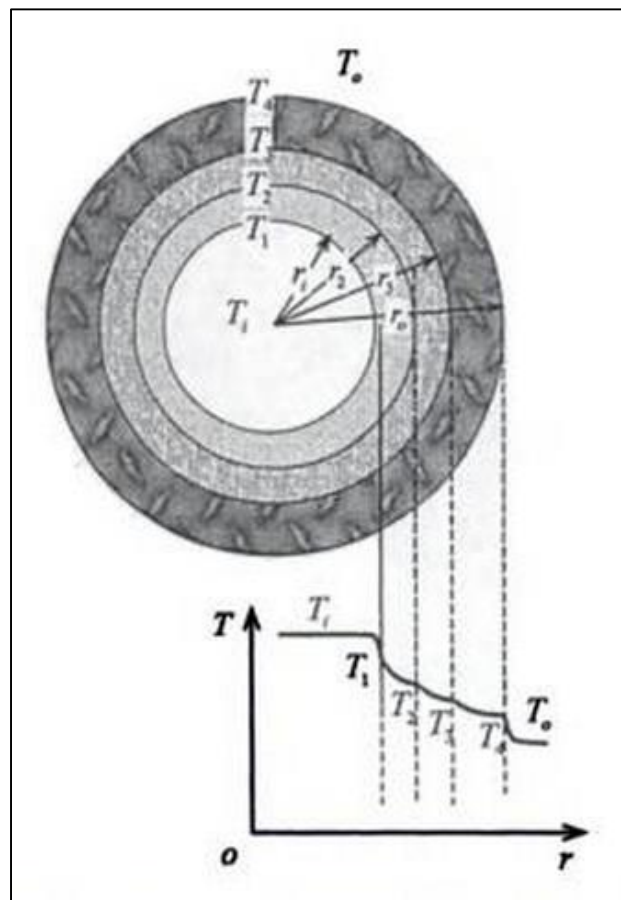


Figura 2.8: Distribuição de temperatura ao longo de um *flowline* duplamente isolado.

Na configuração do duto sanduíche, temos uma camada de aço e duas camadas de isolamento térmico. O *U-value* permite calcular a perda de calor radial do duto em função da área em que ocorre a troca de calor e das temperaturas dos meios interno e externo, tomando-se como base a seguinte equação:

$$Q_r = LA(T_i - T_o) \quad (2.11)$$

Onde Q_r : Taxa de transferência de calor, A : Área externa do duto, T_o : Temperatura do fluido externo e T_i : Temperatura do fluido interno.

O valor de U -value é obtido pela soma dos resultados das trocas térmicas por convecção e condução. Neste caso, o U -value será obtido através de duas parcelas oriundas das trocas de calor por convecção e três parcelas ocorridas das trocas de calor por condução. Logo, pode-se calcular a taxa de troca de calor global pela seguinte equação:

$$Q_r = \frac{T_i - T_o}{\frac{1}{2\pi r_i L h_i} + \frac{\ln(r_1/r_i)}{2\pi k_1 L} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi k_2 L} + \frac{\ln(r_o/r_2)}{2\pi k_3 L} + \frac{1}{2\pi r_o L h_o}} \quad (2.12)$$

Onde: Q_r : Taxa de transferência de calor, h : Coeficiente de convecção, L : Comprimento do duto, r_o, r_i : Raios interno e externo, r_1, r_2, r_3 : Raios das interfaces 1, 2 e 3, respectivamente, K constante de transferência de calor, T_o : Temperatura do fluido externo e T_i : Temperatura do fluido interno.

Esse método de cálculo é o mesmo utilizado nos Softwares OLGA e PIPESIM.

Para o caso do duto sanduíche, a equação é a mesma, pois ele possui duas camadas de aço e uma anular que provê um bom isolamento térmico. Então, pode-se obter o valor do U -value do duto sanduíche por essa mesma equação.

Sabendo que a temperatura do fluido é de grande relevância na obtenção do U -value, pois a troca de calor é proporcional ao gradiente de temperatura, logo o valor do coeficiente de troca térmica global é muito influenciado pela temperatura do mesmo.

Outra consideração importante é a velocidade do fluido, pois isso gera perda de calor por convecção. Essa perda de calor por convecção é significativa, pois ocorre em toda extensão da linha de duto submarino.

2.1.4 Instalação do Duto Sanduíche

O processo de instalação é um fator muito importante no desenvolvimento de dutos submarinos, pois tal processo apresenta grande complexidade. A instalação pode causar diferentes danos nos dutos que podem influenciar a sua operação e/ou sua vida

útil. O projeto dos dutos tem que prever qual será o método adotado. Existem diversos tipos de métodos de instalação. Dentre os diferentes tipos de instalação se destacam:

- Método de Arraste/Reboque;
- Método Carretel (Reel-Lay);
- Método O-Lay;
- Método J-Lay;
- Método S-Lay.

No método de reboque, pequenos trechos da linha de dutos são soldados ainda em terra. O transporte é realizado por embarcações que os rebocam até o local de instalação. O arraste mostra-se como um processo muito agressivo, pois ocasionam muitos danos nos dutos.

Dentre os tipos de lançamentos, esse é o que resulta em maior número de avarias nos dutos. Devido à grande frequência de deformações, esse método se restringe às águas rasas por serem mais próximas do continente.

Segundo Silva [16], o método de reboque reduz as tensões de instalação na linha de dutos, pois o reboque aplica a tração apenas na extremidade do trecho de duto que é arrastado. A maior parte dos dutos são apoiados por flutuadores ou no leito marinho, como podemos ver na figura 2.9, abaixo.

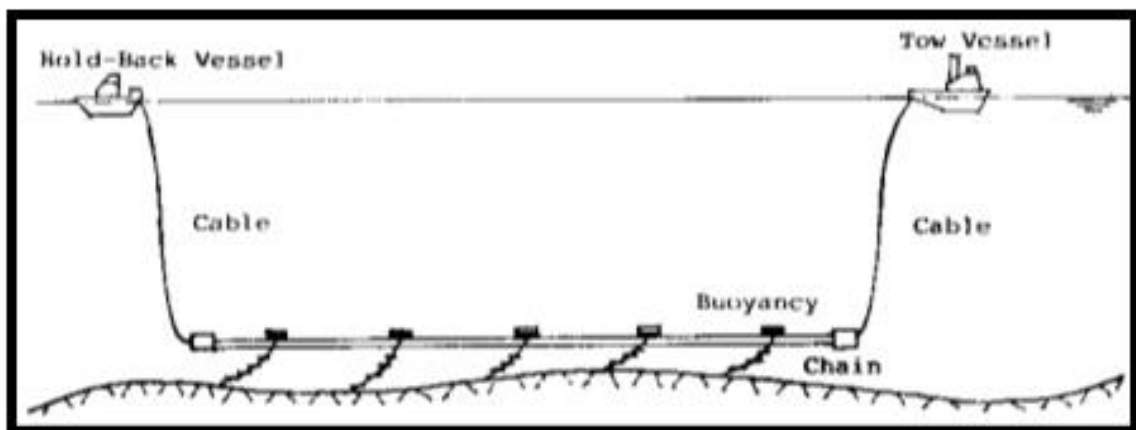


Figura 2.9: Desenho esquemático do reboque de quase-arraste.

O método carretel é um dos mais utilizados em águas profundas. O processo de solda e inspeção das linhas são realizados antes de serem embarcados, nas próprias plantas de fabricação dos dutos ou em plantas próximas aos portos para facilitar a logística. A montagem dessas linhas de dutos em terra permite um maior controle de qualidade, que é muito importante no caso da solda como exemplo.

Conforme a linha de dutos é produzida, a mesma é enrolada em carretéis que serão embarcados em navios de lançamento. No processo de instalação a linha é desenrolada, sofre retificação e é lançada por uma rampa de lançamento que se encontra inclinada. Essa rampa possui rolos que pressionam os dutos para garantir que linha tenha a tração necessária para sua sustentação durante o lançamento [17].

Esse processo ocasiona esforços mecânicos nos dutos antes de seu lançamento resultando em deformações plásticas, que muitas vezes aumentam as imperfeições iniciais dos dutos, que influenciam diretamente na resistência limite da estrutura [18].



Figura 2.10: Navio *Seven Oceans* da empresa *Subsea 7*, capaz de instalar em profundidades de até 3000 m de lâmina d'água e armazenar 3500 em toneladas de dutos rígidos [17].

Segundo Paz [7], o método *O-lay* utiliza um navio de lançamento mais simples, porém mostra-se bem flexível em relação aos dutos e a profundidade do leito marinho. Esse processo possibilita a instalação de dutos maiores, com até 36 polegadas de diâmetro. O *O-lay* também permite a instalação de linhas submarinas em águas rasas e profundas, o que demonstra grande diversidade de aplicabilidade do método.

Uma outra característica desse processo, está na fabricação de linhas de dutos em plantas *onshore* próximas a áreas de embarcações com o armazenamento *offshore*. A produção da linha de dutos é realizada em terra e direcionada para o mar, ou seja, o início da linha de produção está no continente e o fim é direcionado por embarcações sobre as águas. As embarcações direcionam a linha de dutos até formar um círculo, daí o nome do método ser *O-lay*.

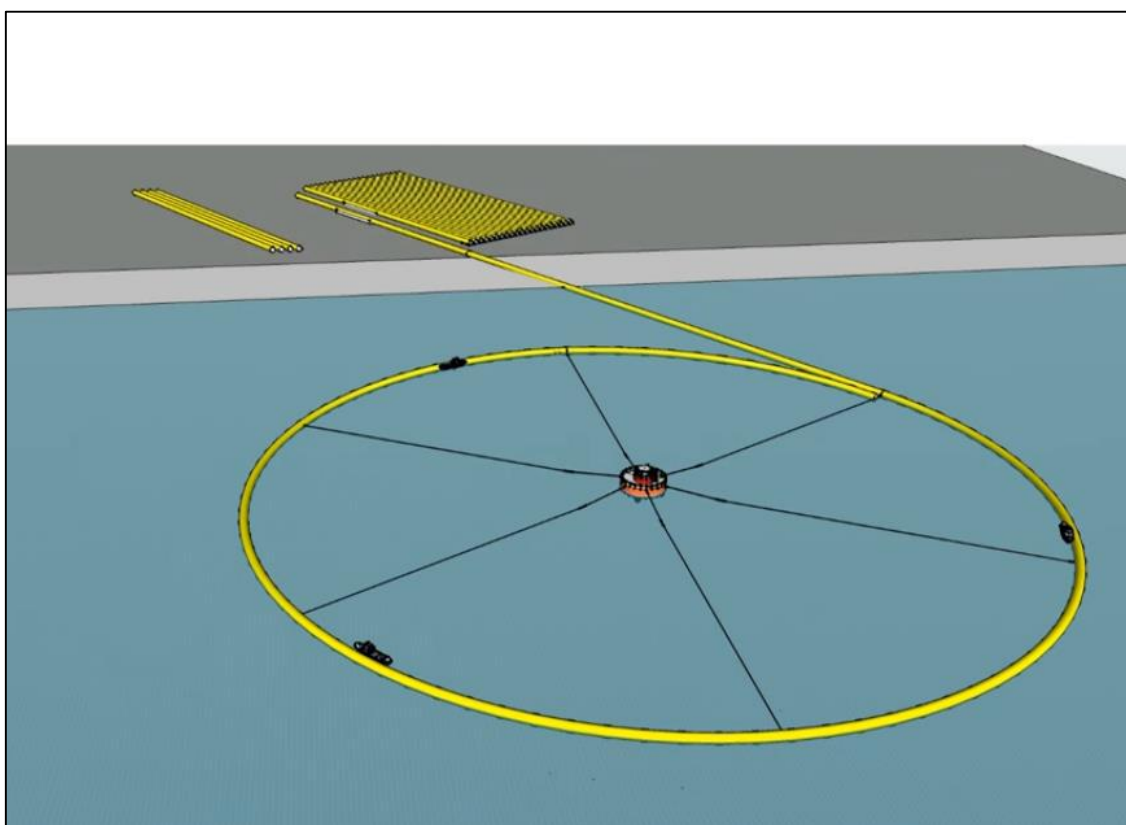


Figura 2.11: Linha de produção do método *O-Lay* [19]

O armazenamento em forma de círculo é apoiado por uma boia central e mais de um rebocador faz a orientação do percurso circular. Cordas e sistemas de ancoragem reduzem o movimento e evitam que a primeira volta saia de sua posição inicial em relação ao eixo. Após a formação da circunferência da linha continua girando em torno da boia central formando um espiral. O comprimento máximo da linha produzida limita-se pelo peso que os rebocadores podem suportar. O processo prevê a elaboração de linhas de dutos com mais de 100 km de extensão.

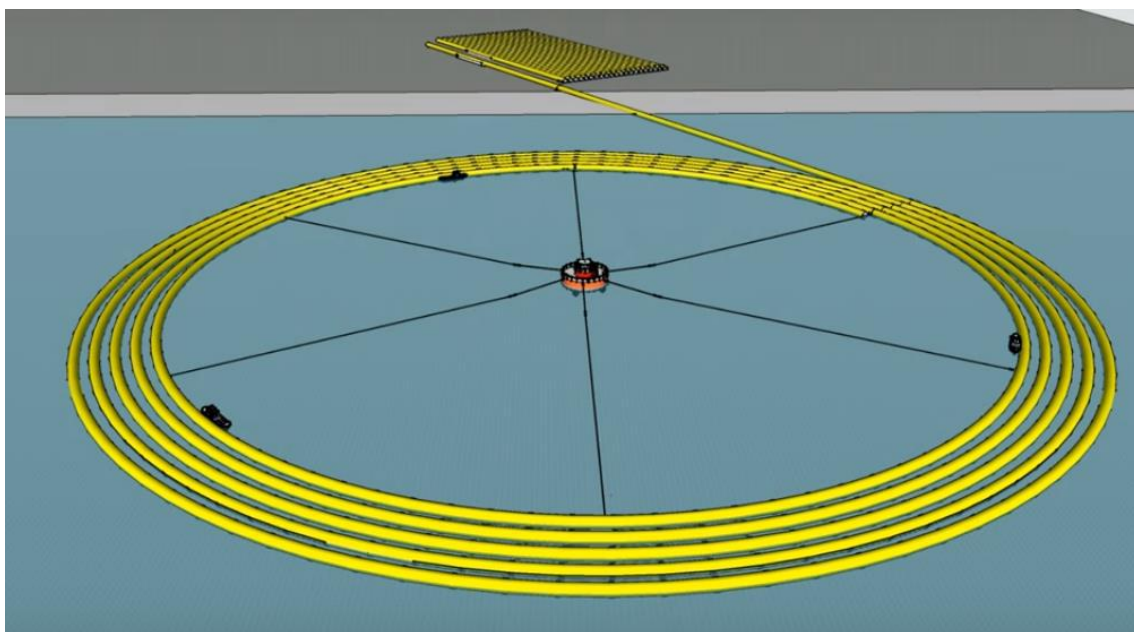


Figura 2.12: Armazenamento em espiral do método *O-Lay* [19]

O transporte da linha é realizado por reboque, ainda em forma de espiral, com apoio de uma balsa central até o local de lançamento. A instalação da linha submarina é realizada por uma embarcação sem grandes complexidades, pois a linha já está montada e pronta para o lançamento.

Este método ainda não é praticado pelas companhias de petróleo que atuam no mercado *offshore*, pois necessita de pesquisas mais elaboradas. Os métodos utilizados pelas empresas, atualmente, para a instalação de dutos submarinos em águas profundas são os S-Lay e J-Lay.

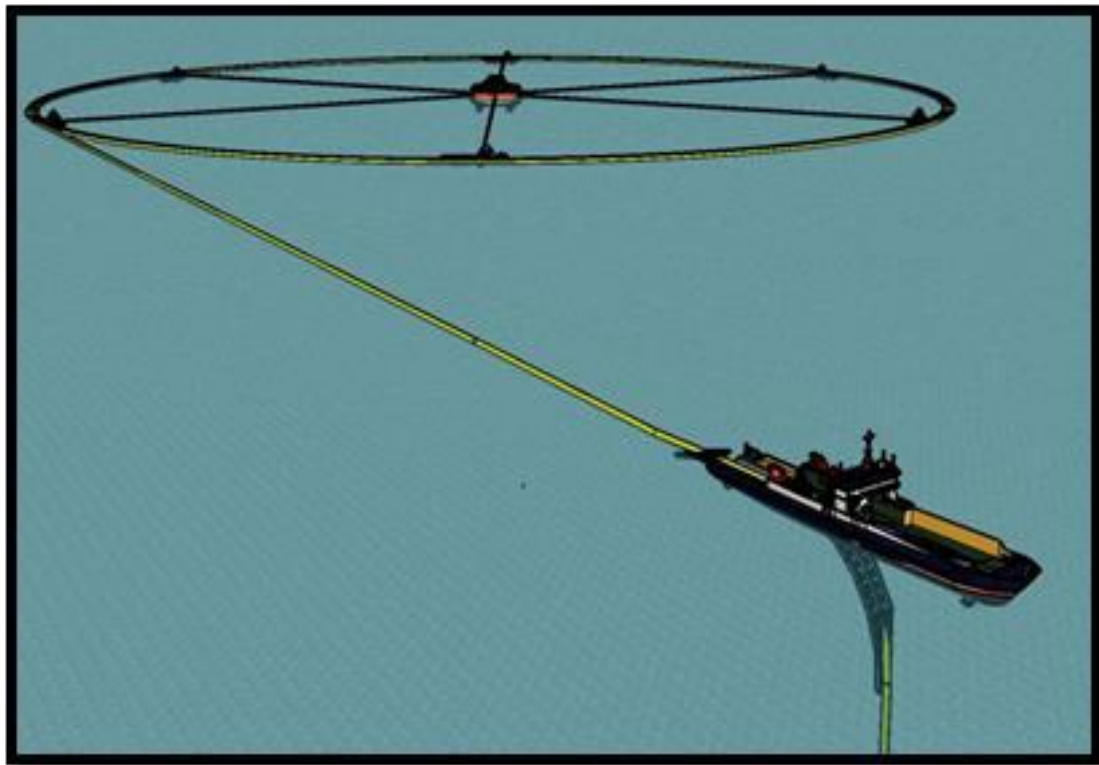


Figura 2.13: Desenho esquemático do método *O-Lay* [19]

O método *J-Lay* é praticado para o lançamento de dutos em águas profundas. Ao contrário do método *O-Lay*, a montagem da linha de dutos é realizada na própria embarcação, que necessita de equipamentos para o manuseio dos dutos e estação de soldagem e posto de inspeção a bordo. Os dutos são soldados verticalmente na torre central, e após inspeção se encaminham para o *stinger* (rampa de lançamento). O *stringer* encontra-se na posição vertical ou em um pequeno ângulo de inclinação (entre 0° e 15°).

O lançamento da linha submarina acontece no ritmo de solda e inspeção dos dutos e ocorre na torre de montagem localizada, em sua maioria das vezes, no centro da embarcação. Nesse processo não apresenta ponto de inflexão da curvatura, formando apenas uma curvatura (*sagbend*) importante de ser controlada. Como a região de *overbend* não existe, a configuração se aproxima ao desenho da letra “J”, dando o nome ao método de *J-Lay* [16].

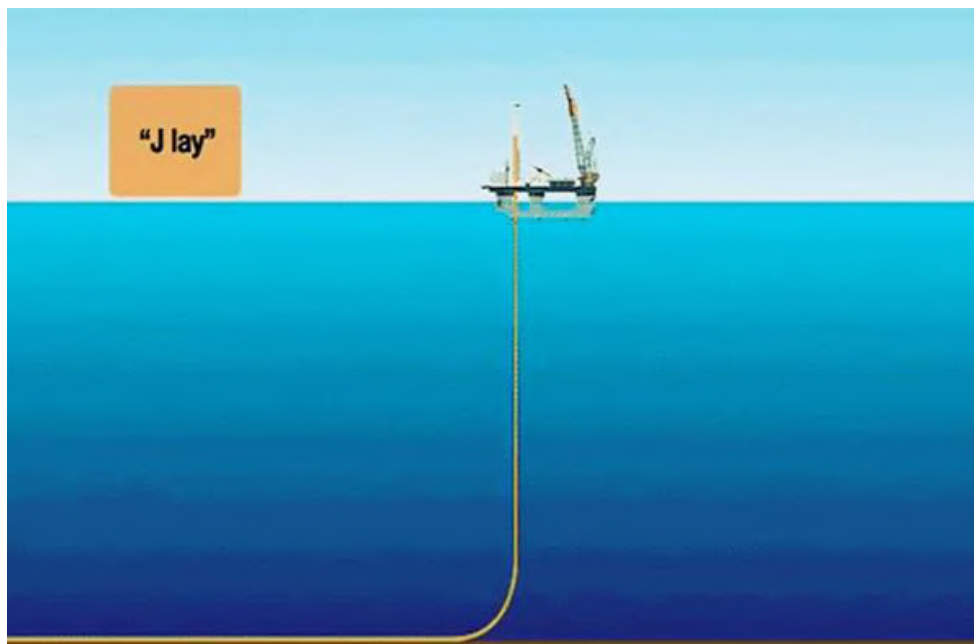


Figura 2.14: Curvatura em J da linha submarina no lançamento pelo método *J-Lay*

A utilização da torre de lançamento reduz a produtividade, porque não permite que as operações de construção da linha de dutos sejam desenvolvidas totalmente em série [19]. Com isso a utilização desse método não mostra-se tão vantajosa.



Figura 2.15: Saipem 7000 em operação desde 1998. Capacidade de instalar dutos de 4" a 32" de diâmetro [17].

O método *S-Lay* possui esse nome em virtude da linha submarina formar um S no momento do lançamento. Ao sair da rampa de lançamento (*stinger*) a linha se direciona para o fundo do mar devido a força peso. Com a aproximação do leito marinho, os dutos sofrem uma inversão de curvatura ocasionando uma configuração próxima a forma de um “S”. A pressão externa é mantida ao longo de todo o trajeto. Essa tensão externa permite a limitação da curvatura da trajetória de descida da linha submarina.

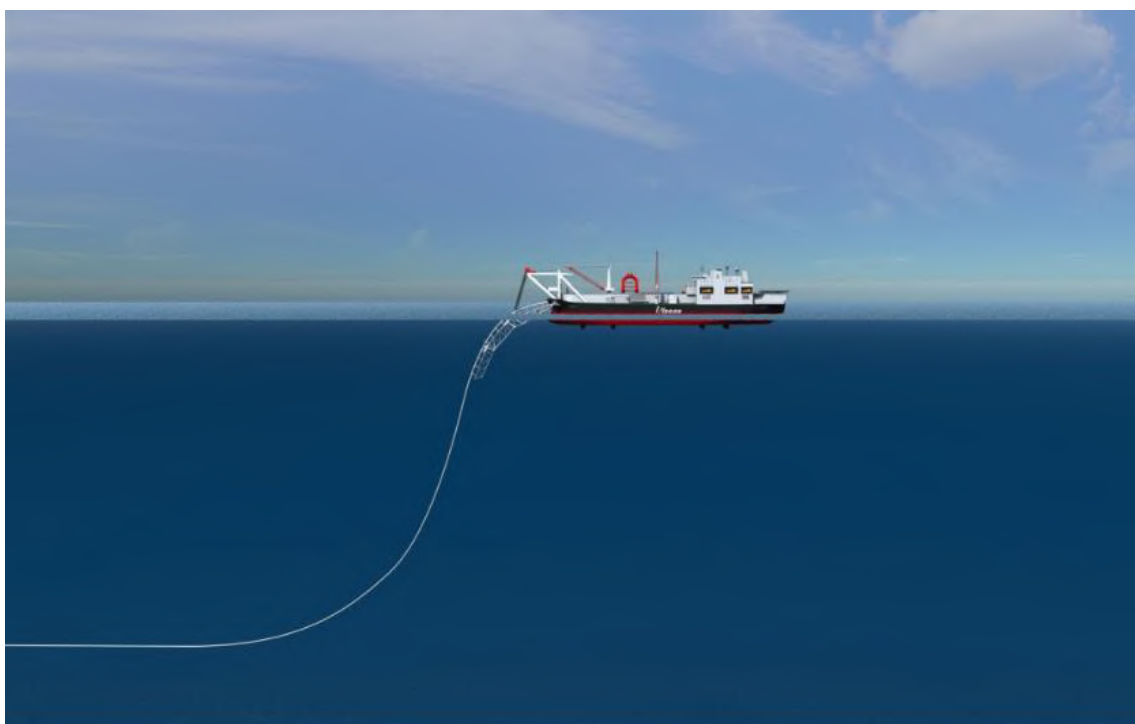


Figura 2.16: Curvatura em S da linha submarina no lançamento pelo método *S-Lay*.

A união dos dutos para a formação da linha de dutos também se aplica no método *S-Lay*, mas diferentemente do *J-Lay*, os dutos são soldados horizontalmente. A rampa de montagem possui roletes para facilitar o deslocamento dos dutos e garantir um alinhamento dos mesmos para agilizar as soldas. Como nesse método os equipamentos estão dispostos em linha, a construção em série é permitida, aumentando assim a produtividade do método [20].

Após a solda, realiza-se uma inspeção para garantir que nenhum dano cause comprometimento a operação da linha produzida. Em seguida, os dutos são conduzidos

por meio de esteiras em direção a rampa de lançamento (*stinger*), que fica inclinada para reduzir a curvatura em S, minimizando o risco de danos nos dutos.



Figura 2.17: Navio *Solitaire*, um dos maiores navios de lançamento de método *S-Lay* do mundo, com 300 m de comprimento, excluindo o *stinger* [18].

Existem duas regiões de flexão acentuada: uma na rampa conhecida por *overbend* e outra junto ao fundo na região de *touch down point* (TDP), onde a linha entra em contato com o leito marinho, denominada *sagbend*. Durante o lançamento são utilizados tracionadores para não ocorrer compressão da linha no TDP, pois a variação de tensão no TDP pode gerar fadiga no caso de *risers* rígidos [7].

Segundo Paz [7], os principais equipamentos utilizados no método *S-Lay* são:

- Equipamentos de transporte e manuseio de dutos;
- Estação de alinhamento e soldagem dos passes de raiz;
- Estações de soldagem dos passes de enchimento;
- Máquinas de tração;
- Estação de inspeção radiográfica;
- Estação de revestimento;
- Rampa de lançamento.

O método *S-Lay* apresenta uma limitação para lançamentos em águas ultra-profundas, pois os tracionadores e o *stinger* têm limites estruturais que não atendem a



Figura 2.19: Teste de dobramento do duto sanduíche realizado no LTS [7]

Nesse estudo foi realizado a comparação da pressão de colapso de dutos sanduíches com a mesma geometria em duas situações distintas: em dutos sanduíche que foram fletidos em um aparato de dobramento simulando experimentalmente a mesma curvatura ocasionada pelo carretel de lançamento de dutos submarinos e em dutos sanduíche intactos que não sofreram flexão e retificação.



Figura 2.20: Protótipo do duto sanduíche SP-2A colapsado [7]

Os valores obtidos por Paz [7] nos testes de dobramento e retificação e nos testes de colapso, concluíram que o duto sofreu um aumento da ovalização da ordem de 0.2%, implicando numa redução da pressão de colapso em 5.27 %, aproximadamente 2 MPa, para ambas as geometrias. Essa redução na resistência ao colapso ocasionada pelo lançamento do método carretel mostra-se pequena, pois a pressão de colapso obtida é equivalente a mais de 3500 m de lâmina d'água, superior às encontradas no pré-sal.

Paz [7] concluiu que o efeito da instalação pelo método carretel na pressão de colapso de dutos sanduíche com núcleo material cimentício reforçados com fibras de PVA (SHCC) não ocasiona grande perda de resistência a pressão. Conferindo aprovação ao uso do material anular cimentício na tecnologia do duto sanduíche.

2.1.5 Conectores de dutos sanduíche

Um trabalho de desenvolvimento de conectores de duto sanduíche foi realizado por Párraga Quispe [21], ele projetou uma conexão roscada para os dutos sanduíche com núcleo de compósito cimentício e analisou seu desempenho por meio do desenvolvimento de modelos numéricos que simularam a aplicação do torque de aperto, as cargas axiais e as cargas combinadas de flexão e pressão externa. A análise numérica foi realizada com uma geometria de dente de acordo com as recomendações da API RP 5C1.

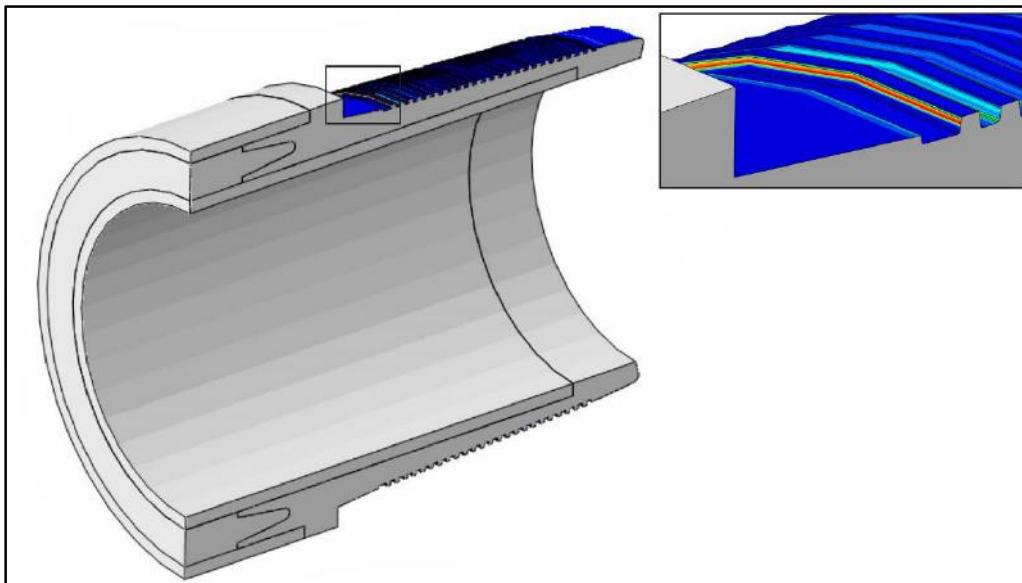


Figura 2.21: conector de duto sanduíche desenvolvido por Párraga Quispe [21].

Os resultados obtidos por Párraga Quispe [21] dos limites de trabalho do conector no regime elástico do material estão dentro das tolerâncias recomendadas de 0,15 e 0,20 mm durante o torque de aperto. As figuras abaixo mostram as concentrações de tensões no conector.

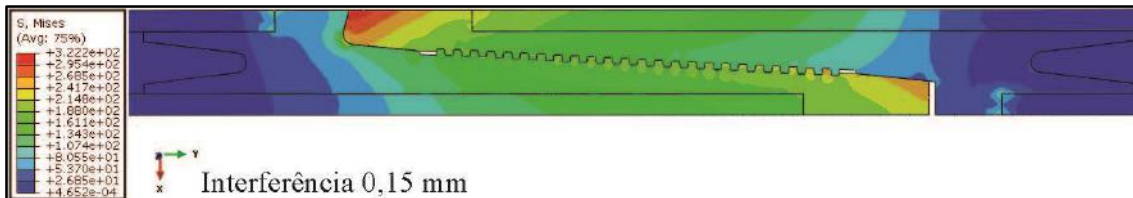


Figura 2.22: Concentração de tensão no conector para 0,15 mm durante o torque de aperto.

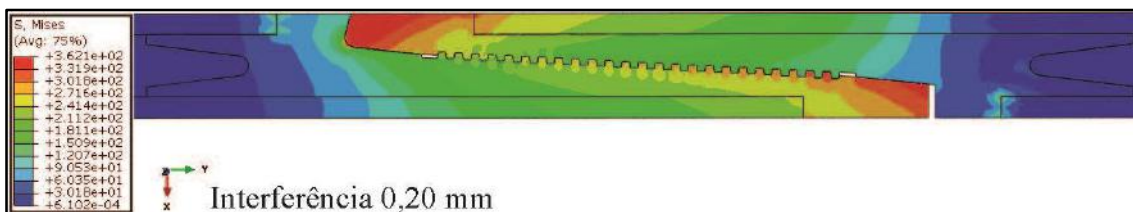


Figura 2.23: Concentração de tensão no conector para 0,20 mm durante o torque de aperto.

Párraga Quispe [21] verificou o comportamento do duto sanduíche junto ao conector a exposição de carga combinada de flexão e pressão externa e concluiu que não ocorre vazamento sobre essas condições. Também foi observado que a cunha é a zona mais crítica no conector quando é submetido a essas cargas.

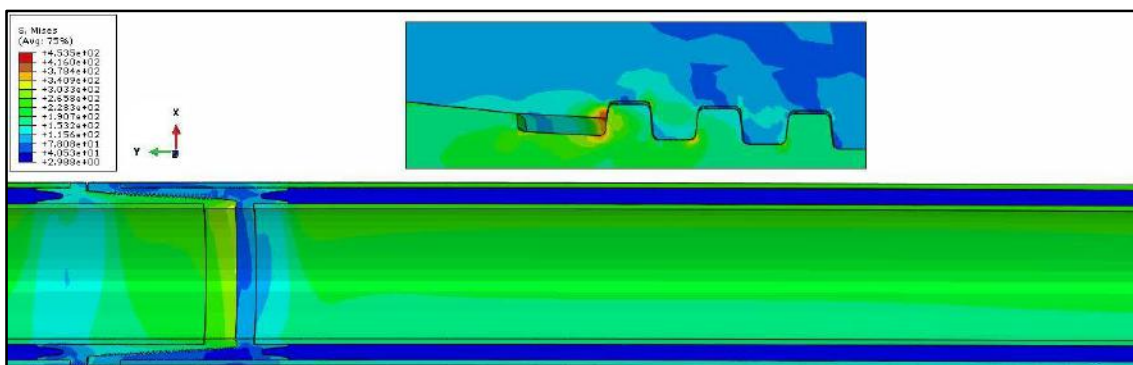


Figura 2.24: Concentração de tensão no conector a exposição de carga combinada de flexão e pressão externa.

2.2 ALGORÍTIMOS DE OTIMIZAÇÃO

Em problemas de diversas áreas como; engenharia, administração, logística, transporte, economia, biologia e demais ciências, quando se consegue construir modelos matemáticos bastante representativos dos respectivos sistemas em estudo, é possível aplicar as técnicas matemáticas de otimização para maximizar ou minimizar um determinado objetivo.

Otimizar é melhorar o que já existe, projetar o novo com mais eficiência e menor custo. A otimização visa determinar a melhor configuração de projeto sem a necessidade de testar todas as possibilidades envolvidas. Problemas de otimização são caracterizados por situações em que se deseja maximizar ou minimizar uma função numérica de várias variáveis, num contexto em que podem existir restrições. Tanto as funções e as restrições dependem dos valores assumidos pelas variáveis de projeto ao longo do procedimento de otimização. Pode-se aplicar otimização em várias áreas, como por exemplo, no projeto de sistemas ou componentes, planejamento e análise de operações, problemas de otimização de estruturas, otimização de forma, controle de sistemas dinâmicos. A otimização tem como vantagens diminuir o tempo dedicado ao projeto, possibilitar o tratamento simultâneo de uma grande quantidade de variáveis e restrições de difícil visualização gráfica e/ou tabular, possibilitar a obtenção de algo melhor, obter de soluções não tradicionais de menor custo. Como limitações.

Sem dúvida alguma a Programação Linear é uma das técnicas da pesquisa operacional das mais utilizadas em se tratando de problemas de otimização.

Os problemas de Programação Linear (PL) buscam a distribuição eficiente de recursos limitados para atender um determinado objetivo, em geral, maximizar lucros ou minimizar custos. Em se tratando de PL, esse objetivo é expresso através de uma função linear, denominada de "Função Objetivo".

É necessário também que se definam quais as atividades que consomem recursos e em que proporções os mesmos são consumidos. Essas informações são apresentadas em forma de equações as inequações lineares, uma para cada recurso. Ao conjunto dessas equações e/ou inequações, denomina-se "Restrições do Modelo".

Normalmente se tem inúmeras maneiras de distribuir os recursos escassos entre as diversas atividades em estudo, bastando que essas distribuições estejam coerentes com

as restrições do modelo. No entanto, o que se busca num problema PL é a função objetivo, isto é, a maximização do lucro ou a minimização dos custos. A essa solução dá-se o nome de solução ótima.

Assim, a Programação linear se incube de achar a solução ótima de um problema, uma vez definida o modelo linear, ou seja, a função objetivo e as restrições lineares.

Em grande parte das aplicações, modelos lineares refletem apenas aproximações dos modelos reais. Fenômenos físicos ou econômicos são geralmente melhor representados por modelos não-lineares.

2.1.1. Programação Não-Linear

A evolução tecnológica no final da década de noventa, ao nível da capacidade de cálculo dos computadores e do desempenho das aplicações computacionais para otimização, motivou a utilização de métodos baseados em programação não linear para a resolução de problemas de otimização. As metodologias de otimização não linear permitem uma representação mais aproximada da realidade, comparativamente à programação linear em rede, apresentando hoje em dia tempos de computação aceitável.

A maioria das não-linearidades englobadas em um modelo de programação está dentro de duas principais categorias:

- Relações observadas empiricamente, tais como variações não-proporcionais em custos, resultados de processos e características de qualidade;
- Relações deduzidas estruturalmente, que englobam fenômenos físicos, deduzidos matematicamente e regras administrativas.

Em geral, os modelos empregados em Programação Não-Linear são do tipo:

Max (ou Min) $f(x)$

Sujeito a:

$$\begin{cases} g_i(x) \leq b_i \\ x \geq 0 \end{cases} \text{ para } i=1,2,\dots,n$$

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (3.1)$$

Os métodos para resolução de problemas de PNL podem ser divididos em dois grupos:

- Modelos sem restrições;
- Modelos com restrições.

O principal conceito envolvido em PNL é o de taxa de variação que são derivadas e gradientes.

Segundo Brooke et al [22], é mais difícil achar soluções para problemas não-lineares do que para os lineares, e os usuários com problemas não-lineares difíceis notarão que devêm de prestar muito mais atenção a detalhes aparentemente inconsequentes do que gostariam. Pode ser difícil achar uma solução para um problema e quando encontrada, esta pode não ser única (um mínimo local); além disso, outra solução melhor pode existir (mínimo global).

Alguns algoritmos foram desenvolvidos para solucionar os problemas de PNL. No entanto, não existe um que seja considerado ideal para todos os casos. Os algoritmos utilizam diferentes métodos matemáticos, como: matrizes, derivadas, multiplicadores de Lagrange. O Solver do Excel usa o algoritmo chamado *Generalized Reduced Gradient* (GRG).

Sua estratégia de resolução de acordo com Corrar [23] consiste em:

- i. Tentar achar uma solução possível inicial para o problema;
- ii. Tentar melhorar o resultado inicial, explorando a direção que produz sua melhoria mais significativa;
- iii. Quando terminar a exploração dessa direção (ao alcançar o limites a área de soluções possíveis ou obter melhorias insignificantes no resultado), tentar aprimorar a solução explorando outras direções; e
- iv. Continuar esse processo até que o resultado obtido não possa ser significativamente melhorado.

No entanto, o algoritmo GRG possui limitações. A principal delas ocorre quando a área de soluções possíveis apresenta vários pontos de máximo local ou de mínimo local.

O grande problema que dificulta a obtenção da solução ótima nos problemas de PNL são os mínimos e máximos (extremos) locais da função-objetivo, como pode-se ver na Figura 2.25 abaixo:

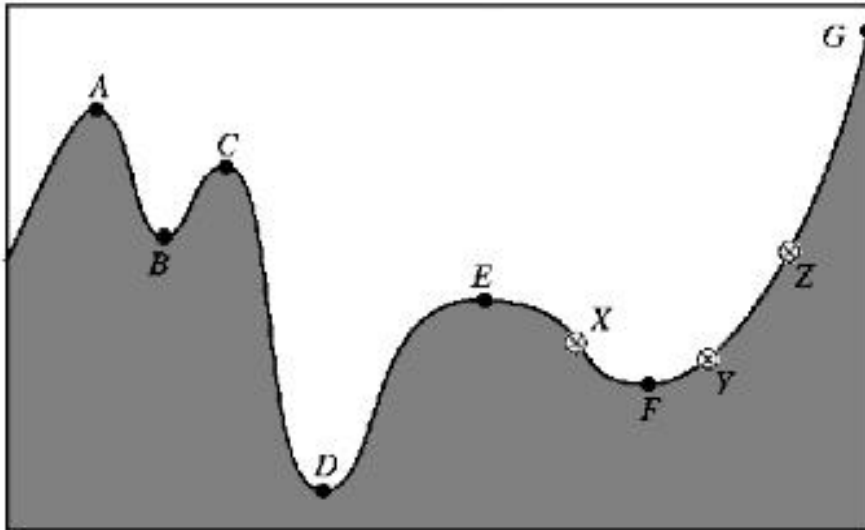


Figura 2.25: Pontos de uma função não-linear

Os máximos e mínimos locais são comuns em problemas de PNL. Os pontos A e C são denominados máximos locais porque a função apresenta-se maior nesses pontos que nos pontos mais próximos. Porém, como pode-se observar, somente o ponto G maximiza a função sendo chamado de máximo global. Dependendo do ponto de partida e/ou método utilizado, um programa pode ficar “travado” no ponto A, entendendo que este é o ponto máximo, ocasionando uma solução incorreta. O mesmo ocorre nos pontos B e F, que são considerados mínimos locais. Todavia, a solução ótima está no ponto D, que é o mínimo global.

Outro aspecto importante da programação não linear, é a análise da função para a determinação se ela é convexa ou côncava. Segundo Winston [24], para a determinação se o problema de PNL possui solução ótima ou não, é necessário definir a função de concavidade e convexidade. Uma função de uma variável é convexa na região, se a inclinação na região é crescente, e também se a linha que conecta os dois pontos na função nunca estende-se abaixo da função.

Uma função de uma variável é côncava na região, se sua inclinação é sempre decrescente. Da mesma forma que na função convexa, a função de uma variável é côncava, se a linha que liga os dois pontos da função nunca se estende acima da função.

2.1.2. Programação Linear Inteira Mista

Os modelos que trabalham com variáveis inteiras e contínuas são chamados de Programação Linear Inteira Mista (PLIM). Essa metodologia é muito utilizada, pois permitem definir o ótimo de diferentes opções e definir qual deles mostra-se melhor. As variáveis contínuas normalmente correspondem às variáveis de processo (temperatura, peso, medida, distância, etc.), enquanto às inteiras correspondem ao tipo de processo, material, local e etc. Segundo Hafner [25] os modelos baseados na PLIM têm solução mais complexa em relação àqueles que utilizam a programação linear.

Enquanto na programação linear existem condições necessárias e suficientes de otimização teoricamente provadas que podem ser utilizadas para testar eficientemente se uma dada solução viável é uma solução ótima ou não, na PI e na PLIM não existem. Isto, porque as condições de otimização conhecidas para testar se uma determinada solução é ótima só podem ser realizadas através da comparação explícita ou implícita desta solução com cada uma das soluções viáveis do problema. Por esse motivo, a PLIM e a PLIM são resolvidas por intermédio de métodos de enumeração que buscam solução ótima no conjunto de soluções viáveis.

2.1.3. Programação Não-Linear Inteira Mista

Em muitos problemas as aproximações feitas por modelos de PLIM ou PNL não apresentam soluções razoáveis, porque se uma aproximação de PLIM for feita, há o risco de que o ponto (“inteiro viável”) obtido leve a uma solução inviável nas variáveis contínuas. Outro fato, é que a relaxação da integralidade usualmente produz soluções fracionárias. Ou seja, realizar o arredondamento num problema de PLIM, pode não ser uma boa estratégia heurística. Com isso, o desenvolvimento de técnicas de resolução de problemas de Programação Não-Linear Inteira Mista (PNLIM) adquire grande relevância.

Formalmente um problema de PNLIM pode ser definido como:

$$\begin{aligned}
& \min f(x, y) \\
& s. a \ g_j(x, y) \\
& x \in n, x \in p
\end{aligned} \tag{3.2}$$

Onde $f(\cdot)$ e $g(\cdot)$ são funções não lineares, comumente assumidas diferenciáveis, J é conjunto de índices das restrições, e x e y são os vetores de variáveis contínuas e discretas, definidos nos subconjuntos X e Y , respectivamente.

Muitos são os casos especiais que podem surgir com essas funções num modelo de PNLIM, possibilitando a aplicação de técnicas de solução especializadas. É admissível que se tenha uma função objetivo linear, ou que um subconjunto das restrições seja linear.

Outra possibilidade, é que todas as funções não lineares sejam convexas o que possibilita a utilização de diferentes técnicas de solução como: Branch-and-Bound (BB) demonstrado por Gupta e Ravindran [26]; Decomposição Generalizada de Benders (GBD) por Geoffrion [27]; e Feasibilit Pump (FP) por Bonami e al. [28].

A dificuldade de se resolver problemas de PNLIM é grande, pois os problemas de PLIM e PNL já podem ser vistos como casos especiais. Por conseguinte, a resolução de problemas de PNLIM tem os obstáculos que estão presentes em ambas as classes. Mesmo problemas de pequena dimensão, com poucas dezenas de variáveis podem ser difíceis ou até intratáveis. Neste ponto, vale destacar um importante resultado de Jeroslow [29] que demonstrou não haver algoritmo capaz de resolver problemas inteiros com restrições quadráticas.

2.1.4. Otimização robusta

Para Bertsimas e Sim [30], não considerar alterações nos coeficientes das variáveis e da função objetivo mostra-se como um paradigma clássico da programação matemática. Contudo, essa consideração não condiz com a realidade em grande parte dos modelos matemáticos, pois os coeficientes estão sujeitos a variações, principalmente quando são relacionados a preços e custos.

Essas variações nos parâmetros podem ocasionar uma distorção de uma determinada solução ótima, ou seja, a programação pode resultar numa resposta que não seja a mais adequada para um problema.

Alguns trabalhos foram propostos para criação de modelos imunes as variações dos coeficientes, sendo chamados de otimizações robustas. Soyster [31] propôs um modelo de Programação Linear robusto. Nessa metodologia busca-se as soluções que não têm grandes interferências das variações dos dados. No entanto o valor da função objetivo mostra-se distante dos modelos não demonstram essa preocupação da incerteza dos coeficientes.

2.2.5 Generalized Reduced Gradient (GRG)

A evolução tecnológica das aplicações computacionais para otimização, motivou a utilização de métodos baseados em programação não linear para a resolução de problemas de otimização. As metodologias de otimização não linear permitem uma representação mais aproximada da realidade.

Segundo Sacoman, a maioria das não-linearidades englobadas em um modelo de programação está dentro de duas principais categorias:

- Relações observadas empiricamente, tais como variações não-proporcionais em custos, resultados de processos e características de qualidade;
- Relações deduzidas estruturalmente, que englobam fenômenos físicos, deduzidos matematicamente e regras administrativas.

O método do Gradiente Reduzido Generalizado (GRG) foi apresentado para solucionar problemas de programação matemática com função objetivo e restrições não lineares. O GRG oferece soluções boas para problemas complexos com baixo custo computacional.

A maior limitação da utilização do GRG provém do fato de que é necessário que a estimativa inicial dos parâmetros seja próxima ao valor do ponto ótimo para que se tenha uma garantia de convergência para o ponto ótimo. Como pode ser visto na figura 2.26.

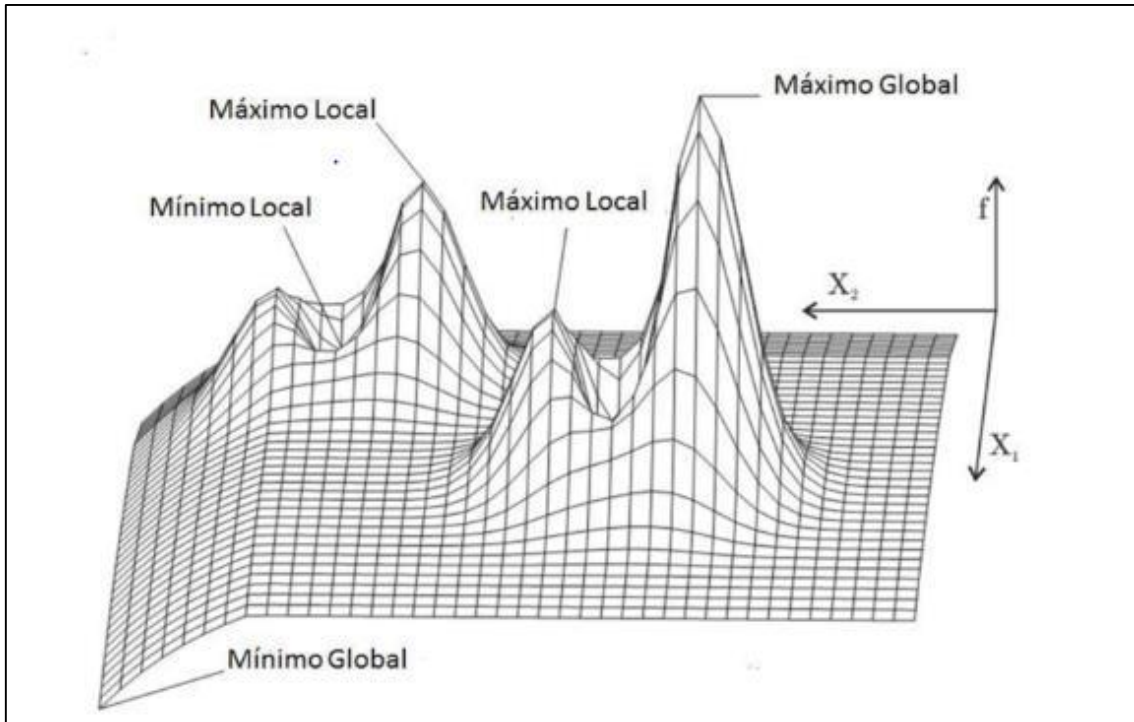


Figura 2.26: Mínimos e Máximos Locais [32]

3 EQUAÇÃO ANALÍTICA DE PRESSÃO DE COLAPSO

“Aquilo que não se pode medir, não se pode melhorar” — William Thomson (Lord Kelvin)

A simulação numérica de elementos finitos mostra-se como a melhor maneira de calcular a pressão de colapso do duto sanduíche. Este método apresenta bons resultados, principalmente quando associados a testes experimentais. A grande maioria dos pesquisadores do duto sanduíche utiliza essa metodologia para definir a resistência do duto à pressão externa, porém ela requer *softwares* pesados e especializados, grande esforço de modelagem e muito tempo computacional.

No entanto, a simulação numérica por elementos finitos não pode ser utilizada diretamente em modelos matemáticos de otimização, pois tais modelos requerem equações analíticas, que apresentam um processo menos trabalhoso e permitem calcular os resultados com maior simplicidade.

3.1 EQUAÇÕES EXISTENTES

Determinadas equações analíticas foram desenvolvidas para o cálculo da pressão de colapso em dutos sanduíche, com o intuito de facilitar e agilizar a análise estrutural desse tipo de duto.

3.1.1 Equação de colapso de Timoshenko para o caso duto sanduíche

A equação (3.1) desenvolvida por Timoshenko [13] para pressão de colapso de tubos de uma única camada utiliza a rigidez à flexão (EI), o raio médio do tubo (R) e coeficiente de Poisson equivalente (ν) para calcular a pressão crítica de colapso em regime elástico do material (P_e).

$$P_e = \frac{3EI}{(1-\nu^2)R^3} \quad (3.1)$$

Segundo Castello [14], após o limite elástico, a pressão crítica deve ser menor que a obtida pela equação (3.1). A partir desta equação, Castello, acrescentou as imperfeições geométricas na forma de ovalização, o momento fletor por multiplicação da carga de compressão circunferencial pela distância entre a geometria oval e a perfeitamente circular. A consideração de que a pressão se apresenta crítica no momento que o material inicia o escoamento em função da soma do momento e do esforço compressivo, resulta a Equação (3.2), onde a pressão de resistência limite está representado por P_{co} .

$$P_{co}^2 - P_{co} \left[P_0 + P_e \left(1 + 6 \frac{R}{t} \delta_0 \right) \right] + P_0 P_e = 0 \quad (3.2)$$

Reconhecendo a importância da aderência entre as camadas, Castello, propôs que o deslizamento livre entre camadas equivale a calcular a inércia de cada parte do tubo como independente umas das outras. Com isso, a linha neutra (L.N.) de cada camada fica localizada no meio de sua respectiva espessura, como demonstrado na Figura 3.1.

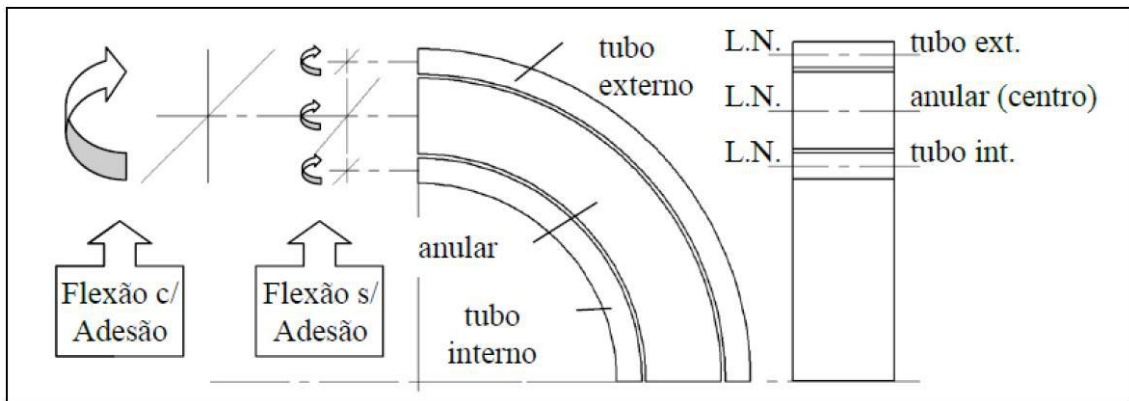


Figura 3.1: Corte de seção de duto sanduíche, linha neutra das seções e momentos fletores para os casos com e sem adesão [14]

Castello [14] reescreveu a pressão de colapso elástica a partir da equação de colapso de Timoshenko para o duto sanduíche, utilizando uma resistência à flexão equivalente (EI_{eq}) e um raio médio (R_m) a partir da seguinte equação:

$$EI_{eq} = E_i I_i + E_a I_a + E_e I_e \quad (3.3)$$

Onde, os subscritos "e", "a" e "i" indicam duto externo, anular e duto interno, respectivamente.

Portanto, a pressão de colapso elástica (P_e) para o caso do duto sanduíche pode ser obtida pela equação:

$$P_e = \frac{3E I_{eq}}{(1-\nu^2)R_m^3} \quad (3.4)$$

O coeficiente de Poisson equivalente (ν) pode ser obtido pela média dos coeficientes do aço e do anular:

$$\nu_{eq} = \frac{\nu_{aço} + \nu_{anular}}{2} \quad (3.5)$$

Ainda segundo Castello [14], o raio médio (R_m) é obtido pelo coeficiente de Poisson através do valor médio dos coeficientes dos materiais, o que resultará na solução da equação de colapso de Timoshenko (2.4) para o caso do duto sanduíche,

$$P_{co} = \frac{P_0 t + P_e t - \sqrt{36 R_m^2 P_e^2 \delta_0^2 + 12 R_m P_0 P_e \delta_0 t + 12 R_m P_e^2 \delta_0 t + P_0^2 t^2 - 2 P_0 P_e t^2 + P_e^2 t^2 + 6 R_m P_e \delta_0}}{2t}, \quad (3.6)$$

onde a pressão de colapso plástico é dada pela equação:

$$P_0 = \frac{\sigma_0 i t_i}{R_{mi}} + \frac{\sigma_0 a t_a}{R_{ma}} + \frac{\sigma_0 e t_e}{R_{me}}, \quad (3.7)$$

onde σ_0 é a tensão de escoamento, t é a espessura, R_m é o raio médio e os subscritos "e", "a" e "i" indicam duto externo, anular e duto interno, respectivamente.

Uma correlação numérico-analítica foi realizada por Castello [14]. A Tabela 3.1 mostra os resultados da pressão de colapso (P_{co}) empregando os modelos de elementos finitos do tipo anel e a solução analítica descrita acima. A aderência foi considerada como perfeita ou inexistente. A ovalização inicial do estudo é de 0,2%.

Tabela 3.1: Resultados comparativos da pressão de colapso analítica e numérica

Caso	Aderência	Pco ¹ (Mpa)		Pco ² (Mpa)		Pco ³ (Mpa)		Erro (%)	
		Bi-linear	Não-linear	Timoshenko	Timoshenko	Pco ³ /Pco ¹	Pco ³ /Pco ²	Pco ³ /Pco ¹	Pco ³ /Pco ²
1	Sem	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	6,9	0,0	0,0
1	Perfeita	25,4	26,1	28,7	28,7	28,7	28,7	11,5	9,9
2	Sem	21,7	20,7	19,4	19,4	19,4	19,4	11,9	6,7
2	Perfeita	43,3	45,0	44,5	44,5	44,5	44,5	2,7	1,1
3	Sem	36,5	37,0	37,6	37,6	37,6	37,6	2,9	1,6
3	Perfeita	57,7	63,5	58,3	58,3	58,3	58,3	1,0	8,9
PTP	Sem	35,7	33,3	36,2	36,2	36,2	36,2	1,4	8,0
PTP	Perfeita	55,3	55,9	57,2	57,2	57,2	57,2	3,1	2,3
		Média						4,3	4,8

Os resultados obtidos por Castello [14] mostram uma boa aproximação da pressão de colapso calculada analiticamente em relação aos resultados numéricos, pois a equação adota somente a tensão de escoamento para o cálculo da pressão plástica, assim como a solução numérica. Ambos os casos com aderência perfeita e sem aderência apresentam erros relativos de até 12%, aproximadamente, para as geometrias e materiais analisados.

3.1.2 Equação de colapso do duto sanduíche obtida pelo Eureka

A equação proposta por Da Silva [15] para o cálculo da pressão de colapso desenvolvida pelo *software* Eureka utiliza 144 resultados de simulação numérica realizados no ABAQUS.

Segundo Da Silva [15], Eureka é um software de modelagem matemática que automatiza o processamento e análise de dados. Fazendo uso de algoritmos evolutivos, o software é capaz de criar modelos preditivos em minutos. Ao decorrer do processamento, o Eureka constrói séries numéricas temporais, gerando e atualizando modelos automaticamente, tornando fácil a criação de algoritmo.

O *software* realiza bilhões de interações buscando equações que resultam nos valores desejados que são previamente informados. Para isso, necessita informar os parâmetros que são considerados relevantes para obtenção desses valores. Esse algoritmo não utiliza premissas que orientem as interações.

O Eureka realiza uma varredura das equações e as classifica pelo grau de complexidade e o valor do erro, demonstrando uma relação constante entre a simplicidade e a complexidade das equações encontradas. Além dessa relação entre simplicidade e a complexidade, o *software* também realiza uma classificação em função do erro demonstrado pela equação. Os parâmetros utilizados por Da Silva [15] para a formulação da equação de pressão de colapso do duto sanduíche estão apresentadas na tabela abaixo:

Tabela 3.2: Parâmetros utilizados no *software* Eureka [15].

Parâmetros	Utilizados para formulação
Geométrico	Razão do diâmetro externo pela espessura do duto externo
	Razão do diâmetro externo pela espessura total do duto sanduíche
Material	Tensão de escoamento e ruptura do duto externo
	Tensão de escoamento e ruptura do duto interno
Ovalização	Nível de ovalização da seção do duto
Atrito	Nível de atrito entre as camadas

Os dados da Tabela 3.2, junto aos valores das pressões de colapso foram utilizados como parâmetros de entrada no *software*. O programa procurou a melhor equação de ajuste dos valores da pressão de colapso a partir dos dados de entrada obtidos por simulação numérica. A formulação matemática obtida por Da Silva [15] a partir dos parâmetros apresentados em (3.8) está demonstrada na equação (3.9):

$$P_{colapso} = f\left(\frac{D_{op}}{t_{op}}, \frac{D_{op}}{t_{TOTAL}}, \sigma_{esc}OP, \Delta, FA\right) \quad (3.8)$$

$$P_{colapso} = \frac{30,5+44,2FA+0,0418 \cdot \sigma_{esc}OP}{\Delta \cdot \left(\frac{D_{op}}{t_{TOTAL}}\right)^2} - 00,486 \cdot \frac{D_{op}}{t_{op}} \cdot \frac{D_{op}}{t_{TOTAL}} \quad (3.9)$$

onde FA é o fator de atrito entre as camadas; σ_{esc} a tensão de escoamento do material do duto externo; Δ o nível de ovalização entre as seções ($\Delta \leq 0.03$); $\frac{D_{OP}}{t_{OP}}$ é a razão entre o diâmetro do duto externo pela espessura do duto externo; $\frac{D_{OP}}{t_{Total}}$ é a razão entre o diâmetro do duto externo pela espessura total do duto sanduíche.

Segundo Da Silva [15], o Eureka não utilizou a tensão de ruptura do duto externo, a tensão de escoamento do duto interno e a tensão de ruptura do duto interno como parâmetros de entrada para o programa para a obtenção da equação da pressão de colapso para dutos sanduiche. Logo, estes parâmetros não estão presentes na equação (3.9). Ou seja, o *software* interpretou que tais parâmetros influenciam de forma menos significativa que os demais parâmetros no cálculo da pressão de colapso de dutos do tipo sanduiche.

O Eureka nos permite visualizar comparação dos resultados analíticos com os valores de entrada, que foram calculados por simulação numérica. Na Figura 3.2, pode ser visto a representação da função da equação obtida, apresentada em vermelho, e os valores da pressão de colapso obtido pelos modelos numéricos, pontos azuis.



Figura 3.2: Função analítica do Eureka e valores numéricos utilizados [15].

Alguns pontos dos valores numéricos, em azul, encontram-se fora da curva vermelha, demonstrando o erro da equação. A existência de um erro na equação já é algo esperado, todavia, deve-se mensurar o tamanho do desvio com objetivo de garantir a coerência na relação matemática.

Os desvios entre os valores calculados numericamente e os obtidos pela equação matemática pode ser visto na Figura 3.3 . Quanto mais longe os pontos se apresentam da linha do gráfico, maior a diferença entre o valor numérico e o analítico. Logo, quanto mais próximo os pontos vermelhos estiverem da linha do gráfico, melhor a equação proposta representa o comportamento da pressão de colapso.

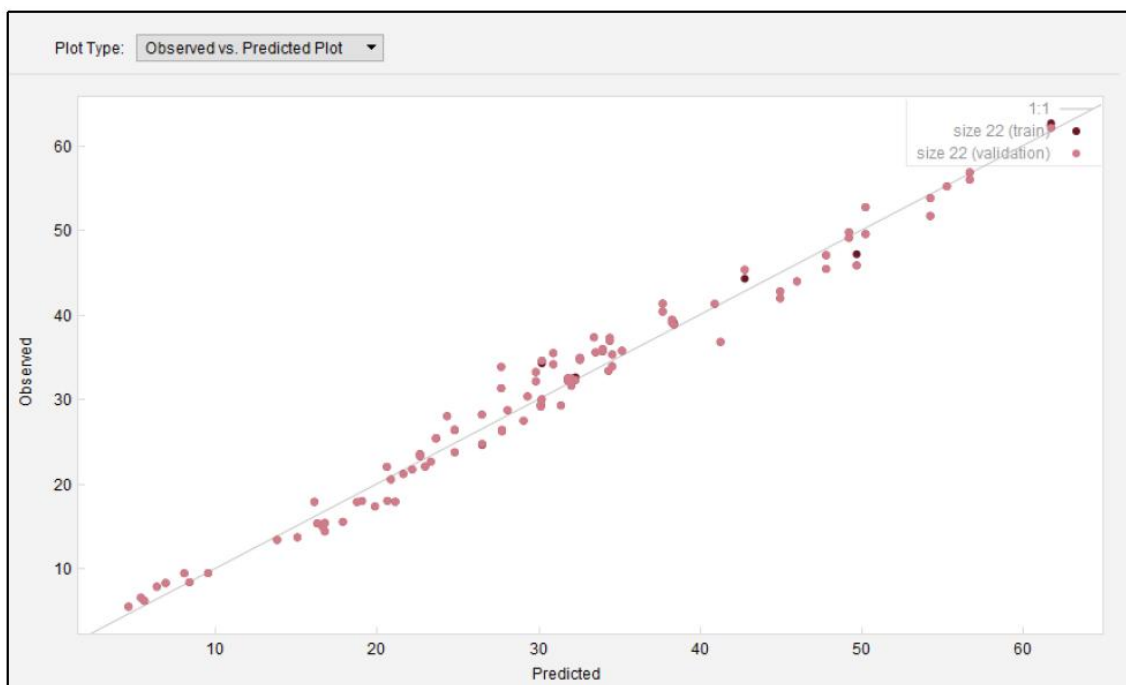


Figura 3.3: Resultados numéricos x analíticos do Eureka [15].

Da Silva [14] comparou o resultado da formulação que desenvolveu no Eureka com a formulação proposta por Castello [14]. As diferenças dos resultados podem ser observadas no gráfico da Figura 3.4.

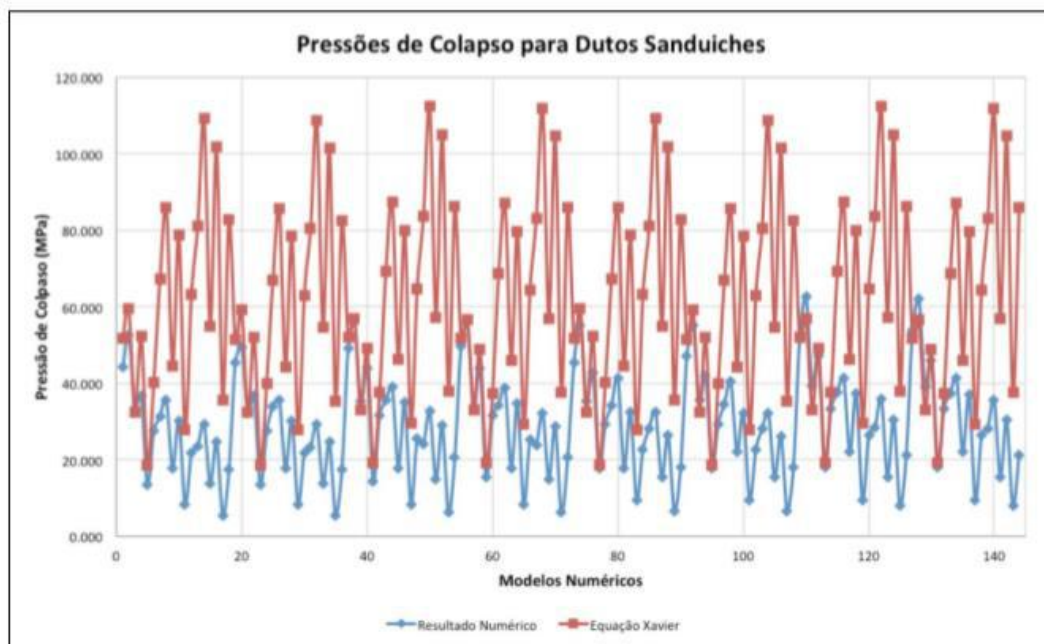


Figura 3.4: Gráfico dos valores da pressão de colapso de Da Silva [15] e Castello [14]

3.1.3 Equação de colapso em função dos raios, espessuras e ovalização

Segundo Chen [8], os efeitos da espessura de cada camada, ovalização e raio do tubo externo são variados. Numa primeira análise, a espessura foi mantida constante e buscou-se a relação entre a pressão de colapso (P_{co}) e ovalização do duto sanduiche (DS) com diferentes diâmetros. A partir dessa análise foi verificado que a pressão do colapso do DS com o núcleo do SHCC diminuiu com o aumento da ovalização. Numa segunda avaliação, a ovalização foi mantida constante e buscou-se a relação entre a P_{co} e a espessura para DS com diferentes diâmetros. Com isso, percebeu-se que a pressão de colapso do DS com núcleo de SHCC aumenta com o aumento de espessuras. Finalmente, manteve-se a espessura livre e ovalização constante, analisando-se a relação entre P_{co} e razão de raios. Concluindo-se, portanto, que a pressão de colapso do DS aumenta com o aumento da relação dos raios externos.

Para a formulação da equação, Chen [8] utilizou resultados de simulações numéricas de elementos finitos variando-se os raios, as espessuras e as ovalizações dos dutos internos e externos, as espessuras dos dutos internos e externos. Chen considerou essas três relações da seguinte forma: raio externo pelo raio interno, espessura interna

pelo raio interno e a ovalização do duto interno igual ao do duto externo. Ou seja, o duto sanduíche foi considerado com uma única ovalização.

Os limites utilizados para esses fatores estão na tabela abaixo.

Tabela 3.3: Intervalos utilizados por Chen [8]

	Mínimo	Máximo
r_1/r_2	1,3	1,7
t_1/r_1	0,02	0,08
Ovalização	0,2%	1,0%

Baseado na análise da ovalização, espessura e razão dos raios foi proposta a seguinte equação para a pressão de colapso:

$$P_{co} = a + (r_2/r_1)^b (t/r_1)^c \Delta^b \quad (3.10)$$

Através dos dados obtidos por análise numérica utilizou-se o *software* matemática 7.0 para obter a seguinte equação:

$$P_{co} = 18,1359 + (r_2/r_1)^{3,62496} (t/r_1)^{1,11268} \Delta^{-0,695743} \quad (3.11)$$

3.1.4 Comparação das equações analíticas disponíveis com os testes experimentais.

Com o objetivo de verificar a possibilidade de utilizar uma das equações propostas na bibliografia, foi realizado um comparativo dos testes experimentais com os resultados das 3 equações existentes apresentadas anteriormente.

Para isso, os cálculos da pressão de colapso de cada uma das equações utilizaram os parâmetros dos modelos testados no Laboratório de Tecnologia Submarina e comparados com as pressões de colapso obtidos nos testes, como pode ser observado na tabela 3.4.

Tabela 3.4: Pressões de colapso das equações existentes x testes experimentais

Identificação do Modelo	Pco Timoshenko	Pco Eureka	Pco raios, espessuras e ovalização	Pressão de Colapso (Mpa)
DS-01-C	20,15	-0,44	19,45	71,36
DS-03-C	18,49	0,31	18,83	50,43
DS-07-C	24,07	-0,10	23,99	78,82
DS-09-C	22,99	-3,07	18,99	57,67
SP1-I	30,27	-9,06	20,31	27,9
SP1-II	31,14	-8,99	20,35	27,2
SP2-I	31,83	-8,70	20,52	21
SP2-II	32,63	-8,61	20,57	26,4
SP5-I	33,89	-9,06	20,31	35,7
SP5-II	34,44	-8,70	20,52	29,7
PIP.M2.G1.I02	27,44	-6,87	19,20	43,35
PIP.M2.G1.I03	27,33	-6,33	19,10	37,64
PIP.M2.G2.I01	40,64	-15,79	18,54	31,14
PIP.M2.G2.I02	41,20	-15,06	18,61	20,31
PIP.M1.G1.I01	31,66	-9,28	18,67	17,13
PIP.M1.G1.I02	28,85	-6,56	19,01	34,09
PIP.M1.G2.I01	45,39	-16,87	18,40	10,98
PIP.M1.G2.I02	36,63	-16,47	18,50	12,11
SP1	56,63	-34,90	18,24	30,5
SP2	42,83	-35,14	18,23	30,6
SP3	63,50	-34,81	18,25	29,7
SP-2A	50,51	-35,85	18,24	36,59
SP-2B	62,29	-29,33	18,29	37,41

As pressões de colapso obtidas pelas equações disponíveis na literatura não demonstraram resultados coerentes com os testes experimentais, isto deve-se ao fato que essas equações foram desenvolvidas para cálculos dentro de determinados limites.

Logo, nenhuma delas mostra-se com a abrangência necessária para serem utilizadas no modelo de otimização.

3.2 EQUAÇÃO DE COLAPSO OBTIDA POR ANÁLISE ADIMENSIONAL

Com o objetivo de trabalhar-se com uma equação que abrangesse grande parte das pesquisas realizadas e que fosse mais próxima da realidade de um modelo matemático foi desenvolvida uma metodologia para definir uma equação analítica a partir de testes experimentais, em função de parâmetros geométricos do duto e dos materiais utilizados. Para desenvolver essa metodologia foi empregado o método dos mínimos quadrados, a partir do qual é possível estabelecer relações adimensionais entre variáveis do problema. Os testes experimentais realizados no Laboratório de Tecnologia Submarina (LTS) para determinar a pressão de colapso dos dutos sanduíche serviram como base de dados para o desenvolvimento dessas equações.

3.2.1 Testes experimentais do duto sanduíche

Todos os testes experimentais utilizados neste trabalho foram realizados nas instalações do Laboratório de Tecnologia Submarina (LTS). Esses testes fizeram parte de pesquisas de professores e alunos do programa de Engenharia Oceânica da COPPE/UFRJ. Os trabalhos que geraram a base de dados para o desenvolvimento das equações analítica foram obtidos dos seguintes autores: Castilho [34], Castello [14], Pasqualino et al [9], Chen [8], Paz [7].

Castilho [34] analisou a pressão de colapso de dutos sanduíche danificados com material polimérico na seção anular. A fabricação dos modelos experimentais foi realizada com varas de tubos de PVDF com aproximadamente 2 metros de comprimento cada. Inicialmente, as varas possuíam um diâmetro externo nominal de 3,5” e as espessuras variavam entre 9 mm e 3,2 mm. Os tubos fornecidos foram fabricados em dois tipos de PVDF, sendo quatro deles em Solef®6010 (homopolímero) e os outros seis em Solef®60512 (copolímero).

Para a produção dos modelos de duto sanduíche adquiriu-se dez varas de tubos de aço sem costura, fabricados de acordo com a norma NBR5590 (ASTM A-53). Cinco varas foram utilizadas na fabricação dos tubos internos (TI) e as demais na montagem dos tubos externos (TE). De cada uma das varas foi retirado um segmento com 300 mm de comprimento para a fabricação de corpos de prova (CPs).



Figura 3.5: Usinagem do anular de PVDF dos modelos de Castillo [34]

Castello [14] avaliou a influência da aderência entre camadas na resistência ao colapso de dutos sanduíche com polipropileno na camada anular. Para o estudo experimental, construiu seis protótipos de dutos sanduíche de seis metros cada através de projeto de cooperação entre a COPPE/UFRJ e a fábrica de tubos TenarisConfab S.A. Os modelos de teste, devidamente cortados e preparados foram utilizados para seis testes de pressão de colapso e três de propagação.

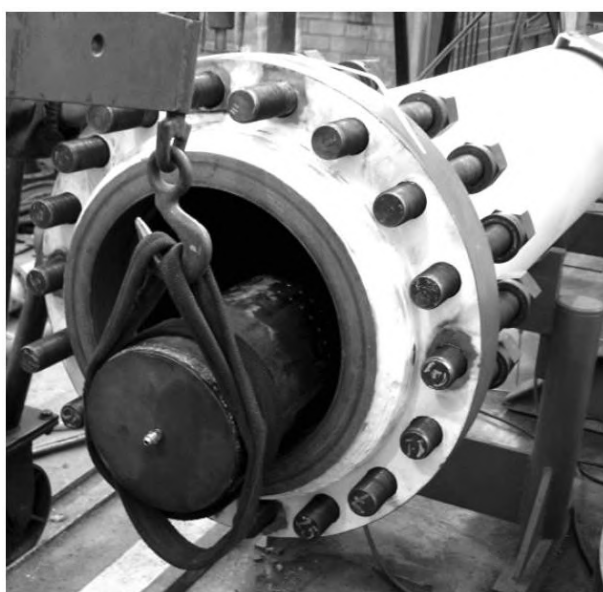


Figura 3.6: Corpo de prova sendo posicionado na câmara hiperbárica [14]

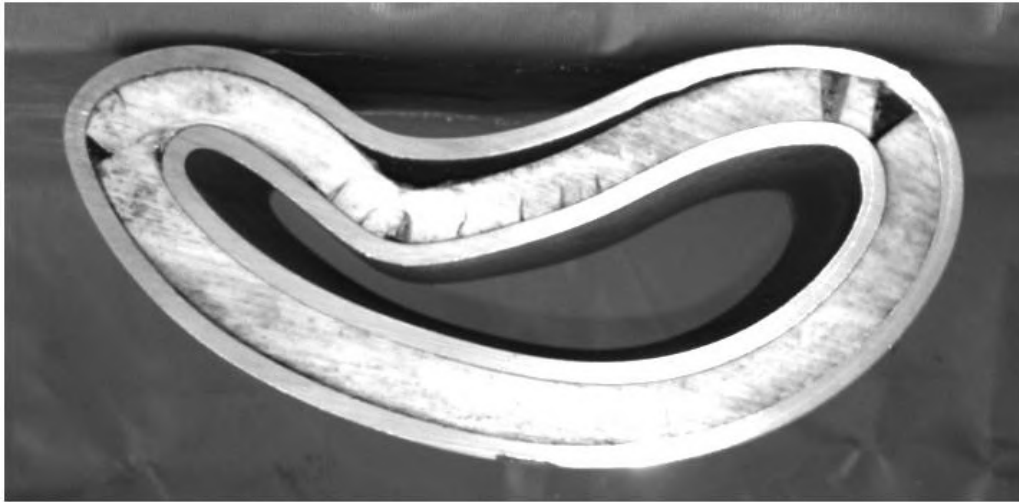


Figura 3.7: Seção do corpo de prova SP5-II após teste de colapso [14]

Estefen et al [18] realizaram um estudo comparativo da pressão de colapso de dutos sanduíches em testes experimentais em câmara hiperbárica com modelos de elementos finitos. Essa pesquisa foi realizada com dois materiais diferentes na camada anular, cimento e polipropileno. O conceito apresentado neste trabalho buscou combinar resistência estrutural e isolamento térmico em dutos sanduíches, fazendo com que suas camadas fossem capazes de trabalhar em conjunto para resistirem a altas pressões externas combinadas com cargas de flexão, típicas dos processos instalação de oleodutos em águas ultraprofundas.

Diferentes tipos de materiais cerâmicos ou poliméricos foram considerados para preencher o espaço anular do tubo de sanduíche. O material selecionado deveria fornecer um bom isolamento e alta resistência à compressão. Devido à sua ampla disponibilidade e custo relativamente baixo, cimento e polipropileno foram os materiais utilizados na pesquisa de Estefen et al [18].

Os testes laboratoriais dos dutos sanduíche foram realizados em escala reduzida sob pressão externa e posteriormente simulados com modelos de elementos finitos não lineares a correlação de resultados numéricos e experimentais. Os modelos em escala reduzida foram elaborados com duas geometrias e núcleos diferentes de materiais (cimento e polipropileno). Os testes ocorreram sob pressão hidrostática até o colapso,

utilizando-se de uma camada hiperbárica. Os resultados experimentais foram utilizados para a calibração do modelo numérico.



Figura 3.8: Seção do corpo de prova PIP.M2.G1.I02 colapsado [18].

Chen [8] estudou a pressão de colapso de dutos sanduíche com a camada anular de compósito cimentício reforçado com fibras de PVA sob pressão hidrostática. O objetivo do trabalho foi entender melhor o comportamento do duto com a camada anular preenchida com SHCC e medir a resistência do duto obtendo a pressão de colapso através de ensaios experimentais e simulações numéricas. Três modelos com diâmetros de 8 polegadas foram testados em câmara hiperbárica para obter a pressão de colapso e comparados com os modelos numéricos. Um outro ponto interessante da pesquisa foi a realização de um estudo paramétrico para avaliar a influência da ovalização na pressão de colapso desses dutos.

De acordo com as conclusões da pesquisa de Chen [8], o SHCC demonstrou boas características de resistência. A pressão de colapso apresentou consistência com os modelos numéricos, comprovando que os compósitos cimentícios mostram-se como uma excelente opção para a camada anular do duto sanduíche. O estudo paramétrico confirmou

que a pressão de colapso aumenta com o aumento da espessura e do raio, e diminui com o aumento das ovalizações. A ovalização inicial pode reduzir significativamente a pressão de colapso, por isso, se faz necessário um projeto adequado e um grande controle de qualidade no processo de fabricação do duto sanduíche.



Figura 3.9: Modelos utilizados por Chen [8].

Paz [7] também realizou experimentos com núcleo de compósito cimentício reforçado com fibras de PVA. O estudo teve como objetivo determinar o comportamento estrutural do duto sanduíche na instalação de linhas submarinas pelo método carretel. Para isso, foi realizado a comparação da pressão de colapso de dutos sanduíches com a mesma geometria em duas situações distintas: em dutos sanduíche que foram fletidos em um aparato de dobramento simulando experimentalmente a mesma curvatura ocasionada pelo carretel de lançamento em dutos sanduíche intactos que não sofreram flexão e retificação.

Devido às características do trabalho de Paz [7], somente os dados de dois modelos que não foram submetidos a flexão antes do colapso foram utilizados nesta

pesquisa. Isto porque o efeito da flexão ocasiona uma pequena perda de resistência ao colapso do duto sanduíche. Mesmo com essa pequena perda o compósito SHCC demonstrou comportamento satisfatório mesmo sob condição de flexão seguida de pressão externa.



Figura 3.10: Modelos de Paz [7] em fabricação.

A Tabela 3.5 apresenta os modelos, os tipos de materiais de cada camada e as referências utilizados como base de dados no desenvolvimento da equação da pressão de colapso do duto sanduíche.

Tabela 3.5: Materiais e referências dos modelos utilizados como base de dados.

Identificação do Modelo	Material Tubo Interno	Material Tubo Anular	Material Tubo Externo	Referência	Ano
DS-01-C	Aço A-53	PVDF	Aço A-53	Castilho	2013
DS-03-C	Aço A-53	PVDF	Aço A-53	Castilho	2013
DS-07-C	Aço A-53	PVDF	Aço A-53	Castilho	2013
DS-09-C	Aço A-53	PVDF	Aço A-53	Castilho	2013
SP1-I	Aço 678 B	Polipropileno	Aço 678 B	Castello	2013
SP1-II	Aço 678 B	Polipropileno	Aço 678 B	Castello	2013
SP2-I	Aço 678 B	Polipropileno	Aço 678 B	Castello	2013
SP2-II	Aço 678 B	Polipropileno	Aço 678 B	Castello	2013
SP5-I	Aço 678 B	Polipropileno	Aço 678 B	Castello	2013
SP5-II	Aço 678 B	Polipropileno	Aço 678 B	Castello	2013
PIP.M2.G1.I02	Alumínio	Polipropileno	Alumínio	Estefen et al	2007
PIP.M2.G1.I03	Alumínio	Polipropileno	Alumínio	Estefen et al	2007
PIP.M2.G2.I01	Alumínio	Polipropileno	Alumínio	Estefen et al	2007
PIP.M2.G2.I02	Alumínio	Polipropileno	Alumínio	Estefen et al	2007
PIP.M1.G1.I01	Alumínio	Cimento	Alumínio	Estefen et al	2007
PIP.M1.G1.I02	Alumínio	Cimento	Alumínio	Estefen et al	2007
PIP.M1.G2.I01	Alumínio	Cimento	Alumínio	Estefen et al	2007
PIP.M1.G2.I02	Alumínio	Cimento	Alumínio	Estefen et al	2007
SP1	Aço Inox 301	SHCC	Aço Inox 301	Chen	2012
SP2	Aço Inox 302	SHCC	Aço Inox 302	Chen	2012
SP3	Aço Inox 303	SHCC	Aço Inox 303	Chen	2012
SP-2A	Aço Inox 304	SHCC	Aço Inox 304	Paz	2015
SP-2B	Aço Inox 316	SHCC	Aço Inox 316	Paz	2015

A Tabela 3.6 apresenta os diâmetros internos, externos e espessuras de parede dos modelos.

Tabela 3.6: Resumo de parâmetros geométricos dos modelos.

Identificação do Modelo	Diâmetro Interno do Modelo (mm)	Espessura Tubo Interno (mm)	Diâmetro Externo do Modelo (mm)	Espessura Tubo Externo (mm)
DS-01-C	66,45	4,5	101,55	5,85
DS-03-C	65,47	3,95	101,44	5,92
DS-07-C	65,47	5,92	101,41	5,83
DS-09-C	73,07	4,5	101,45	5,89
SP1-I	155,575	6,35	219,075	6,35
SP1-II	155,575	6,35	219,075	6,35
SP2-I	155,575	6,35	219,075	6,35
SP2-II	155,575	6,35	219,075	6,35
SP5-I	155,575	6,35	219,075	6,35
SP5-II	155,575	6,35	219,075	6,35
PIP.M2.G1.I02	45,91	1,62	74,97	1,62
PIP.M2.G1.I03	46,28	1,68	75,4	1,62
PIP.M2.G2.I01	46,52	1,62	75,18	1,61
PIP.M2.G2.I02	46,54	1,7	62,1	1,46
PIP.M1.G1.I01	46,65	1,69	62,39	1,49
PIP.M1.G1.I02	47,1	1,63	75,92	1,65
PIP.M1.G2.I01	47,4	1,68	62,16	1,47
PIP.M1.G2.I02	47,37	1,67	62,25	1,47
SP1	148,4	1,8	202,8	2
SP2	148,4	1,8	202,8	2
SP3	148,4	1,8	202,8	2
SP-2A	148,4	2	203,2	2
SP-2B	162,74	2,77	219,08	2,77

A **Erro! Autoreferência de indicador não válida.7** exibe a relação D/t das camadas das amostras.

Tabela 3.7: Relação *D/t* das camadas dos modelos

Identificação do Modelo	D/t		
	Tubo Externo	Anular	Tubo Interno
DS-01-C	16,77	12,48	17,36
DS-03-C	18,57	11,04	17,14
DS-07-C	13,06	14,43	17,39
DS-09-C	18,24	23,60	17,22
SP1-I	26,50	10,83	34,50
SP1-II	26,50	10,83	34,50
SP2-I	26,50	10,83	34,50
SP2-II	26,50	10,83	34,50
SP5-I	26,50	10,83	34,50
SP5-II	26,50	10,83	34,50
PIP.M2.G1.I02	30,34	6,35	46,28
PIP.M2.G1.I03	29,55	6,41	46,54
PIP.M2.G2.I01	30,72	6,48	46,70
PIP.M2.G2.I02	29,38	12,81	42,53
PIP.M1.G1.I01	29,60	12,67	41,87
PIP.M1.G1.I02	30,90	6,52	46,01
PIP.M1.G2.I01	30,21	14,00	42,29
PIP.M1.G2.I02	30,37	13,79	42,35
SP1	84,44	8,50	101,40
SP2	84,44	8,50	101,40
SP3	84,44	8,50	101,40
SP-2A	76,20	8,51	101,60
SP-2B	60,75	9,44	79,09

A

A **Erro! Autoreferência de indicador não válida.7** exibe a relação D/t das camadas das amostras.

Tabela 3.78 exibe a tensão de escoamento dos materiais de cada uma das camadas dos modelos, em MPa.

Tabela 3.8: Tensão de escoamento dos materiais das camadas

Identificação do Modelo	Tensão de Escoamento dos Materiais (MPa)		
	Tubo Externo	Anular	Tubo Interno
DS-01-C	303,06	42,5	337,88
DS-03-C	303,06	42,5	337,88
DS-07-C	303,06	42,5	337,88
DS-09-C	303,06	35,7	337,88
SP1-I	415	26	415
SP1-II	415	26	415
SP2-I	415	26	415
SP2-II	415	26	415
SP5-I	415	26	415
SP5-II	415	26	415
PIP.M2.G1.I02	199,79	28,12	200,93
PIP.M2.G1.I03	186,82	45,48	206,52
PIP.M2.G2.I01	194,37	45,48	206,52
PIP.M2.G2.I02	186,82	45,48	141,57
PIP.M1.G1.I01	186,82	45,48	160,37
PIP.M1.G1.I02	195,2	28,12	192,1
PIP.M1.G2.I01	180,71	28,12	141,57
PIP.M1.G2.I02	180,71	28,12	141,57

SP1	275	20,64	275
SP2	275	20,64	275
SP3	275	20,64	275
SP-2A	275	20,64	275
SP-2B	275	20,64	275

A Tabela 3.9 mostra as ovalizações dos tubos internos e externos e a pressão de colapso obtidas nos testes experimentais.

Tabela 3.9: Ovalização e pressão de colapso

Identificação do Modelo	Ovalização Tubo Interno	Ovalização Tubo Externo	Pressão de Colapso (Mpa)
DS-01-C	0,12%	0,30%	71,36
DS-03-C	0,20%	0,28%	50,43
DS-07-C	0,15%	0,30%	78,82
DS-09-C	0,27%	0,30%	57,67
SP1-I	0,18%	0,40%	27,9
SP1-II	0,20%	0,39%	27,2
SP2-I	0,28%	0,35%	21
SP2-II	0,41%	0,34%	26,4
SP5-I	0,53%	0,40%	35,7
SP5-II	0,43%	0,35%	29,7
PIP.M2.G1.I02	0,23%	0,63%	43,35
PIP.M2.G1.I03	0,46%	0,30%	37,64
PIP.M2.G2.I01	0,19%	0,26%	31,14
PIP.M2.G2.I02	0,36%	0,80%	20,31
PIP.M1.G1.I01	0,55%	0,55%	17,13
PIP.M1.G1.I02	0,12%	0,27%	34,09
PIP.M1.G2.I01	0,21%	1,16%	10,98
PIP.M1.G2.I02	0,26%	0,70%	12,11
SP1	0,32%	0,41%	30,5
SP2	0,22%	0,47%	30,6
SP3	0,23%	0,39%	29,7

SP-2A	1,33%	0,99%	36,59
SP-2B	1,63%	1,25%	37,41

3.2.2 Formulação da equação

A pressão de colapso do duto sanduíche pode ser definida como uma função dos principais parâmetros geométricos e dos seus materiais: diâmetros, espessuras e tensões de escoamento, como vemos abaixo:

$$\frac{P_{co}}{P_{coi}} = f(D_i, t_i, D_a, t_a, D_e, t_e, \sigma_{oi,e}, \sigma_{oa}) \quad (3.10)$$

Adotando uma análise adimensional, essa função pode ser reduzida a uma relação entre variáveis adimensionais, tal como:

$$\frac{P_{co}}{P_{coi}} = F\left(\frac{D_i}{t_i}, \frac{D_a}{t_a}, \frac{D_e}{t_e}, \frac{\sigma_{i,e}}{\sigma_a}\right) \quad (3.11)$$

Ainda de acordo com esse teorema, admite-se que essa relação pode ser expressa pela seguinte série:

$$\frac{P_{co}}{P_{coi}} = \sum_{n=0}^{\infty} A_n \left[\left(\frac{D_i}{t_i}\right)^{a1}, \left(\frac{D_a}{t_a}\right)^{a2}, \left(\frac{D_e}{t_e}\right)^{a3}, \left(\frac{\sigma_{i,e}}{\sigma_a}\right)^{a4} \right]^n \quad (3.12)$$

Então, desconsiderando termos com $n > 1$, a seguinte expressão de primeira ordem pôde ser proposta para ajustar os dados numéricos.

$$\frac{P_{co}}{P_{coi}} = A_0 + A_1 B \quad , \quad (3.13)$$

onde, A_0 é uma constante, A_1 é o coeficiente angular da equação linear.

Os valores de A_0 e A_1 foram determinados respeitando cada um dos seus diferentes coeficientes, como mostra as equações abaixo:

$$\frac{\partial P_{co}}{\partial A_0} = -2 \sum (y_i - A_0 - A_1 x_i) \quad (3.14)$$

$$\frac{\partial P_{co}}{\partial A_1} = -2 \sum [(y_i - A_0 - A_1 x_i) x_i] \quad (3.15)$$

Simplificando a soma das variáveis para $i = 1$ e derivando P_{co} para o mínimo que é igual a 0, teremos:

$$0 = \sum y_i - \sum A_0 - \sum A_1 x_i \quad (3.16)$$

$$0 = \sum y_i x_i - \sum A_0 x_i - \sum A_1 x_i^2 \quad (3.17)$$

Realizando o $\sum A_0 = nA_0$ a equação pode ser expressa por:

$$nA_0 + (\sum x_i)A_1 = \sum y_i \quad (3.18)$$

$$(\sum x_i)A_0 + (\sum x_i^2)A_1 = \sum y_i x_i \quad (3.19)$$

O valor de A_1 pode ser obtido através de simulações da seguinte equação normal:

$$A_1 = \frac{n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (3.20)$$

O resultado pode ser utilizado para encontrar o valor de A_0 com a equação:

$$A_0 = \bar{y} - A_1 \bar{x} \quad (3.21)$$

O parâmetro adimensional B é dado por:

$$B = \left(\frac{D_i}{t_i}\right)^{\alpha_1} \left(\frac{D_a}{t_a}\right)^{\alpha_2} \left(\frac{D_e}{t_e}\right)^{\alpha_3} \left(\frac{\sigma_{i,e}}{\sigma_a}\right)^{\alpha_4} \quad (3.22)$$

Os parâmetros A_0 , A_1 , α_1 , α_2 , α_3 e α_4 foram determinados pelo método dos mínimos quadrados para obter uma correlação precisa entre a equação e os resultados de testes experimentais. Esse processo, primeiramente, utilizou os dados dos 23 testes experimentais demonstrados anteriormente gerando a expressão analítica (3.23) para calcular a pressão de colapso do duto de sanduíche (P_{co}):

$$\frac{P_{co}}{P_{coi}} = 2,24 + 0,14 \left(\frac{D_i}{t_i}\right)^{-1,5} \left(\frac{D_a}{t_a}\right)^{-5} \left(\frac{D_e}{t_e}\right)^{2,3} \left(\frac{\sigma_{i,e}}{\sigma_a}\right)^{4,8} \quad (3.23)$$

Na Figura 3.11, a expressão analítica proposta é comparada com os resultados dos testes experimentais disponíveis. O ajuste de linha para esta aproximação demonstrou um desvio médio alto, de 22%. Porém, essa formulação considerou os modelos de dutos sanduíche com os diferentes tipos de anulares, cimentícios e poliméricos.

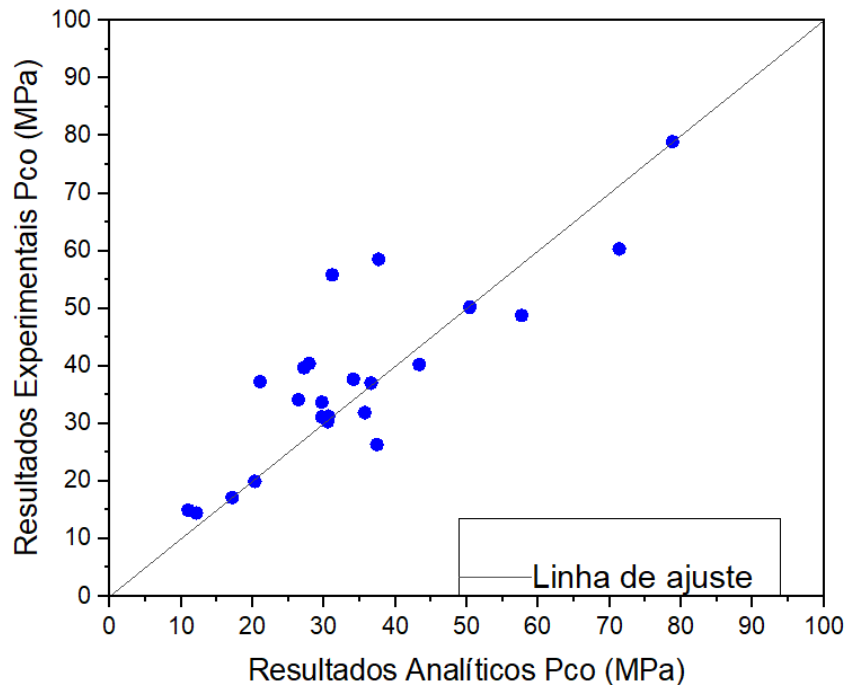


Figura 3.11: Gráfico Equação Analítica x Testes Experimentais

Com o objetivo de obter uma equação com um menor desvio em relação aos experimentos e dividindo-se os testes experimentais em dois grupos: os polimérico e os

cimentícios. Com isso, foram obtidas duas equações de pressão de colapso distintas para cada grupo proposto.

A equação de pressão de colapso para os dutos sanduíches com camada anular de materiais polimérico demonstrou um desvio médio menor, de 11,9%, conforme expressão abaixo:

$$\frac{P_{co}}{P_{coi}} = 1,758 + 36965,988 \left(\frac{D_i}{t_i}\right)^{-2,2} \left(\frac{D_a}{t_a}\right)^{-1,16} \left(\frac{D_e}{t_e}\right)^{2,11} \left(\frac{\sigma_{i,e}}{\sigma_a}\right)^{-5,06} \quad (3.24)$$

Na Figura 3.12, a expressão analítica para os dutos com anular polimérico é comparada com os resultados dos testes experimentais disponíveis.

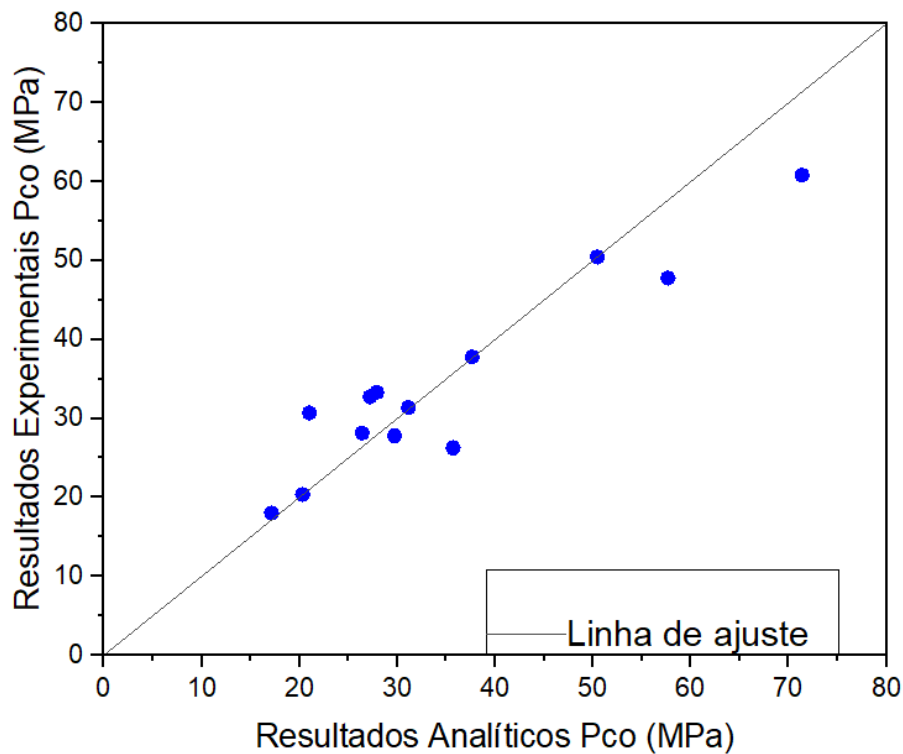


Figura 3.12: Gráfico equação analítica polímeros *versus* experimentais polímeros

Os modelos de dutos sanduíches com camada anular de materiais cimentícios apresentaram uma equação com um desvio médio bem menor, de 2,2%, conforme apresentada abaixo:

$$\frac{P_{co}}{P_{coi}} = 2,38 + 0,771 \left(\frac{D_i}{t_i}\right)^{-1,6} \left(\frac{D_a}{t_a}\right)^{-6,4} \left(\frac{D_e}{t_e}\right)^{2,0} \left(\frac{\sigma_{i,e}}{\sigma_a}\right)^{6,0} \quad (3.25)$$

A Figura 3.13, mostra os valores gerados pela equação analítica obtida somente com os dados dos testes experimentais dos dutos com anular cimentício.

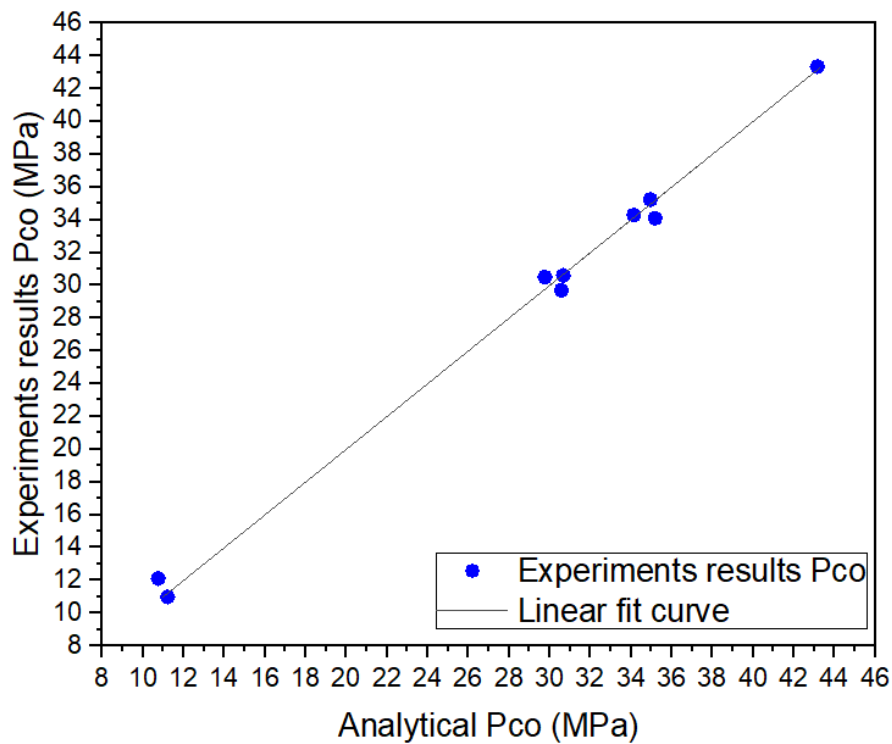


Figura 3.13: Gráfico equação analítica cimentícios *versus* testes experimentais cimentícios

4 MODELO MATEMÁTICO

“O livro do mundo está escrito em linguagem matemática” — Galileu Galilei

Nesse capítulo foi feita uma descrição do modelo matemático desenvolvido para a otimização das espessuras de camadas do duto sanduíche e de todas as hipóteses consideradas neste trabalho.

4.1 PROBLEMA E HIPÓTESES CONSIDERADAS

Considere um duto sanduíche $\{C, t, M\}$ onde $|C|$ representa o número de camadas presentes no duto, cada camada possui uma espessura $|t|$ composta por um material $|M|$. Considere ainda que a camada c ($c \in C$) com espessura t é constituída pelo material m ($m \in M$) com suas respectivas características. O conceito do duto sanduíche propõe que as camadas trabalhem de forma combinada no que tange a resistência estrutural. Ou seja, cada camada contribui para a resistência global da estrutura. Além da resistência, outras características do duto sanduíche dependem da combinação de camadas, como exemplo a condutividade térmica.

O problema do desenvolvimento do duto sanduíche consiste em definir o número de camadas, os materiais de cada camada e suas respectivas espessuras. A solução deve minimizar o custo total incluindo o custo dos conectores e atender as condições de operação que os dutos serão expostos. Como os dutos sanduíches são projetados para serem utilizados no leito marinho, eles devem resistir às altas pressões, ao processo de instalação e ainda proporcionar proteção térmica para os produtos transportados.

A literatura disponível descreve somente dutos sanduíches com três camadas estruturais e a possibilidade de uma quarta camada para aumentar o isolamento térmico. A utilização de quatro ou mais camadas que trabalhem de forma combinada para a resistência ainda não foi estudada. Na figura 4.1, podemos verificar as espessuras das camadas, onde temos o tubo interno (t_1), a camada preenchida com material anular (t_2), o tubo externo (t_3) e o revestimento térmico (t_4).

Os conectores servem para unir um duto ao outro formando a linha submarina de transporte de hidrocarbonetos. Essas peças de conexão representam uma parte significativa do custo das linhas submarinas por serem utilizados, normalmente, a cada 12 metros e apresentar grande complexidade de produção. As espessuras das camadas do duto sanduíche influenciam diretamente no formato e conseqüentemente no custo do conector. Por esses fatores a consideração do custo dos conectores mostra-se de grande relevância para o desenvolvimento do duto sanduíche.

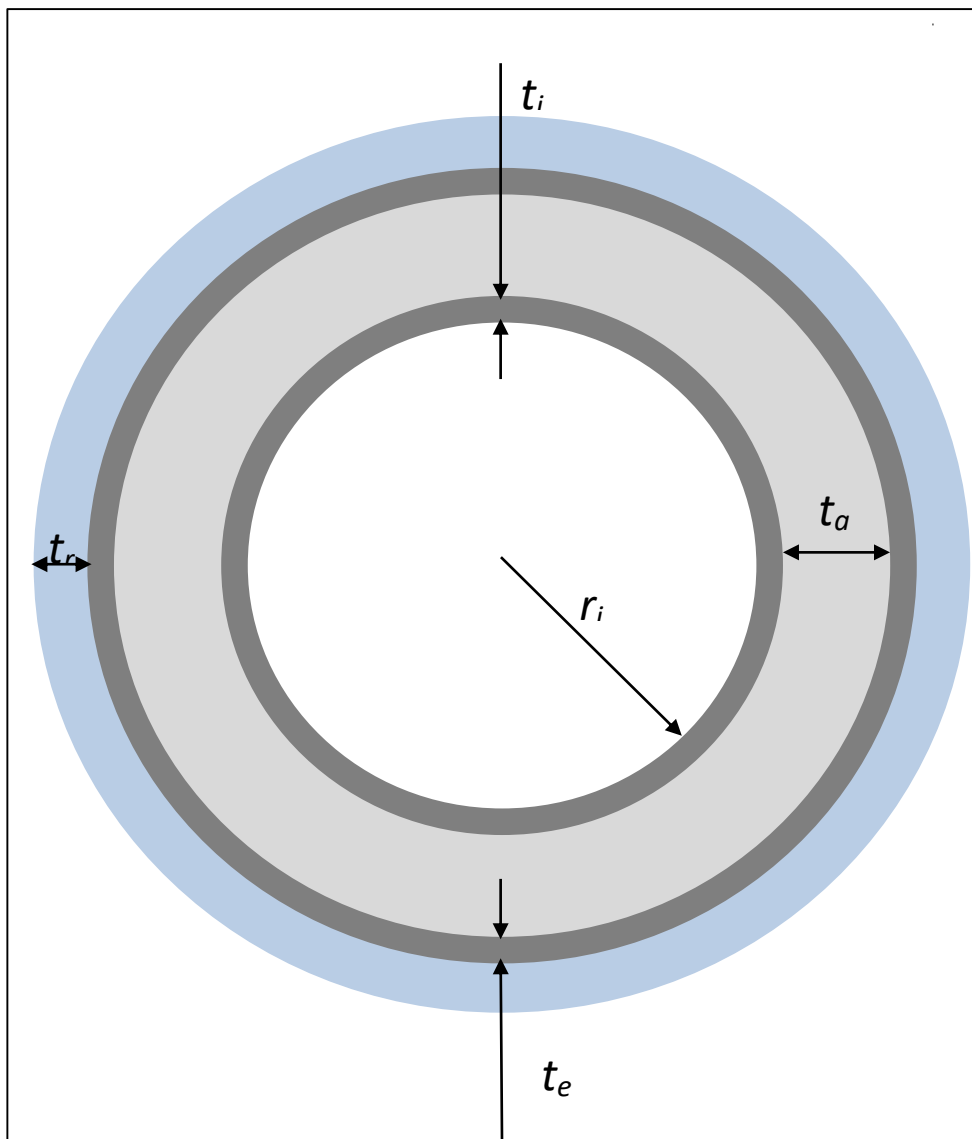


Figura 4.1: Espessuras das camadas do duto sanduíche.

A fim de caracterizar adequadamente o problema e/ou modelo matemático, muitas considerações foram levantadas, desde as condições reais de limitações físicas e tecnológicas para o desenvolvimento do duto até estimativas e praticidades matemáticas para a elaboração do modelo. Essas hipóteses foram divididas em dois grupos:

- Hipóteses técnicas que apresentam os limites de desenho, estrutura e fabricação.
- Hipóteses de modelagem que demonstram as considerações matemáticas e de programação do modelo de otimização.

4.1.1 Hipóteses técnicas

- (i) O duto interno, externo e, por consequência, a camada anular do duto sanduíche devem possuir geometria circular, pois a forma circular apresenta maior resistência as pressões internas e externas por não gerarem concentrações de tensões.
- (ii) O duto interno, externo e, por consequência, a camada anular do duto sanduíche devem ser concêntricos para que a distribuição das cargas seja distribuída uniformemente.
- (iii) A diferença entre o raio externo do duto interno e o raio interno do duto externo resulta na espessura da camada anular que deve ser maior que 20 mm para evitar fatores que possam influenciar na resistência do duto projetado. Como não existe uma norma para tal parâmetro, utilizou-se a NBR 6118, que regulamenta o espaçamento mínimo entre barras de aço em estruturas de concreto armado.
- (iv) A ovalização dos dutos não pode ultrapassar a 2%, porque a resistência à pressão externa mostra-se muito pequena acima desse valor. O desenvolvimento de dutos com valores acima desse grau de ovalização não se mostraria viável tecnicamente e economicamente.
- (v) As características técnicas dos materiais utilizados no desenvolvimento do duto sanduíche devem ser conhecidas. Essas informações são necessárias para os cálculos da função objetivo e das restrições.

- (vi) As paredes dos dutos devem possuir mais que 1,5 mm de espessura para que não comprometam a montagem da linha submarina. Os conectores necessitam que os dutos apresentem um mínimo de espessura dos tubos interno e externo para que a solda seja realizada sem comprometer a qualidade e a integridade da linha de dutos sanduíches.
- (vii) Os dutos sanduíches devem possuir comprimento máximo de 12 metros, pois o mercado atual oferece tubos rígidos com esse comprimento máximo.
- (viii) O material utilizado na camada anular deve preencher todo o espaço entre os dois dutos (interno e externo) para que não haja comprometimento da resistência do duto.

4.1.2 Hipóteses de modelagem

As hipóteses de modelagem são as considerações utilizadas para modelar matematicamente o problema. Essas proposições apresentam condições empregadas para promover a solução do problema, mas não se apresentam obrigatoriamente como limitações técnicas para o desenvolvimento do duto sanduíche.

- (i) O raio interno do duto sanduíche, que consisti num informação importante no modelo proposto, foi adotado como um parâmetro. Ou seja, determina-se o raio interno do duto em função de uma vazão desejada para o duto. Essa hipótese mostra-se necessária para que o duto atenda as perspectivas de escoamento, visto que o duto não deve se apresentar como um gargalo operacional.
- (ii) A pressão de colapso deve ser predeterminada para atender às condições de pressão a que o duto será submetido, considerando todos os fatores de segurança estabelecidos pelas normas vigentes. Como a pressão externa é diretamente proporcional a profundidade que o mesmo será instalado, tal parâmetro deve ser definido em função da lâmina d'água prevista para operação do duto.
- (iii) A restrição que garante a resistência ao colapso do duto sanduíche deve utilizar uma inequação oriunda de uma predeterminada equação analítica

que esteja ajustada para calcular a pressão de colapso do duto sanduíche com os materiais utilizados na modelagem. Em função do alto grau de complexidade dessa equação foram utilizadas duas equações que serão explicadas no item 3.4.1.

- (iv) A lâmina d'água também é um dos fatores que determinam a resistência a tração necessária para o duto sanduíche, visto que a tração máxima ocorre no momento da instalação, quando o duto deve suportar todo o peso da linha que ainda não está apoiada no leito marinho. Como o método de instalação influencia diretamente no comprimento da linha que não está apoiada no leito marinho durante a instalação, o método de instalação deve ser predefinido para a correta determinação da resistência a tração do duto.
- (v) A Taxa de transferência de calor foi adotada como parâmetro de entrada no modelo por depender de diversas informações do projeto de utilização da linha submarina. A taxa de transferência de calor é determinante para a garantia de escoamento do óleo/gás. O cálculo da taxa de transferência de calor depende das seguintes condições: temperatura do mar, correntes marinhas, temperatura do óleo/gás, tipo de fluido, vazão, espessuras e distância necessária para o escoamento da produção.
- (vi) As propriedades dos materiais considerados no modelo devem ser previamente analisadas para uma correta parametrização do modelo.

4.2 MODELO ESQUEMÁTICO E NOTAÇÃO UTILIZADA

O modelo esquemático do problema do desenvolvimento de dutos sanduíche pode ser definido simplificadaamente como:

Dados:

Os materiais com suas respectivas propriedades, parâmetros de produção, condições de resistência do duto sanduíche e custos.

Obter:

O número de camadas do duto sanduíche em função dos materiais propostos e suas respectivas espessuras.

Com o Objetivo de

Minimizar os custos do duto sanduíche.

Sujeito a:

Restrições de pressão de colapso;

Restrições de condutividade térmica;

Restrições de tração;

Restrições de conexão;

Restrições de domínio das variáveis;

4.3 FORMULAÇÃO

4.3.1 Notação

Conjuntos e índices	Descrição
$i \in M_i$	Conjunto de materiais que podem ser utilizados no duto interno
$a \in M_a$	Conjunto de materiais que podem ser utilizados na camada anular
$e \in M_e$	Conjunto de materiais que podem ser utilizados no duto externo
$r \in M_r$	Conjunto de materiais que podem ser utilizados no revestimento
$c \in M_c$	Conjunto de materiais que podem ser utilizados no conector
Parâmetros	Descrição
r_i	Raio interno do duto interno
l	Comprimento da linha submarina
ρ_i	Densidade do material do duto interno
ρ_a	Densidade do material da camada anular
ρ_e	Densidade do material do duto externo
ρ_r	Densidade do material do revestimento
ρ_c	Densidade do material do conector
ρ_{ag}	Densidade da água
$\rho_{i,e}$	Densidade do material do duto interno e externo
P_i	Preço por Kg do material do duto interno
P_a	Preço por Kg do material da camada anular
P_e	Preço por Kg do material do duto externo
P_r	Preço por Kg do material do revestimento
P_c	Preço por Kg do material do conector
m_i	Massa do material do duto interno
m_a	Massa do material da camada anular
m_e	Massa do material do duto externo
m_r	Massa do material do revestimento
m_c	Massa do material do conector
V_i	Volume do material do duto interno
V_a	Volume do material da camada anular
V_e	Volume do material do duto externo
V_r	Volume do material do revestimento
V_c	Volume do material do conector
A_i	Área do material do duto interno
A_a	Área do material da camada anular
A_e	Área do material do duto externo
A_r	Área do material do revestimento
A_c	Área do material do conector
P_{co}	Pressão de colapso do duto sanduiche
P_{coi}	Pressão de colapso do duto interno
σ_i	Tensão de escoamento do material do duto interno

σ_e	Tensão de escoamento do material do duto externo
$\sigma_{i,e}$	Tensão de escoamento do material dos dutos interno e externo
σ_t	Tensão gerada pela tração
P_l	Peso da linha não apoiada no leito marinho
E_l	Empuxo da linha não apoiada no leito marinho
L_l	Comprimento da linha não apoiada no leito marinho
T_l	Tração da linha não apoiada no leito marinho
g	Aceleração da gravidade
r_1	Raio interno do duto interno
Q_r	Taxa de transferência de calor resultante
T_i	Temperatura do fluido interno
T_o	Temperatura do fluido externo
H_0	Coefficiente de convecção externa
H_1	Coefficiente de convecção interna
K_1	Condutividade térmica do material do duto interno
K_2	Condutividade térmica do material da camada anular
K_3	Condutividade térmica do material do duto externo
K_4	Condutividade térmica do material do duto revestimento
t_s	Espessura mínima de projeto
t_{rm}	Espessura mínima do revestimento
Variáveis Contínuas	Descrição
t_i	Espessura do duto interno
t_a	Espessura da camada anular
t_e	Espessura do duto externo
t_r	Espessura do duto revestimento
Variáveis Binárias	Descrição
X_i	Se o material i é utilizado no duto interno
X_a	Se o material i é utilizado na camada anular
X_e	Se o material i é utilizado no duto externo
X_r	Se o material i é utilizado no revestimento
X_c	Se o material i é utilizado no conector
X_{pcc}	Se o material i é utilizado na camada anular é cimentício
X_{pcp}	Se o material i é utilizado na camada anular é polimérico

4.3.2 Função Objetivo

A função objetivo é dada pela equação (4.0) que constitui o custo das quatro camadas que compõem o duto sanduíche somada ao custo do conector que varia em função das espessuras das camadas. Essas se referem, respectivamente: ao duto interno, à camada anular, ao duto externo e ao revestimento térmico externo ao duto. Cada termo

da equação é formado, resumidamente, pelo produto dos seguintes termos: massa da camada, custo do material e a variável binária de decisão do tipo de material.

$$MinZ = Z_i + Z_a + Z_e + Z_r + Z_c \quad (4.0)$$

A massa de cada camada é dada pelo produto do volume pela densidade do material. O volume é obtido pelo produto da área da seção transversal pelo comprimento. A área da seção transversal é definida em função das espessuras.

No modelo proposto, o raio interno do duto é pré-definido e as espessuras se apresentam como variáveis. O desenvolvimento do primeiro termo que define o custo do duto interno na equação (4.0) em função das variáveis está representado abaixo:

$$Z_i = \sum_i V_i \cdot \rho_i \cdot P_i \cdot X_i \quad (4.1)$$

$$Z_i = \sum_i A_i \cdot l \cdot \rho_i \cdot P_i \cdot X_i \quad (4.1a)$$

$$Z_i = \sum_i \pi ((r_i + t_i)^2 - r_i^2) \cdot l \cdot \rho_i \cdot P_i \cdot X_i \quad (4.1b)$$

$$Z_i = \sum_i \pi (2r_i t_i + t_i^2) \cdot l \cdot \rho_i \cdot P_i \cdot X_i \quad (4.1c)$$

O segundo termo é obtido da mesma forma que o primeiro, mas com a presença de duas variáveis t_i e t_a . As equações (4.2) mostram o desenvolvimento do segundo termo que define o custo da camada anular na equação (4.0) em função das variáveis.

$$Z_a = \sum_a m_a \cdot P_a \cdot X_a \quad (4.2)$$

$$Z_a = \sum_a A_a \cdot l \cdot \rho_a \cdot P_a \cdot X_a \quad (4.2a)$$

$$Z_a = \sum_a \pi ((r_i + t_i + t_a)^2 - (r_i + t_i)^2) \cdot l \cdot \rho_a \cdot P_a \cdot X_a \quad (4.2b)$$

$$Z_a = \sum_a \pi (2r_i t_a + 2t_i t_a + t_a^2) \cdot l \cdot \rho_a \cdot P_a \cdot X_a \quad (4.2c)$$

O terceiro termo que define o custo do duto externo é definido pelo mesmo processo que o segundo, mas com a presença de três variáveis t_i , t_a e t_e . As equações (4.3) mostram o desenvolvimento do terceiro termo da equação (4.0) em função das variáveis.

$$Z_e = \sum_e m_e \cdot P_e \cdot X_e \quad (4.3)$$

$$Z_e = \sum_e A_e \cdot l \cdot \rho_e \cdot P_e \cdot X_e \quad (4.3a)$$

$$Z_e = \sum_e \pi ((r_i + t_i + t_a + t_e)^2 - (r_i + t_i + t_a)^2) \cdot l \cdot \rho_e \cdot P_e \cdot X_e \quad (4.3b)$$

$$Z_e = \sum_e \pi (2r_i t_e + 2t_i t_e + 2t_a t_e + t_e^2) \cdot l \cdot \rho_e \cdot P_e \cdot X_e \quad (4.3c)$$

O quarto termo que determina o custo do revestimento térmico do duto, se desenvolve da mesma forma que os termos já apresentados, mas com a presença de quatro variáveis t_i , t_a , t_e e t_r . As equações (4.4) mostram o desenvolvimento do quarto termo da equação (4.0) em função das variáveis.

$$Z_r = \sum_r m_r \cdot P_r \cdot X_r \quad (4.4)$$

$$Z_r = \sum_r A_r \cdot l \cdot \rho_r \cdot P_r \cdot X_r \quad (4.4a)$$

$$Z_r = \sum_r \pi ((r_i + t_i + t_a + t_e)^2 - (r_i + t_i + t_a)^2) \cdot l \cdot \rho_r \cdot P_r \cdot X_r \quad (4.4b)$$

$$Z_r = \sum_r \pi (2r_i t_r + 2t_i t_r + 2t_a t_r + 2t_e t_r + t_r^2) \cdot l \cdot \rho_r \cdot P_r \cdot X_r \quad (4.4c)$$

O quinto termo que gera o custo do conector do duto se desenvolve a partir do conector projetado por Párraga Quispe [20], Figura 4.2 . A massa de cada camada é dada pelo produto do volume pela densidade do material. O volume é obtido pela revolução da área da seção longitudinal do conector em função do raio médio das primeiras três camadas do duto sanduíche. A área da seção longitudinal é definida em função das

espessuras, como pode ser visto na figura 4.3. As equações (4.5) mostram o desenvolvimento do quinto termo da equação (4.0) em função das variáveis t_i , t_a e t_e .

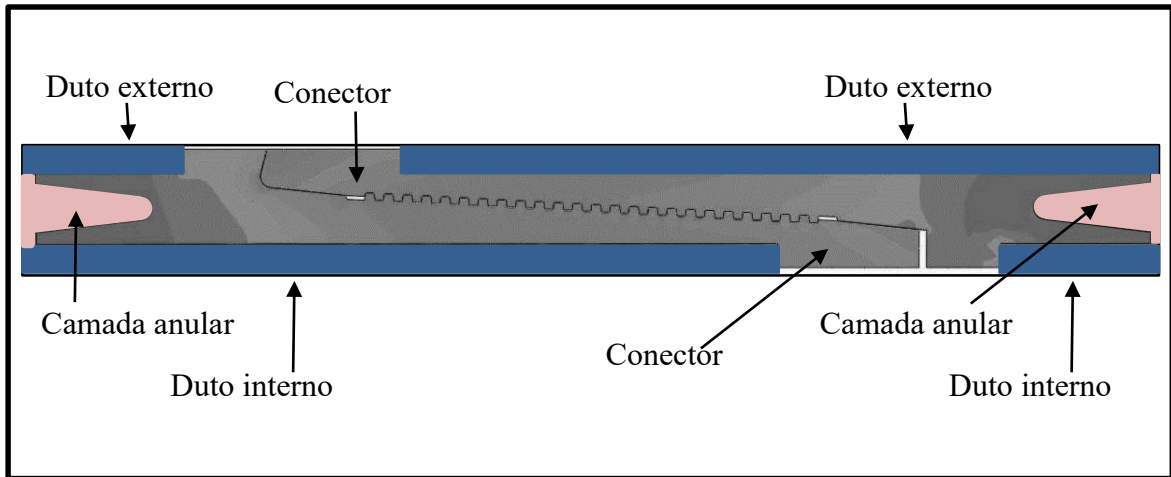


Figura 4.2: conector projetado por Párraga Quispe [20]

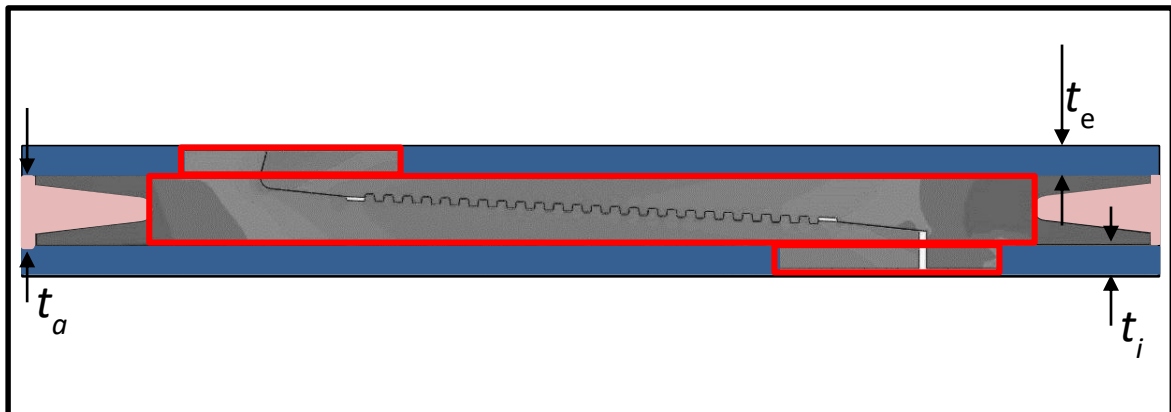


Figura 4.3: Áreas da figura em função das variáveis

$$Z_c = \sum_c m_c \cdot P_c \cdot X_c \quad (4.5)$$

$$Z_c = \sum_c V_c \cdot \rho_c \cdot P_c \cdot X_c \quad (4.5a)$$

$$Z_c = \sum_c A_c \cdot 2\pi \cdot \left(\frac{r_i + r_i + t_i + t_a + t_e}{2}\right) \cdot \rho_c \cdot P_c \cdot X_c \quad (4.5b)$$

$$Z_c = \sum_c A_c \cdot \pi \cdot (r_i + r_i + t_i + t_a + t_e) \cdot \rho_c \cdot P_c \cdot X_c \quad (4.5c)$$

$$Z_c = \sum_c (B_{ic} \cdot t_i + B_{ac} \cdot t_a + B_{ec} \cdot t_e) \cdot \pi \cdot (r_i + r_i + t_i + t_a + t_e) \cdot \rho_c \cdot P_c \cdot X_c \quad (4.5d)$$

A função objetivo com todos os seus termos em função das variáveis está representada na equação (4.6).

$$\begin{aligned} MinZ = & \sum_i \pi (2r_i t_i + t_i^2) \cdot l \cdot \rho_i \cdot P_i \cdot X_i + \sum_a \pi (2r_i t_a + 2t_i t_a + t_a^2) \cdot l \cdot \rho_a \cdot \\ & P_a \cdot X_a + \sum_e \pi (2r_i t_e + 2t_i t_e + 2t_a t_e + t_e^2) \cdot l \cdot \rho_e \cdot P_e \cdot X_e + \sum_r \pi (2r_i t_r + \\ & 2t_i t_r + 2t_a t_r + 2t_e t_r + t_r^2) \cdot l \cdot \rho_r \cdot P_r \cdot X_r + \sum_c (B_{ic} \cdot t_i + B_{ac} \cdot t_a + B_{ec} \cdot t_e) \cdot \\ & \pi \cdot (r_i + r_i + t_i + t_a + t_e) \cdot \rho_c \cdot P_c \cdot X_c \end{aligned} \quad (4.6)$$

4.3.3 Restrição de resistência ao colapso

As restrições de resistência ao colapso asseguram que as camadas do duto sanduíche propostas pelo modelo de otimização, resultem numa pressão de colapso maior que as previstas nas normas. Esta condição é imperativa para a aprovação do duto sanduíche, pois os mesmos são projetados para serem instalados em grandes profundidades, onde estarão submetidos a altas pressões hidrostáticas que podem ocasionar o colapso do duto.

A equação de resistência ao colapso deve ser muito bem estudada, pois, como visto anteriormente, é de extrema complexidade e possui particularidades em função dos materiais e das variáveis utilizadas. Ou seja, requer uma pré-análise para ver se a mesma é compatível com a geometria e os materiais utilizados no modelo.

As equações analíticas disponíveis na literatura, além de não serem compatíveis com as variáveis do modelo, demonstraram uma margem de erro maior que as desenvolvidas nessa tese. Por isso, a restrição de resistência ao colapso do duto sanduíche utiliza as equações desenvolvidas por análise adimensional elaboradas no capítulo anterior.

Com o objetivo de minimizar os desvios, foram utilizadas duas equações. Uma desenvolvida a partir de dados de dutos com anulares poliméricos e outra com os dados de dutos com anulares cimentícios. Ou seja, o modelo utiliza uma determinada equação em função do material utilizado na camada anular, uma para materiais poliméricos e outra para materiais cimentícios.

A equação (4.7) obtida a partir dos testes experimentais dos dutos com anular polimérico foi a base para a restrição ao colapso do duto com polímeros na camada anular, como pode ser visto na restrição (4.7a).

$$\frac{P_{co}}{P_{coi}} = 1,758 + 36965,988 \cdot \left(\frac{D_i}{t_i}\right)^{-2,2} \cdot \left(\frac{D_a}{t_a}\right)^{-1,16} \cdot \left(\frac{D_e}{t_e}\right)^{2,11} \cdot \left(\frac{\sigma_{i,e}}{\sigma_a}\right)^{-5,06} \quad (4.7)$$

$$\frac{P_{co}}{P_{coi}} \leq 1,758 + 36965,988 \cdot \left(\frac{2r_i+2t_i}{t_i}\right)^{-2,2} \cdot \left(\frac{2r_i+2t_i+2t_a}{t_a}\right)^{-1,16} \cdot \left(\frac{2r_i+2t_i+2t_a+2t_e}{t_e}\right)^{2,11} \cdot \left(\frac{\sigma_{i,e}}{\sigma_a}\right)^{-5,06} \quad (4.7a)$$

A restrição ao colapso do duto com material cimentício na camada anular (4.8a), foi obtida a partir equação (4.8) que utilizou os testes experimentais dos dutos com o mesmo material.

$$\frac{P_{co}}{P_{coi}} = 2,38 + 0,771 \cdot \left(\frac{D_i}{t_i}\right)^{-1,6} \cdot \left(\frac{D_a}{t_a}\right)^{-6,4} \cdot \left(\frac{D_e}{t_e}\right)^{2,0} \cdot \left(\frac{\sigma_{i,e}}{\sigma_a}\right)^{6,0} \quad (4.8)$$

$$\frac{P_{co}}{P_{coi}} \leq 2,38 + 0,771 \cdot \left(\frac{2r_i+2t_i}{t_i}\right)^{-1,6} \cdot \left(\frac{2r_i+2t_i+2t_a}{t_a}\right)^{-6,4} \cdot \left(\frac{2r_i+2t_i+2t_a+2t_e}{t_e}\right)^{2,0} \cdot \left(\frac{\sigma_{i,e}}{\sigma_a}\right)^{6,0} \quad (4.8a)$$

logo a restrição da pressão de colapso com as duas equações e as variáveis de decisão é dada por

$$\begin{aligned} \frac{P_{co}}{P_{coi}} \leq & \left(1,758 + 36965,988 \cdot \left(\frac{2r_i+2t_i}{t_i} \right)^{-2,2} \cdot \left(\frac{2r_i+2t_i+2t_a}{t_a} \right)^{-1,16} \cdot \left(\frac{2r_i+2t_i+2t_a+2t_e}{t_e} \right)^{2,11} \cdot \right. \\ & \left. \left(\frac{\sigma_{i,e}}{\sigma_a} \right)^{-5,06} \right) \cdot X_{pcp} + \left(2,38 + 0,771 \cdot \left(\frac{2r_i+2t_i}{t_i} \right)^{-1,6} \cdot \left(\frac{2r_i+2t_i+2t_a}{t_a} \right)^{-6,4} \cdot \right. \\ & \left. \left(\frac{2r_i+2t_i+2t_a+2t_e}{t_e} \right)^{2,0} \cdot \left(\frac{\sigma_{i,e}}{\sigma_a} \right)^{6,0} \right) \cdot X_{pcc} \end{aligned} \quad (4.8b)$$

As equações utilizadas nessa restrição garantem bons resultados quando as relações de diâmetro e espessura das camadas estão dentro do mesmo intervalo das relações de diâmetro e espessura das camadas dos modelos que geraram os dados utilizados no desenvolvimento da equação de pressão de colapso adimensional. As restrições (4.9) asseguram que as relações entre os diâmetros e espessuras estejam dentro de limites mínimos e máximos pré-estabelecidos em função dos dados dos testes experimentais.

$$\frac{D_{Min}}{t_{Min}} \cdot X_{pc} \leq \frac{D}{t} \leq \frac{D_{Min}}{t_{Min}} \cdot X_{pc} \quad (4.9)$$

Limites para dutos com anular polimérico:

$$16,7 \cdot X_{pcp} \leq \frac{D_i}{t_i} \leq 30,7 \cdot X_{pcp} \quad (4.9a)$$

$$6,4 \cdot X_{pcp} \leq \frac{D_a}{t_a} \leq 23,6 \cdot X_{pcp} \quad (4.9b)$$

$$17,2 \cdot X_{pcp} \leq \frac{D_e}{t_e} \leq 46,7 \cdot X_{pcp} \quad (4.9c)$$

Limites para dutos com anular cimentício:

$$30 \cdot X_{pcc} \leq \frac{D_i}{t_i} \leq 85 \cdot X_{pcc} \quad (4.9d)$$

$$6,5 \cdot X_{pcc} \leq \frac{D_a}{t_a} \leq 14 \cdot X_{pcc} \quad (4.9e)$$

$$42 \cdot X_{pcc} \leq \frac{D_e}{t_e} \leq 100 \cdot X_{pcc} \quad (4.9f)$$

4.3.4 Restrição de resistência a tração

As restrições de resistência a tração garantem que as camadas internas e externas do duto sanduíche definidas pelo modelo de otimização resultem numa tensão de escoamento maior que as previstas nas normas. Esta condição é obrigatória para a validação do duto sanduíche, porque os mesmos são projetados para serem lançados em águas ultra-profundas. Por isso, é necessário a utilização de métodos que impõem aos dutos grandes esforços de tração, no momento da instalação, onde o duto suporta todo o peso da linha que ainda não está apoiada no leito marinho.

O modelo considera que somente a camada interna e externa atuam diretamente na resistência ao escoamento, pois essas camadas usam aço como material e os diferentes tipos de aço apresentam uma rigidez muito maior que os materiais empregados na camada anular, como polímeros e cimentos.

A restrição considera que a tensão de escoamento do material deve ser 60% maior que a tensão gerada pela tração que a coluna exerce sobre a seção do duto, pois a norma

$$\sigma_{i,e} \geq 1,6 \cdot \sigma_t \quad (4.10)$$

como a tensão gerada pela tração é dada pela tração sobre a área, tem-se

$$\frac{\sigma_{i,e}}{1,3} \geq \frac{T_l}{A_i + A_e} \quad (4.10a)$$

a tração é obtida pela força peso menos o empuxo, logo

$$\frac{\sigma_{i,e}}{1,3} \geq \frac{P_l - E_l}{A_i + A_e} \quad (4.10b)$$

$$\frac{\sigma_{i,e}}{1,3} \geq \frac{g \cdot L_l \cdot (((A_i + A_e) \cdot \rho_{ie}) + (A_a \cdot \rho_a) + (A_r \cdot \rho_r)) - \rho_a g \cdot (A_i + A_a + A_e + A_r)}{A_i + A_e} \quad (4.10c)$$

onde,

$$A_i = \pi \cdot (2r_i t_i + t_i^2) \quad (4.10d)$$

$$A_a = \pi \cdot (2r_i t_a + 2t_i t_a + t_a^2) \quad (4.10e)$$

$$A_e = \pi \cdot (2r_i t_e + 2t_i t_e + 2t_a t_e + t_e^2) \quad (4.10f)$$

$$A_r = \pi \cdot (2r_i t_r + 2t_i t_r + 2t_a t_r + 2t_e t_r + t_r^2) \quad (4.10g)$$

4.3.5 Restrições de isolamento térmico

O isolamento térmico em dutos submarinos é de extrema importância para a garantia de escoamento, pois esses dutos são instalados em grandes profundidades, onde a temperatura do mar se apresenta muito baixa (em torno de 4°). Como a temperatura do fluido, normalmente, é bem mais alta que a do mar, o fluido tende a perder calor por condução se não tiver um bom isolamento térmico.

Esta condição é imperativa para a aprovação do duto sanduíche, porque os mesmos são projetados para serem instalados em grandes profundidades, onde estarão submetidos a baixas temperaturas que podem comprometer o escoamento se não forem bem isoladas.

As restrições de condutividade térmica, são dadas pela formulação do U-Value (4.11) que asseguram que as camadas do duto sanduíche propostas pelo modelo de otimização resultem no isolamento térmico desejado.

$$\frac{Q_r}{T_i - T_0} = \frac{1}{2\pi r_1 L H_1} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi K_1 L} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi K_2 L} + \frac{\ln(r_4/r_3)}{2\pi K_3 L} + \frac{\ln(r_5/r_4)}{2\pi K_4 L} + \frac{1}{2\pi r_5 L H_0} \quad (4.11)$$

$$\begin{aligned} \frac{Q_r}{T_i - T_0} = & \frac{1}{2\pi r_i L H_1} + \frac{\ln((t_1 + r_i)/r_i)}{2\pi K_1 L} + \frac{\ln((t_2 + t_1 + r_i)/(t_1 + r_i))}{2\pi K_2 L} + \\ & \frac{\ln((t_3 + t_2 + t_1 + r_i)/(t_2 + t_1 + r_i))}{2\pi K_3 L} + \frac{\ln((t_4 + t_3 + t_2 + t_1 + r_i)/(t_3 + t_2 + t_1 + r_i))}{2\pi K_4 L} + \\ & + \frac{1}{2\pi(t_4 + t_3 + t_2 + t_1 + r_i)LH_0} \end{aligned} \quad (4.11a)$$

4.3.6 Restrições de limites

Limitações de técnicas, de materiais e/ou de fabricação dos dutos sanduíches necessitam ser configuradas no modelo para que não se obtenha resultados insatisfatórios tecnicamente. Esses limites são garantidos por restrições inseridas no modelo.

As paredes dos dutos interno e externo apresentam um limite mínimo de espessura para não comprometer o projeto do duto sanduíche. Esse limite pode ser definido pela camada de oxidação do material ou pelo fato dos conectores necessitarem que os dutos apresentem uma espessura de paredes maior ou igual a que as pré-estabelecidas para a solda no conector.

$$t_i \geq t_s \quad (4.12a)$$

$$t_e \geq t_s \quad (4.12b)$$

A espessura da camada anular, que é dada pela diferença entre o raio externo do duto interno e o raio interno do duto externo, não pode ser menor que 20 mm para evitar fatores que influenciem na resistência do duto projetado. Esse parâmetro foi verificado na NBR 6118 que considera esse o tamanho mínimo para que o concreto consiga fluir entre barras de aço sem comprometer o total preenchimento da estrutura. Esse limite é garantido pela restrição (4.12c).

$$t_a \geq 20 \text{ mm} \quad (4.12c)$$

A camada de revestimento externo possui duas propriedades importantes para os dutos submarinos, o isolamento térmico e a proteção contra corrosão. A espessura desta camada influencia diretamente no isolamento térmico, mas não na proteção a corrosão. Logo, se o modelo encontra uma solução que as três primeiras camadas do duto ofereçam um isolamento térmico satisfatório, o resultado apresentará a espessura do revestimento como zero. Ou seja, o duto não teria essa camada de revestimento expondo o duto a oxidação. Com o objetivo de garantir que o modelo não elimine esta camada. Foi estabelecido uma restrição (4.12d) que garante um mínimo de espessura do revestimento do duto sanduíche.

$$t_r \geq t_{rm} \quad (4.12d)$$

4.3.7 Restrições de unicidade

As restrições de unicidade visam assegurar que o modelo só possa decidir por um material para cada camada do duto sanduíche. As equações (4.13) apresentam as restrições de unicidade o duto interno, da camada anular, do duto externo, do revestimento e dos conectores.

$$\sum_i X_i = 1 \quad (4.13a)$$

$$\sum_a X_a = 1 \quad (4.13b)$$

$$\sum_e X_e = 1 \quad (4.13c)$$

$$\sum_r X_r = 1 \quad (4.13d)$$

$$\sum_c X_c = 1 \quad (4.13e)$$

As equações (4.14) apresentam as restrições que garantem a escolha de somente uma equação para o cálculo da pressão de colapso.

$$\sum_a X_{ac} = X_{pcc} \quad (4.14a)$$

$$\sum_a X_{ap} = X_{pcp} \quad (4.14b)$$

5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Com o objetivo de compreender melhor as exigências no desenvolvimento do duto sanduiche, foram analisados individualmente a função objetivo e as principais restrições do modelo. Essas análises também são importantes para verificar se o modelo está otimizando de maneira adequada a geometria do duto sanduiche.

5.1 ANÁLISE DO MODELO

5.1.1 Análise da Função Objetivo

A função objetivo é dada pelo somatório dos custos das quatro camadas que compõem o duto sanduíche mais o custo do conector. Foi realizada uma análise do comportamento do custo total do duto sanduíche em função do aumento da espessura de cada camada. Os materiais e os custos utilizados para a análise da função objetivo foram consultados no estudo de Estefen et al [32] e estão expressos na Tabela 5.1. O custo do conector foi verificado na pesquisa de Coppini et al [33] e pode ser verificado na Tabela 5.2.

Tabela 5.1: Custos dos materiais, Estefen et al [32].

Materiais do duto	Custo (US\$/Kg)
Aço X60	0,500
Polipropileno	1,435
Fibra de PVA	2,000
Concreto	0,137
Compósito cimentício (SHCC)	0,164

Tabela 5.2: Custo do conector segundo Coppini et al [33].

Componente	Custo (US\$/Kg)
Conector	3,000

O gráfico da Figura 5.1 mostra cinco curvas com as variações do custo por milímetro de espessura das camadas. Dessas cinco curvas, 4 mostram a evolução do custo por aumento de cada camada e uma com a variação do custo com o aumento de todas as do duto.

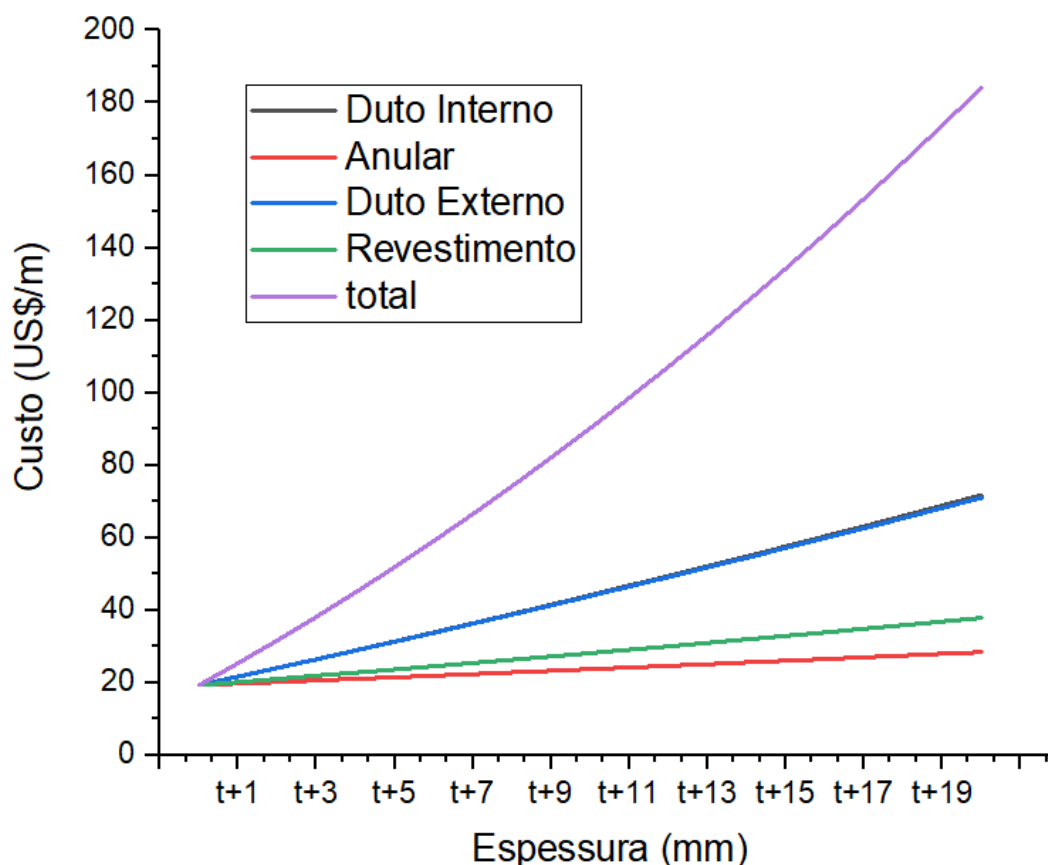


Figura 5.1: Custo x Aumento da Espessura

Como pode ser visto no gráfico, o aumento do custo é exponencial, o que é perfeitamente explicável pelo fato da função objetivo ser uma função quadrática. As curvas que apresentaram maior crescimento dos custos são as que têm os materiais com valor mais elevado. Esse comportamento comprova a principal vantagem do duto sanduíche de ser mais eficiente economicamente em relação ao duto convencional. Isto se justifica pelo fato do duto sanduíche trabalhar com materiais de menor custo. Outro aspecto interessante é a confirmação da importância das pesquisas dos materiais que podem ser aplicados no duto, principalmente na camada anular que possibilita o emprego de uma variedade de materiais.

5.1.2 Análise da Restrição à pressão de colapso

A Figura 5.2 mostra o gráfico da equação da restrição de resistência ao colapso do duto sanduiche com anulares cimentícios. O gráfico mostra a pressão de colapso do duto em função do aumento das espessuras dos dutos interno e externo. Ou seja, os dutos interno e externo apresentam a mesma espessura nessa análise.

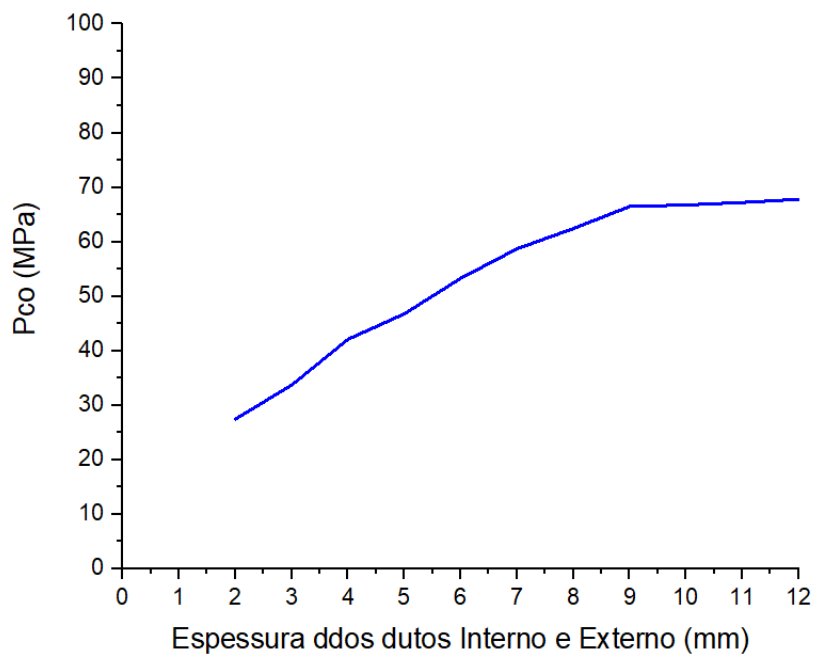


Figura 5.2: Gráfico Pco Eq. Analítica cimentícios

Da mesma forma que a figura anterior, a Figura 5.3 mostra o gráfico da equação da restrição de resistência ao colapso do duto sanduiche com anulares poliméricos. Os dutos interno e externo também apresentam a mesma espessura na análise.

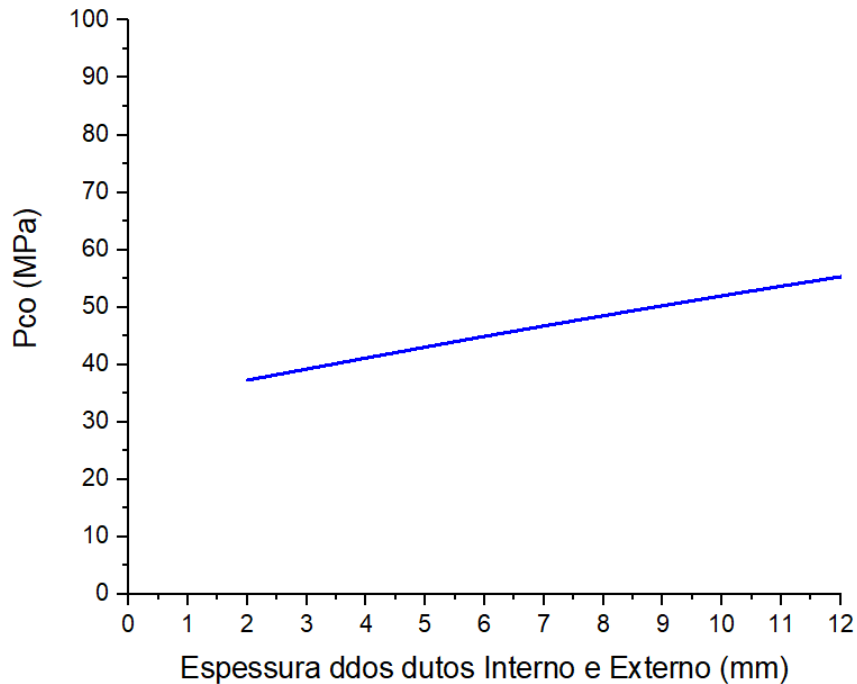


Figura 5.3: Gráfico P_{co} Eq. Analítica poliméricos

As equações de resistência ao colapso do duto sanduiche com anulares cimentícios e poliméricos atenderam ao modelo de forma limitada, pois as restrições impostas pelas relações de D/t limitam consideravelmente as variações das espessuras das camadas do duto sanduiche. Os limites de D/t são pequenos pelo fato das equações terem sido geradas por poucos valores de estes experimentais. Ou seja, quanto mais dados forem usados para gerar as equações, mais preciso ficará o modelo

5.1.3 Análise da Restrição à tração

O modelo considera que somente a camada interna e externa atuam diretamente na resistência ao escoamento, pois essas camadas usam aço como material e os diferentes tipos de aço apresentam uma rigidez muito maior que os materiais empregados na camada anular, como polímeros e cimentos.

A instalação da linha submarina impõe aos dutos grandes esforços de tração, pois o duto suporta todo o peso da linha que ainda não está apoiada no leito marinho. Logo, a

tração resultante exercida nos dutos depende da altura da lâmina d'água. Foram realizadas análises de tensão em três diferentes lâminas d'água.

Primeiramente, analisou-se a tensão exercida nas paredes interna e externa em lâmina d'água de 1.500 m. A Figura 5.4 mostra o gráfico com o comportamento da tensão em função do aumento da espessura do duto interno e externo e do aumentos das duas camadas em conjunto.

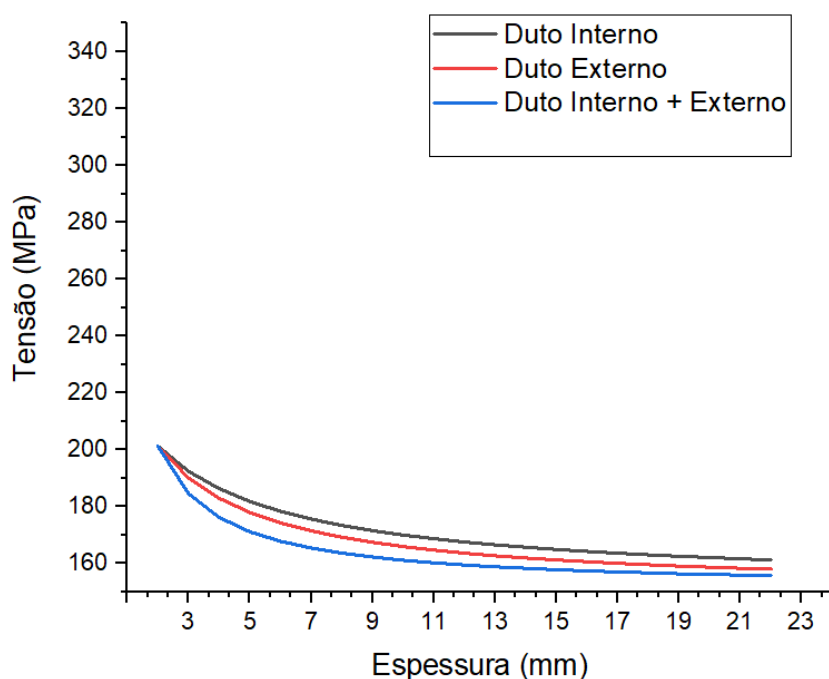


Figura 5.4: Gráfico de tensão em lâmina d'água de 1.500 m pela espessura

O gráfico mostra a diminuição da tensão conforme aumenta-se as espessuras, porém a tensão apresenta um limite. Ou seja, não adianta aumentar muito as espessuras que a tensão não será reduzida significativamente. Este limite ocorre devido aumento do peso da linha submarina com o aumento das espessuras de paredes.

Esse comportamento da tensão ocorre independente da altura da lâmina d'água, alterando apenas os valores das tensões, como pode ser visto nas Figura 5.5 e Figura 5.6 que apresentam os gráficos de tensão em função das espessuras para lâminas d'água de 2.000 e 2.500 metros respectivamente.

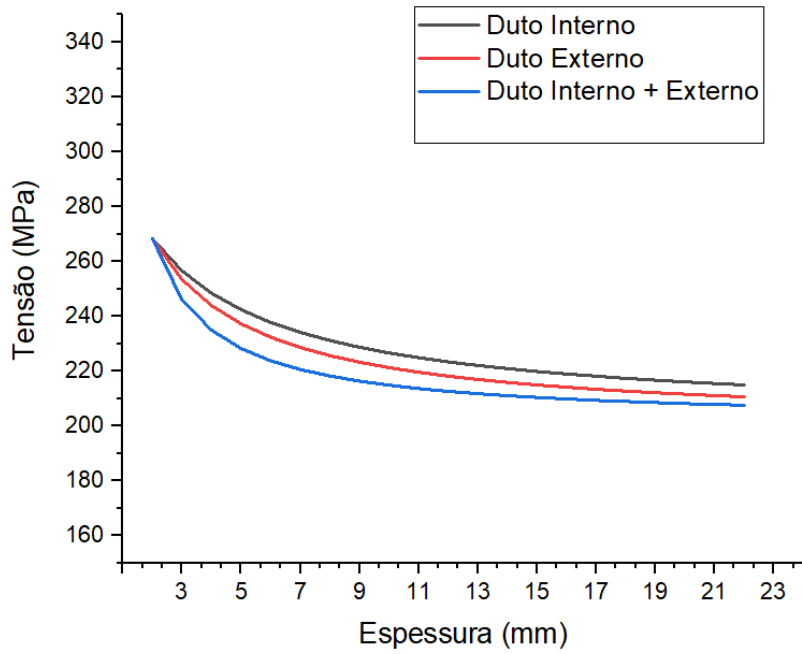


Figura 5.5: Gráfico de tensão em lâmina d'água de 2.000 m pela espessura

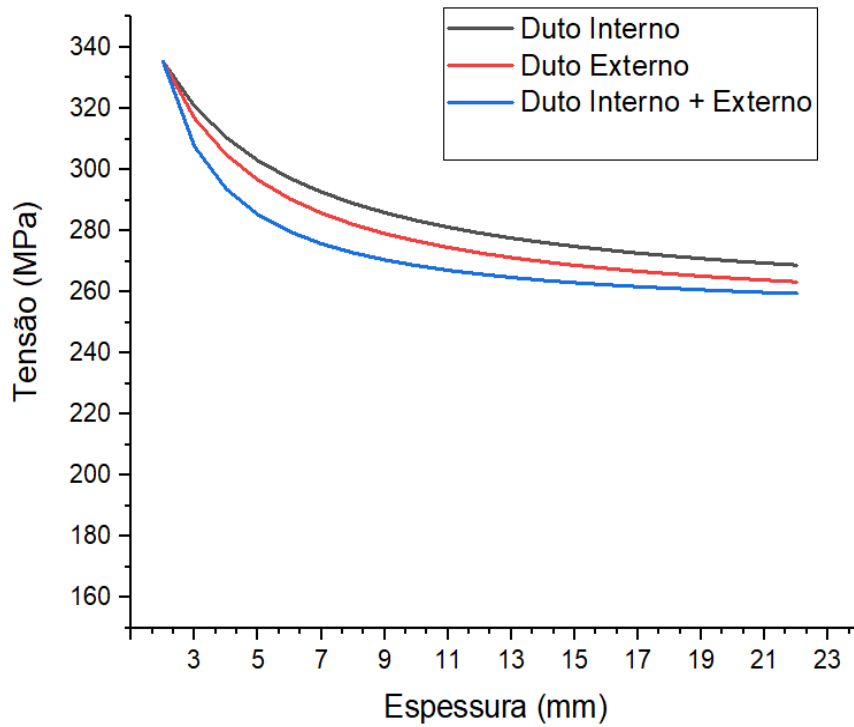


Figura 5.6: Gráfico de tensão em lâmina d'água de 2.500 m pela espessura

O gráfico da Figura 5.7 compara as tensões nas três lâminas d'água com a variação das espessuras do duto interno e externo em conjunto.

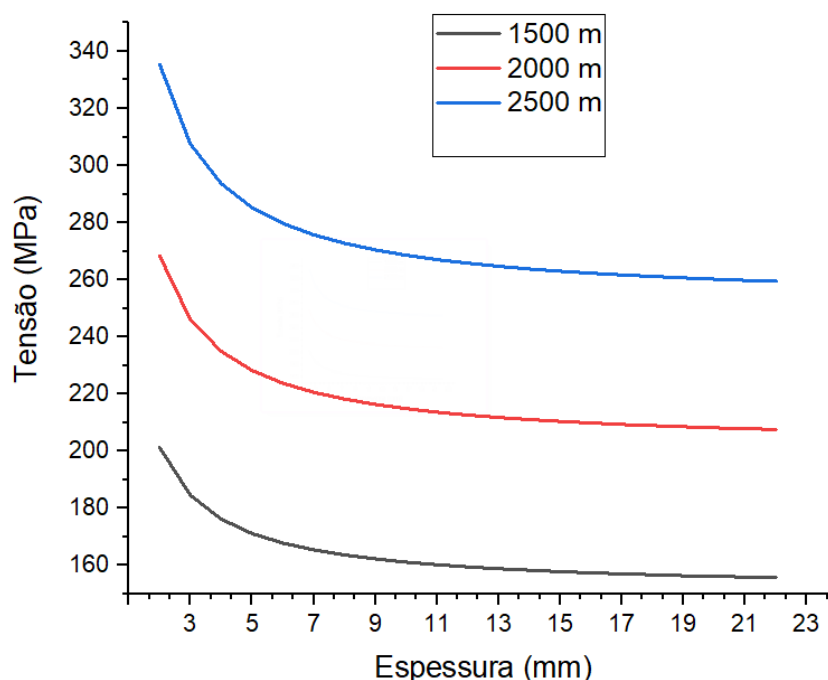


Figura 5.7: Gráfico de tensão em lâmina d'água de 1.500, 2.000 e 2.500 metros pela espessura das paredes do duto interno + externo.

Apesar das curvas apresentarem o mesmo comportamento, as tensões são bem diferentes. Os valores das tensões para lâminas d'água acima de 1.500 metros já ficam próximos a tensões de limite de escoamento de vários aços. E considerando as normas com os fatores de segurança a espessura mínima de parede pode ser definida em função da tensão do limite de escoamento do material utilizado nessas camadas.

5.1.4 Análise da Restrição de condutividade térmica

O isolamento térmico em dutos submarinos é determinante para a garantia de escoamento, pois a temperatura do fluido é bem mais alta que a do mar. Com isso, o fluido tende a perder calor por convecção e condução se não tiver um bom isolamento térmico. Foi realizada uma análise do comportamento da taxa de transferência de calor resultante

em função da espessura da camada anular com composto cimentício (SHCC), como pode ser visto no gráfico da Figura 5.8.

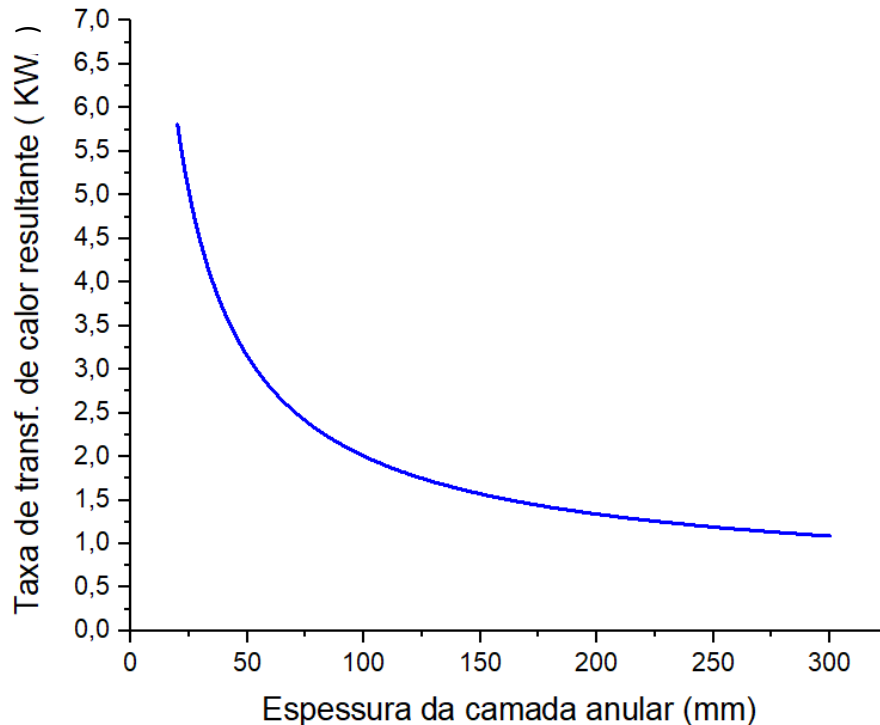


Figura 5.8: Gráfico da taxa de transferência de calor resultante em função da espessura da camada anular preenchida com SHCC

A taxa de transferência de calor resultante apresenta uma grande redução conforme aumenta-se a espessura da camada anular, até os primeiros 50 milímetros de espessura da camada anular. A partir desse ponto o comportamento da taxa se altera e passa a reduzir pouco mesmo com o grande aumento da espessura da parede. Este fato ocorre pelo fato de a área externa do duto aumentar, fazendo com que se perca muito calor por convecção.

Um parâmetro fundamental no isolamento térmico é a condutividade térmica do material. Por isso, foi realizado uma análise do comportamento da taxa de transferência de calor em função da condutividade térmica para comprovar a importância dessa característica dos materiais.

A Figura 5.9 mostra a variação da taxa de transferência de calor em função da condutividade térmica.

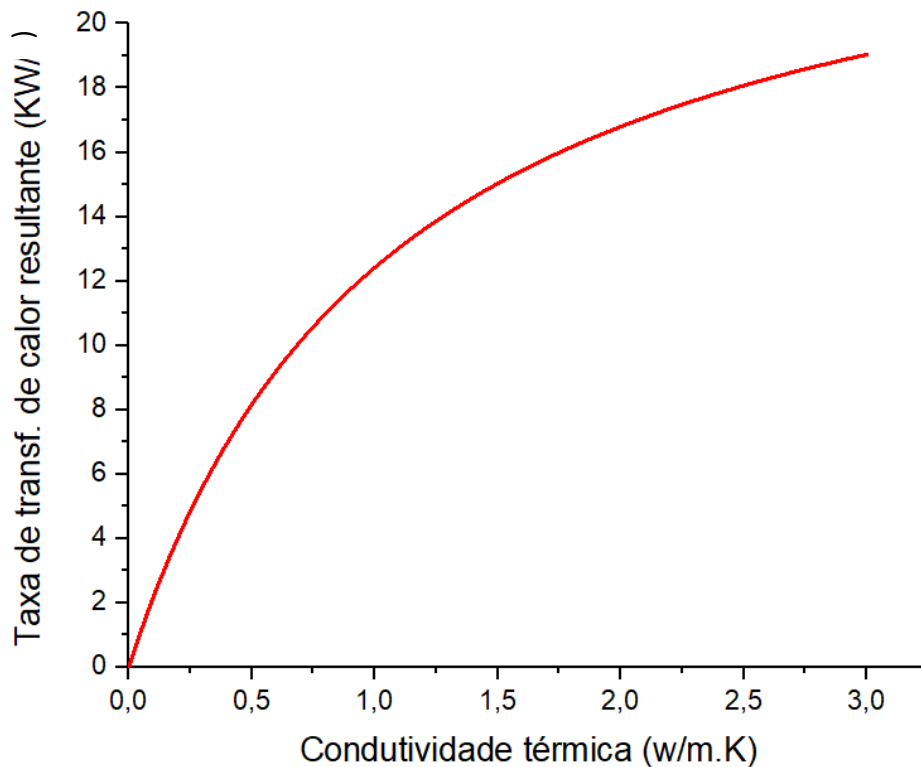


Figura 5.9:Gráfico da taxa de transf. de calor em função da condutividade térmica.

A taxa de transferência de calor resultante apresenta uma grande variação entre os materiais que possuem condutividade térmica baixas. Ou seja, uma pequena redução na condutividade térmica na camada anular resulta numa significativa redução na taxa de transferência de calor resultante.

5.2 RESULTADOS DO MODELO

Apesar das complexidades das equações do modelo, o pequeno número de variáveis permitiu que as otimizações fossem realizadas no *Solver do Microsoft Excel*. Como o modelo é composto por equações não lineares, o método de gradiente reduzido generalizado não linear foi o que apresentou melhores resultados.

No intuito observar a diferença de custo e a geometria do duto sanduiche para diferentes lâminas d'águas, foram realizadas otimizações das espessuras em três

diferentes lâminas d'água. A primeira com profundidade de 1.500 metros, a segunda com 2.000 metros e a terceira com 2.500 metros.

5.2.1 Dados de entrada

A Tabela 5.3 mostra os materiais utilizados nas três otimizações. Esses materiais foram escolhidos em função dos testes já realizados no Laboratório de tecnologia Submarina.

Tabela 5.3: Materiais utilizados no modelo

Conjuntos e índices	Materiais utilizados nas simulações
$i \in M_i$	Aço X60
$a \in M_a$	Polipropileno e SHCC
$e \in M_e$	Aço X60
$r \in M_r$	Polipropileno
$c \in M_c$	Aço X60

A Tabela 5.4 mostra os custos e as propriedades dos materiais que são necessárias para a realização das otimizações. Os custos foram obtidos no trabalho de Estefen et al [35], mas sofrem alterações quase que diariamente devido as instabilidades do mercado. O mais importante é a proporção entre os custos dos matérias, caso o modelo utilize proporções erradas, a geometria proposta tem grande risco de não ser a melhor opção no aspecto financeiro. As propriedades físicas dos materiais não sofrem alterações, mas os materiais podem ser alterados e se faz necessário a correção dessas propriedades no modelo.

Tabela 5.4: Propriedades e custo dos materiais.

Propriedades	Materiais		
	Aço X60	SHCC	Polipropileno
ρ	7.850 Kg/m ³	1473 Kg/m ³	960 Kg/m ³
P	0,50 US\$/Kg	0,164 US\$/Kg	1,435 US\$/Kg
σ	478 MPa	20,2 MPa	45 MPa
K	50 W/m.C°	0,28 W/m.C°	0,20 W/m.C°

A Tabela 5.5 mostra os diferentes parâmetros utilizados nas lâminas d'água de 1.500 metros, 2.000 metros e 2.500 metros.

Tabela 5.5: Parâmetros utilizados no modelo.

Parâmetros	Lâmina d'água		
	1.500 m	2.000 m	2.500 m
r_i	74,2 mm	74,2 mm	74,2 mm
l	5.000 m	5.000 m	5.000 m
P_{co}	22,5 MPa	30 MPa	37,5 MPa
Q_r	5,0 KW/m.°C	5,0 KW/m.°C	5,0 KW/m.°C
ρ_{ag}	1.025 Kg/m ³	1.025 Kg/m ³	1.025 Kg/m ³
T_i	80°C	80°C	80°C
T_o	4°C	4°C	4°C
H_0	6500 W/m ² .°C	6500 W/m ² .°C	6500 W/m ² .°C
H_1	370 W/m ² .°C	370 W/m ² .°C	370 W/m ² .°C
t_s	2 mm	2 mm	2 mm
t_{aMin}	20 mm	20 mm	20 mm
t_{rm}	10 mm	10 mm	10 mm

5.2.2 Resultados da função objetivo

A função objetivo foi dada pelo somatório dos custos das quatro camadas que compõem o duto sanduíche mais o custo do conector. O custo do duto sanduíche estão expressos por metro na Tabela 5.6.

Tabela 5.6: Resultados dos custos das otimizações.

Resultados	Lâmina d'água		
	1.500 m	2.000 m	2.500 m
Custo	22,76 US\$/m	22,76 US\$/m	30,78 US\$/m

Os custos obtidos pela função objetivo se mostram coerentes. Os custos dos dutos sanduíche para lâminas d'água de 1.500 e 2.000 metros apresentaram o mesmo valor pelo fato das variáveis contínuas ficarem limitadas pelos limites mínimos de projeto do duto sanduiche.

5.2.3 Resultado do material da camada anular

Os materiais disponibilizados para a camada anular nessas simulações foram o polipropileno e o composto cimentício SHCC. Os materiais selecionados pelo modelo estão apresentados na Tabela 5.7.

Tabela 5.7: Resultados dos materiais da camada anular

Resultados	Lâmina d'água		
	1.500 m	2.000 m	2.500 m
M_a	SHCC	SHCC	SHCC

O material SHCC foi selecionado para a camada anular do duto sanduíche para todas as lâminas d'água simuladas. Este resultado já era esperado devido ao custo do SHCC ser muito menor que o do polipropileno. Esse comportamento do modelo comprova a importância das pesquisas nos materiais da camada anular.

5.2.4 Resultados das variáveis contínuas

As variáveis contínuas do modelo representam as espessuras das camadas do duto sanduíche. Apesar das camadas trabalharem em conjunto, cada uma delas apresentam características específicas. Devido as especificidades de cada camada, os limites das espessuras são diferentes. Os valores das variáveis contínuas obtidos para as lâminas d'água de 1.500, 2.000 e 2.500 metros estão na Tabela 5.8.

Tabela 5.8: Resultados das variáveis contínuas

Resultados	Lâmina d'água		
	1.500 m	2.000 m	2.500 m
t_i	2 mm	2 mm	3,5 mm
t_a	21,75 mm	21,75 mm	23 mm
t_e	2 mm	2 mm	3,5 mm
t_r	10 mm	10 mm	10 mm

Os resultados das espessuras das camadas se apresentam com coerência em relação aos limites estabelecidos no modelo. As simulações para lâminas d'água de 1.500 e 2.000 metros apresentaram o mesmo resultado, ou seja, as espessuras das camadas para os dois casos têm o mesmo valor. Isto ocorre em função das variáveis contínuas ficarem limitadas pelos mesmos limites mínimos de projeto do duto sanduiche e esses atenderem as especificações propostas no modelo.

As espessuras da simulação em lâmina d'água de 2.500 metros apresentaram valores maiores para as camadas estruturais do duto, tais valores foram determinados justamente para atenderem a resistência a pressão de colapso que é mais alta nessa profundidade.

A espessura da camada de revestimento apresentou o mesmo valor para as três lâminas d'água. Isto pode ser explicado pelo alto custo do material utilizado nessa camada. O revestimento externo do duto tem a função de prover isolamento térmico ao

fluido, mas como a camada anular também apresenta a característica de isolamento térmico e possui um material de menor custo, o modelo buscou aumentar a camada anular de SHCC, que tem um custo muito menor que o polipropileno.

5.2.5 Resultados das restrições estruturais e térmica

As restrições de resistência estrutural e de isolamento térmico foram respeitadas pelo modelo nas três simulações realizadas. Essas condições, junto com os limites de projeto, que determinam a geometria do duto sanduiche. Por isso, mostra-se pertinente verificar seus resultados. A pressão de colapso é fundamental para o projeto do duto sanduiche para garantir que os dutos suportem as altas pressões dos campos de produção em águas profundas. O isolamento térmico é necessário para a garantia de escoamento do fluido. A tensão exercida no duto na instalação da linha também é outro fator que precisa ser acompanhado. Os resultados das restrições de resistência estrutural e de isolamento térmico obtidos para as lâminas d'água de 1.500, 2.000 e 2.500 metros estão na Tabela 5.9.

Tabela 5.9: Resultados de restrições estruturais e térmica.

Resultados	Lâmina d'água		
	1.500 m	2.000 m	2.500 m
P_{co}	31 MPa	31 MPa	38 MPa
Q_r	4,997 KW	4,997 KW	4,998 KW
σ	201,3 MPa	268,4 MPa	299,6 MPa

A pressão de colapso e a taxa de transferência de calor resultante obtidas para lâminas d'água de 1.500 e 2.000 metros apresentaram o mesmo valor pelo fato das variáveis contínuas ficarem limitadas pelos limites mínimos de projeto do duto sanduiche.

A pressão de colapso da simulação em lâmina d'água de 2.500 metros apresentou um valor maior para atender a resistência a pressão de colapso que é maior nessa lâmina d'água.

A taxa de transferência de calor resultante calculada pela simulação em lâmina d'água de 2.500 metros apresentou um valor um pouco maior em função do aumento da área externa do duto sanduiche.

A tensão apresentada para as três lâminas d'água apresentou valores diferentes, pois como mostrado anteriormente, essas tensões estão ligadas diretamente com o comprimento da linha não apoiada no leito marinho no momento da instalação. Ou seja, o principal fator no calculo da tensão está ligado a profundidade da lâmina d'água.

5.2.6 Tabela resumo dos resultados

A Tabela 5.10 mostra o resumo dos resultados obtidos pelo modelo para as lâminas d'água de 1.500, 2.000 e 2.500 metros.

Tabela 5.10: Tabela resumo dos resultados

Resultados	Lâmina d'água		
	1.500 m	2.000 m	2.500 m
M_a	SHCC	SHCC	SHCC
t_i	2 mm	2 mm	3,5 mm
t_a	21,75 mm	21,75 mm	23 mm
t_e	2 mm	2 mm	3,5 mm
t_r	10 mm	10 mm	10 mm
Custo	22,76 US\$/m	22,76 US\$/m	30,78 US\$/m
P_{co}	31 MPa	31 MPa	38 MPa
Q_r	4,997 KW	4,997 KW	4,998 KW
σ	201,3 MPa	268,4 MPa	299,6 MPa

5.2.7 Comparativo do duto sanduiche com duto de parede simples

Com o objetivo de demonstrar a diferença de custo do duto sanduiche calculado pelo modelo com o custo do duto de parede simples, a tabela 5.11 compara os resultados do modelo com um duto de parede simples projetado por Estefen et al [35].

Tabela 5.11: Duto sanduíche x Duto de parede simples

Tipo de duto	Parâmetros	Lâmina d'água		
		1.500 m	2.000 m	2.500 m
Duto Parede Simples	Custo	69,1 US\$/m	74,0 US\$/m	75,5 US\$/m
	P_{co}	15,9 MPa	21,2 MPa	26 MPa
Duto Sanduiche	Custo	22,76 US\$/m	22,76 US\$/m	30,78 US\$/m
	P_{co}	31 MPa	31 MPa	38 MPa

6 CONCLUSÕES

“Todas as inovações eficazes são surpreendentemente simples. Na verdade, maior elogio que uma inovação pode receber é haver quem diga: Isto é óbvio! Por que não pensei nisso antes?” - Peter Drucker

6.1 SUMÁRIO

Esse estudo teve a finalidade de criar um modelo matemático de otimização das espessuras das camadas que compõem o duto sanduiche. Esse modelo tem o objetivo de minimizar os custos e atender a todas as exigências técnicas necessárias para que o duto performe de acordo com as condições às quais será submetido.

Inicialmente, foi realizada uma ampla revisão bibliográfica de trabalhos utilizaram metodologias experimentais que muito contribuíram para o desenvolvimento do duto sanduiche. Grande parte destes trabalhos envolveram, além de testes experimentais, as simulações numéricas para a definição da pressão de colapso para diferentes materiais e situações de uso do duto sanduiche. As informações obtidas a partir destes experimentos demonstraram serviram como base de dados para a elaboração desta tese. Esses estudos demonstraram uma série de conceitos importantes como isolamento térmico, instalação de dutos e conectores para a formação das linhas submarinas. Alguns trabalhos também desenvolveram equações analíticas para o cálculo da pressão de colapso. Das equações analíticas propostas, nenhuma demonstrou uma boa abrangência de dados e variáveis necessárias para a elaboração de um modelo que conseguisse distinguir a influência das espessuras de cada camada do duto.

Diante disto, desenvolveu-se nesta tese duas equações analíticas para o cálculo da pressão de colapso: uma para dutos sanduiches com a camada anular preenchida com polímeros e, outra, para dutos que utilizam materiais cimentícios entre os dutos internos e externos. Tais equações analíticas possibilitaram o cálculo da pressão de colapso em função das espessuras e diâmetros, elaboradas a partir de uma análise adimensional

desenvolvida através de três fatores: o Teorema de Buckingham π [12]; a equação proposta por Timoshenko [31] para pressão de colapso de tubos de uma única camada; e da base de dados de testes experimentais gerada pela revisão bibliográfica.

Equações analíticas desenvolvidas, partiu-se para a elaboração do o modelo matemático de otimização das espessuras das camadas do duto sanduiche com o objetivo de minimizar o custo total em função dos diferentes materiais propostos para a composição do duto e do conector. A partir das informações técnicas dos materiais, das condições necessárias para o escoamento do fluido e imposições normativas, o modelo é capaz de realizar a otimização atendendo as exigências de resistência ao colapso, resistência à tração e de isolamento térmico impostas pelo ambiente previstos na instalação do duto.

A verificação do modelo matemático foi realizada a partir de otimizações das espessuras das camadas do duto sanduiche em três diferentes lâminas d'água. As profundidades simuladas foram 1.500, 2.000 e 2.500 metros. As otimizações foram feitas no *Solver do Microsoft Excel* com o método de gradiente reduzido generalizado não linear. O comportamento da função objetivo foi analisado, assim como o das restrições de pressão de colapso, tensão de escoamento e isolamento térmico. Os resultados das variáveis contínuas que determinam as espessuras das camadas e a escolha do material para a camada anular também foram verificados.

6.2 CONCLUSÕES

As equações analíticas desenvolvidas para o cálculo da pressão de colapso em função das espessuras através de uma análise adimensional obtiveram bons resultados quando as relações de diâmetro e espessura estão dentro do mesmo intervalo dessas mesmas relações dos modelos que geraram os dados utilizados no desenvolvimento das equações. Porém, a equação de resistência ao colapso deve ser muito bem estudada, pois é de extrema complexidade e possui particularidades em função dos materiais e das variáveis utilizadas.

A função objetivo do modelo matemático demonstra resultados coerentes. Os custos dos dutos sanduíche apresentam um aumento exponencial quando se aumentam as

espessuras das camadas. Isto foi explicado pelo fato de a função objetivo ser uma função quadrática. As camadas que ocasionaram maior crescimento dos custos foram as que tinham os materiais com valor mais elevado. Esse comportamento comprovou a principal vantagem do duto sanduíche de ser mais eficiente economicamente em relação ao duto convencional. Outro aspecto interessante é a confirmação da importância das pesquisas dos materiais que podem ser aplicados no duto, principalmente na camada anular que possibilita o emprego de uma variedade grande de materiais.

A metodologia para a escolha do material funciona de forma adequada. Isto foi comprovado pelas simulações que selecionaram o SHCC para a camada anular do duto sanduíche para todas as lâminas d'água simuladas. Este resultado mostra que o SHCC, além de possuir ótimas características físicas para o duto sanduíche, tem grande vantagem no aspecto econômico por ter um custo muito menor que o do polipropileno.

Os resultados das espessuras das camadas apresentaram coerência em relação aos limites estabelecidos no modelo, o que comprova que a utilização das espessuras das camadas como variáveis é uma boa opção para a determinação da geometria do duto sanduíche. Nas simulações notou-se que as espessuras podem ser limitadas pelos limites mínimos de projeto do duto sanduíche, o que demonstra a necessidade de estudos nessas especificações de projeto.

A camada de revestimento externo, de acordo com o modelo, não é a alternativa mais econômica para o isolamento térmico do duto sanduíche, pois, a camada anular pode ser constituída por um material com menor custo, com isolamento térmico.

A pressão de colapso é determinante para a definição das espessuras das camadas estruturais do duto sanduíche para grandes profundidades, assim como, a taxa de transferência de calor resultante também influencia fortemente na espessura da camada anular. Em outras palavras, uma ótima definição das espessuras das camadas do duto sanduíche proporciona ganhos técnicos e financeiros.

A tensão gerada no duto pela tração da linha submarina no processo de instalação oferece grande risco de integridade do duto sanduíche, pois o alto peso da parte da linha que não está apoiada no leito marinho é suportado apenas pelas paredes internas e externas do duto. Quando do desenvolvimento do duto, este aspecto deve ser muito bem estudado para que não seja um limitante.

A metodologia de otimização das espessuras do duto sanduiche para minimizar os custos mostrou-se como ferramenta eficaz na obtenção de geometrias de dutos sanduiche em fases iniciais do projeto. Outra aplicabilidade interessante é a utilização do modelo para a seleção de materiais, proporcionando análises rápidas antes da realização dos testes experimentais.

Portanto, a utilização do modelo matemático de otimização no desenvolvimento de dutos sanduíches é de grande importância para a redução de custos e, conseqüentemente, na viabilidade financeira dos projetos de exportação de petróleo. Deste modo, esse estudo demonstra uma significativa contribuição para a produção de petróleo em águas ultra profundas.

6.3 TRABALHOS FUTUROS

O estudo da equação analítica de pressão de colapso do duto sanduiche pode ser prosseguido por um aumento da base de dados experimentais e simulações numéricas para uma maior amplitude de atuação das equações analíticas. Também mostra-se interessante estudos sobre outros fatores além dos estudados nesta tese que influenciam na pressão de colapso, como exemplo a ovalização do duto sanduiche.

Outra linha de trabalho seria a realização de mais pesquisas com compósitos cimentícios que possam apresentar características mais pertinentes ao duto sanduiche, pois, como visto nessa tese, pequenos ganhos na condutividade térmica no material da camada anular ocasionam resultados consideráveis no isolamento térmico.

Pesquisas sobre a resistência a tração do duto sanduiche com testes experimentais também se mostram necessárias, uma vez que a instalação de dutos em águas profundas gera grande tensão sobre as camadas interna e externa do duto sanduiche.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Oliveira, Marcos. Novos desafios marinhos. Pesquisa FAPESP, Principais campos e gasodutos nas bacias de Campos e Santos. Outubro 2008. Disponível em <<https://tecnoblog.net/247956/referencia-site-abnt-artigos/>>.
- [2] Grealish, F., Roddy, I., “State-Of-The-Art on Deep Water Thermal Insulation Systems”. 20th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Proceedings of OMAE’00. Seattle, U.S.A., 2000.
- [3] De Lima JR, D. B., Análise comparativa entre dutos sanduíche e outros sistemas submarinos de transporte de fluidos. – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2015.
- [4] Souza, A. R., Netto, T.A., Pasqualino, I.P., “Materiais Poliméricos para Dutos Sanduíche Aplicados em Águas Ultra-Profundas.”. 4º PDPETRO, Campinas, SP, 2007.
- [5] Chen, An, Estefen SF "Collapse And Buckle Propagation Of Sandwich Pipes: A Review", International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering; 2015.
- [6] V.C. Li, in: E. Nawy (Ed.). Book Chapter in Concrete Construction Engineering Handbook, in print, CRC Press, 2008.
- [7] Paz, C. M., Influência do Método Carretel de Lançamento na Resistência Estrutural de Dutos Sanduíche com Núcleo de Compósitos Cimentícios (SHCC) – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2015.
- [8] Chen, An, "Colapso de Dutos Sanduíches com núcleo de compostos cimentícios reforçados com fibras de PVA sob pressão hidrostática", Tese de Doutorado, UFRJ, Rio de Janeiro, 2012.
- [9] Pasqualino, I.P., Pinheiro, B.C. and Estefen, S.F., 2002, “Comparative Structural Analyses Between Sandwich and Steel. Pipelines for Ultra-Deep Water”, 21st International Conference On Offshore Mechanics and Arctic Engineering, June 23-28, Oslo, Norway.

- [10] Netto, T.A., Santos, J.M.C. and Estefen, S.F., 2002, "Sandwich Pipes For Ultra-Deep Waters", Proceedings on 4th. International Pipeline Conference, Calgary, Canada.
- [11] Arjomandi K, Taheri F. Elastic buckling capacity of bonded and unbonded sandwich pipes under external hydrostatic pressure. *Journal of Mechanics of Materials and Structure*; 2009
- [12] 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.
- [13] Timoshenko, S. " *Strength of Materials. Part I - Elementary Theory and Problems.*" New York, USA: Lancaster Press, Inc. 1948.
- [14] Castello, Xavier, "Influência a adesão entre as camadas na resistência ao colapso de dutos sanduíche", Tese de Doutorado, UFRJ, Rio de Janeiro, 2011.
- [15] Da Silva, L. M., "Desenvolvimento de formulação para a pressão de colapso de dutos sanduíche com material anular cimentício – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2016.
- [16] Silva, S.L., " *Influência do Método Carretel de Lançamento na Pressão de Colapso de Dutos Rígidos para Águas Profundas*". Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) - COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro. Brasil. 2003.
- [17] Jensen, G.A. " *Offshore Pipelaying Dynamics*". Tese de doutorado - Norwegian University of Science and Technology (Department of Engineering Cybernetics). Noruega. 2010.
- [18] Estefen, S.F. " *Collapse behaviour of intact and damaged deepwater pipelines and the influence of the reeling method of installation*". *Journal of Constructional Steel Research* - 50 (1999) 99–114.
- [19] Buijvoets, J. " *Offshore O-lay pipe laying*". 6th Pipeline Technology Conference. Hannover. Alemanha. 2011.

- [20] Souza, D.M., “*Análise dos Métodos de Lançamento de Dutos Rígidos para Diferentes Profundidades*”. Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) - Departamento de Engenharia Naval e Oceânica. Rio de Janeiro. Brasil. 2006.
- [21] Párraga Q., “Projeto e análise de conexão roscada para dutos sanduíche” – Rio de Janeiro: UFRJ/ COPPE, 2016.
- [22] Brooke, Anthony; Kendrick, David; Meeraus, Alexander. GAMS – Sistema Geral de Modelagem Algébrica. São Paulo, Edgard Blucher Ltda, 1997.
- [23] LJ Corrar, CR THEÓPHILO - São Paulo: Atlas, 2004
- [24] WISTON, Wayne; ALBRIGHT, S. Christian. Practical Management Science. 2nd, Duxbury Thomson Learning, 2001.
- [25] HAFNER, A. V. Conservação e reúso de água em edificações – experiências nacionais e internacionais. Rio de Janeiro, 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programas de Pós-Graduação de Engenharia, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- [26] Gupta, O. K. and Ravindran, A. (1985). Branch and bound experiments in convex nonlinear integer programming. *Management Science*, Vol. 31.
- [27] Geoffrion, A. M. 1972. Generalized Benders decomposition, *Journal of Optimization Theory and Applications*.
- [28] P. Bonami, G. Cornuejols, A. Lodi, and F. Margot. A feasibility pump for mixed integer nonlinear programs. *Mathematical Programming A*, 2009.
- [29] Jeroslow, R.G. There cannot be any algorithm for integer programming with quadratic constraints. *Operations Research* 21:1, 1973
- [30] Bertsimas, D., Sims, M. (2004) The price of robustness, *Operations Research*. 52, 35-53.
- [31] SOYSTER, A. L. Convex programming with set-inclusive constraints and applications to inexact linear programming. *Operations Research*, v. 21, n. 1, p. 1154-1157, 1973. <http://dx.doi.org/10.1287/opre.21.5.1154>

- [32] Sacoman M. A. Otimização de projetos utilizando grg, solver e excel, COBENGE, 2012..
- [33] Gomes, F. M. Estudo comparativo entre os métodos gradiente reduzido generalizado e algoritmo genético em otimização com múltiplas respostas. Research Gate. 2017. Disponível: <https://producaoonline.org.br/rpo/article/view/2566/1540>>.
- [34] Castilho, J.F.M., "Estudo Numérico e Experimental da Pressão de Colapso de dutos Sanduíche Danificados. Rio de janeiro: UFRJ/COPPE, 2013.
- [35] Estefen S. F., Lourenço M. I., Feng J., Paz C. M., De Lima D. B. "Sandwich pipe for long distance pipelines: flow assurance and costs", OMAE. 2016
- [36] Coppini, N.L., Carvalho, A.A. "Proposta De Modelo De Formação De Preço Baseada No Conceito De Margem De Contribuição". Artigo - UNIMEP. São Paulo.2012.