

ANÁLISE EXPERIMENTAL DE COLAPSO DE DUTOS METAL- COMPÓSITO SOB PRESSÃO EXTERNA

Anna Carolinna Carrano Henriques Porto

PROJETO FINAL SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE ENGENHARIA DO PETRÓLEO DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE INTEGRANTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO DO PETRÓLEO.

Aprovado por:

**Professor Ilson Paranhos Pasqualino
(Orientador)**

**Professor Theodoro Antoun Netto
(Co-orientador)**

Professor Fernando Luiz Bastian

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

AGOSTO, 2009

Dedico este trabalho a minha família: meu pai William, minha mãe Eveline, minha querida irmã Ariana, Diego Rodrigues, Pepita e em especial ao meu Tio Joaquim que sempre estará em meu coração e em minha memória.

Agradecimentos

Inicialmente, ao meu orientador, Professor Ilson Pasqualino pelo apoio, paciência e orientação ao longo de mais de dois anos de trabalho. Agradeço ao meu co-orientador Theodoro Antoun Netto, pela confiança a mim creditada para a realização deste projeto e pelos conselhos que sempre levarei comigo na minha vida profissional.

A UFRJ pela minha formação e conhecimento.

A Agência Nacional do Petróleo (ANP) pelo suporte financeiro durante quatro anos de pesquisa com o PRH-35.

A secretária do PRH-35 Cássia Monteiro.

Ao suporte técnico dos funcionários do LTS (Laboratório de Tecnologia Submarina) no desenvolvimento da parte experimental deste projeto. Menção honrosa citar os nomes de Antônio Róbson II, Reinaldo, João Fabrício, Juseverck, Edgar e Bruno pela dedicação e qualidade dos testes experimentais.

Em especial, agradeço ao Robson, que com sua dedicação indiscutível garantiu que os resultados de nossas laminações e experimentos nesses dois anos fossem excelentes.

Sumário

Nomenclatura	vi
Lista de Figuras	vii
Lista de Tabelas	viii
Resumo	ix
Abstract	x
1. Introdução	1
1.1. Objetivo	1
1.2. Metodologia	2
1.3. Resultados Esperados	2
2. Referências Bibliográficas	3
2.1. Flowlines, Risers e Pipelines.....	3
2.2. Dutos Rígidos	4
2.2.1. O Conceito Metal-Compósito	5
2.2.2. Aplicação	7
2.3. Pressão de Colapso	7
2.4. Instalação	8
2.4.1 Método S-Lay.....	8
2.4.2 Método J-Lay.....	11
2.4.3 Método Reel-Lay.....	13
2.4.4 Método de Arraste Controlado	15
3. Análise Experimental	16
3.1. Fabricação de Modelos	16
3.2. Medição	24
3.3. Testes de Material	27

3.3.1.	Teste de Tração.....	27
3.3.2.	Teste de Compressão.....	31
3.4.	Teste de Colapso	36
4.	Conclusão	45

Nomenclatura

t_o	Espessura Inicial	[mm]
D_{om}	Diâmetro Médio Inicial	[mm]
Δ_o	Ovalização Inicial	[%]
Ξ_o	Excentricidade Inicial	[%]
D_{fm}	Diâmetro Médio Final	[mm]
Δ_F	Ovalização Inicial	[%]
t_c	Espessura do Compósito	[mm]
σ_r	Tensão Limite de Ruptura.....	[MPa]
ϵ_r	Deformação Axial Limite de Ruptura	[mm/mm]
E	Módulo de Elasticidade	[MPa]
$\% F$	Porcentagem de Fibra	[%]
P_T	Peso Total da Amostra	[g]
P_F	Peso da Fibra	[g]
D_{max}	Diâmetro Máximo	[mm]
D_{min}	Diâmetro Mínimo	[mm]
t_{max}	Espessura Máxima	[mm]
t_{min}	Espessura Mínima	[mm]
P_c	Pressão de Colapso do Compósito	[psi]
P	Pressão de Colapso do Tubo de Alumínio	[psi]

Lista de Figuras

- Figura 1: Esquema de flowlines em um leito marinho
- Figura 2: Riser em catenária
- Figura 3: Método S-lay
- Figura 4: Método J-lay
- Figura 5: Lançamento utilizando o método Reel-Lay
- Figura 6: Método de arraste controlado
- Figura 7: Aplicação da graxa sobre o tubo mapeado
- Figura 8: Aplicação da manta de fibra de vidro bidirecional.
- Figura 9: Aplicação da resina epóxi sobre a manta
- Figura 10: Tubo laminado pronto para receber as camadas.
- Figura 11: Aplicação do Peel Ply
- Figura 12: Aplicação do Acrylon
- Figura 13: Aplicação do Plástico Perfurado
- Figura 14: Aplicação do Plástico Bolha.
- Figura 15: Aplicação do Vácuo.
- Figura 16: Bomba de Vácuo.
- Figura 17: Tubo laminado pronto após aplicação do Vácuo.
- Figura 18: curva de tensão versus deformação nominal do alumínio
- Figura 19: Tubo B laminado e Mapeado
- Figura 20: Modelo do Corpo de Prova para o teste de Tração (Modelo CP01)
- Figura 21: Teste de Tração - espessura 1.2mm com % de vidro
- Figura 22: Teste de Tração - espessura 2.4mm com % de vidro
- Figura 23: Teste de Compressão
- Figura 24: Detalhe do Teste de Compressão
- Figura 25: Corpos de Prova para o teste de Compressão
- Figura 26 Resultado de Teste de Compressão para Corpos de Prova na direção Y.
- Figura 27 Resultado de Teste de Compressão para Corpos de Prova na direção X.
- Figura 28 Extremidade do tubo B selada
- Figura 29: Câmara Hiperbárica
- Figura 30: Esquema da Vista lateral da Câmara Hiperbárica
- Figura 31: Modo de falha do tipo U devido à ausência de proteção externa.
- Figura 32: Seção transversal colapsada do tubo laminado
- Figura 33: Configuração dos tubos colapsados
- Figura 34: Resultado do Teste de Colapso
- Figura 35: Gráfico de P_c / P versus t_c/t

Lista de Tabelas

Tabela 1: Parâmetros geométricos dos modelos (Espessuras e Diâmetros Médios).

Tabela 2: Parâmetros geométricos dos modelos (Ovalização e Excentricidade).

Tabela 3: Dados experimentais do corpo de prova com espessura de 1.2 mm

Tabela 4: Dados experimentais do corpo de prova com espessura de 2.4 mm

Tabela 5: Dados experimentais dos Corpos de Prova na Direção Y

Tabela 6: Dados experimentais dos Corpos de Prova na Direção X

Tabela 7: Dados experimentais dos tubos

Tabela 8: Dados experimentais complementares dos tubos

Resumo

Este projeto foi realizado com o objetivo de desenvolver um estudo experimental da concepção de dutos metal-compósito para aplicações como flowlines em águas ultraprofundas, onde são necessárias características como isolamento térmico, redução do peso, resistência estrutural e resistência à corrosão.

Neste compósito, a matriz escolhida é a resina epóxi de cura lenta e o reforço é a fibra de vidro. Esta matriz irá manter as fibras posicionadas corretamente e irá garantir a estanquidade do tubo, enquanto o reforço garante ao tubo uma resistência mecânica adicional.

Ao longo do projeto, seis modelos reduzidos foram laminados através do processo de vacuum-bag, usando o tubo de alumínio na parte interna e o compósito a base de fibra de vidro bidirecional com resina epóxi na camada externa.

Utilizou-se unicamente a condição de não aderência entre o tubo de alumínio e a camada de compósito. Para isso foi aplicada graxa de silicone na superfície do tubo de alumínio antes da laminação. Essas amostras foram testadas sob carregamento de pressão hidrostática numa câmara hiperbárica.

Além dos modelos reduzidos, foram fabricados corpos de prova a partir de placas retangulares para realização dos testes de tração e de compressão do compósito.

Palavras-chave: Engenharia do Petróleo, Metal-Compósito, Fibra de Vidro e Flowlines.

Abstract

This project was executed with the objective of developing an experimental study of the metal-composite pipe design for applications as flowlines in deep waters, where it is necessary features such as insulation, the weight reducing, structural strength and corrosion resistance.

The composite studied is formed by epoxy resin as the matrix that will ensure the waterproofness of the pipe and the proper positioning of the fibers; and the reinforcement is fiberglass that provides to the composite the mechanical strength required.

Throughout the project, six small scale models were laminated through the vacuum-bag process, using aluminum for the inner pipe and composite of fiberglass with epoxy resin material for the external layer.

It was only used the condition of no adhesion between the aluminum pipe and the composite layer, so a silicone grease was applied on the surface of the aluminum pipe before the lamination process. These samples were tested under hydrostatic pressure in a hyperbaric chamber.

Besides the small scale models, test coupons were fabricated from rectangular plates to perform tensile and compression tests of the composite.

Keywords: Petroleum Engineering, Metal Composite, Fiberglass, Flowlines.

1. Introdução

A crescente evolução da indústria de Petróleo no Brasil e no mundo, devido à descoberta de novos reservatórios em lâminas de água cada vez mais profundas, aumenta a demanda por novas tecnologias que se tornam essenciais para continuidade da exploração e produção de petróleo e gás.

Neste contexto, o projeto desenvolvido possui extrema importância para o mercado, uma vez que a concepção de dutos rígidos irá viabilizar a utilização em águas profundas, pois além deste modelo de dutos possuírem menor custo quando comparados a dutos flexíveis apresentam menor peso e com a inclusão da camada de compósito oferecem maior estanquidade e resistência estrutural adicional.

O projeto abrange o estudo da pressão de colapso em dutos rígidos de metal-compósito, além dos testes de tração e compressão de espécimes do compósito. O compósito foi produzido pela laminação através do processo de vacuum bag, a fibra utilizada é a woven roving com a resina epóxi de cura lenta.

1.1. Objetivo

O objetivo deste trabalho consiste em desenvolver um estudo experimental da concepção metal-compósito para aplicações em águas profundas, no qual são exigidos requisitos como isolamento térmico, estanquidade, redução do peso e resistência estrutural.

Foram laminados seis modelos reduzidos através do processo de vacuum-bag com o objetivo de serem testados em um câmara hiperbárica para obtenção das pressões de colapso. Os espécimes foram testados sob carregamento de pressão hidrostática.

Testes de tração e de compressão foram realizados para caracterizar as propriedades mecânicas do compósito através de corpos de prova fabricados a partir de placas adicionais do compósito.

1.2. Metodologia

Neste trabalho o desempenho estrutural desta nova concepção foi avaliado a partir de testes experimentais com base na pressão de colapso, utilizando modelos em escala reduzida. Foram realizados testes de tração e de compressão para obtenção das propriedades mecânica do compósito.

1.3. Resultados Esperados

Com o teste de colapso realizado em seis amostras, é esperado obter a pressão de colapso experimental dos modelos reduzidos e assim desenvolver um estudo buscando a relação entre as propriedades: espessura da camada de compósito, porcentagem de fibra do compósito, ovalização e excentricidade do tubo de alumínio com a pressão de colapso obtida no final do teste.

No teste de compressão e no teste de tração são obtidos como resultado os gráficos de deformação axial versus tensão de compressão e de tração respectivamente, a partir da análise destes gráficos é possível definir as propriedades mecânicas do compósito, como por exemplo, o módulo de elasticidade que determina resistência deste material.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Flowlines, Risers e Pipelines

O transporte do fluido produzido desde a árvore de natal até a unidade de processamento na superfície do mar é realizado primeiramente através de flowlines, que são definidos como linhas de transferência de fluidos entre os componentes submarinos, sendo dutos submarinos horizontais, que por ficarem apoiados sobre o leito marinho, são considerados a parte estática deste transporte. Os flowlines são utilizados em casos quando os poços não se encontram diretamente abaixo da unidade de produção.

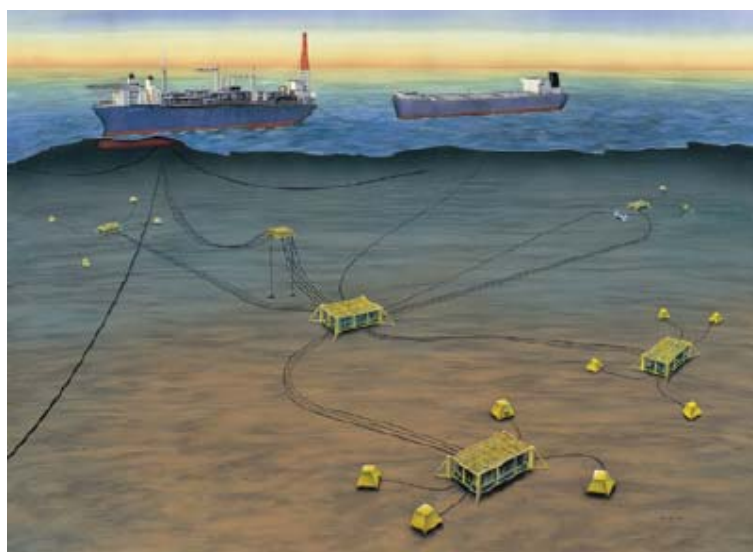


Figura 1: Esquema de flowlines em um leito marinho

Em seguida, o flowline é conectado a um manifold. O manifold é definido como um conjunto de tubos, válvulas e instrumentos de monitoração montados sobre uma estrutura metálica, que interliga o escoamento de vários poços com a unidade de produção, funcionando como um “coletor”, sendo considerado como o equipamento intermediário entre os flowlines e os risers.

Os risers são dutos posicionados na vertical ou em catenária, esses dutos são montados geralmente na forma de catenária simples com a extremidade inferior apoiada no fundo do mar e a superior tracionada na unidade flutuante. Os risers são responsáveis pela condução do óleo até a plataforma.

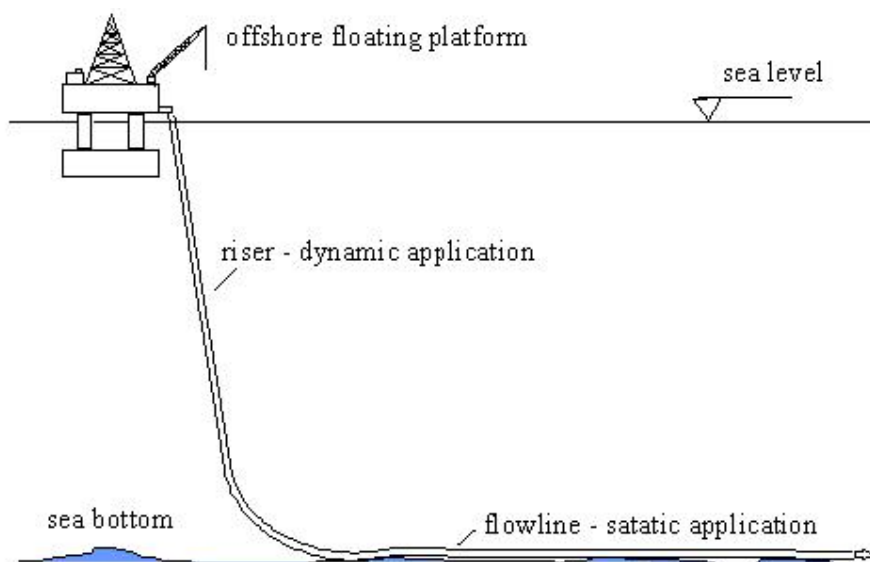


Figura 2: Riser em catenária

O transporte do óleo produzido desde a plataforma até a costa pode ser feito por navios de exportação ou por pipelines, esses dutos também se encontram apoiados sobre o fundo do mar e podem cobrir longas distâncias. Em alguns casos, o pipeline é utilizado na interligação entre plataformas produtoras ou para o escoamento de hidrocarbonetos desde o poço até a costa continental, este esquema é adotado para viabilizar economicamente a produção deste tipo de poço, que caso fossem utilizadas plataformas, não poderiam ser desenvolvidos.

Dutos submarinos de aço podem ser fabricados sem costura, por extrusão, ou com costura utilizando-se chapas calandradas na forma cilíndrica, configurando uma flexão plástica na direção circunferencial.

2.2. Dutos Rígidos

Diferenças entre as concepções de dutos rígidos e flexíveis ocorrem em relação aos sistemas de conexão, os métodos de instalação, a flexibilidade de mudanças, a resistência estrutural e resistência à Fadiga.

O duto flexível teve a sua estrutura inicialmente proposta pelo Instituto Francês de Petróleo (IFP) em 1960, esta concepção foi introduzida pela primeira vez no mercado em 1972 e até o ano de 1991 foram instalados cerca de 2 300 km destes dutos em todo o mundo.

A empresa de petróleo PETROBRAS atualmente é a maior usuária desta concepção em todo o mundo, possuindo cerca de 2 100 km de dutos de aplicação offshore, instalados nos campos produtores nacionais (Porciúncula et al.).

A estrutura de um duto flexível pode variar de acordo com o fabricante e a finalidade de sua utilização, mas ela é basicamente composta de camadas de aço enroladas helicoidalmente e de camadas homogêneas de termoplásticos com diferentes geometria e materiais. A camada interna de termoplástico garante que o fluido transportado (óleo bruto, gás e água) não vaze, ao passo que a externa oferece proteção contra corrosão, abrasão e proteção mecânica. As camadas helicoidais de aço provêm a resistência mecânica. Os dutos flexíveis podem ser classificados em não-aderentes (unbonded) e aderentes (bonded).

O duto metal-compósito é composto por um duto metálico reforçado por uma camada externa de material compósito. Esta concepção apresenta uma elevada pressão de colapso e constitui numa opção de peso reduzido e pequena espessura de parede para a aplicação em águas profundas e ultraprofundas.

2.2.1. O conceito metal-compósito

Os compósitos podem ser definidos como materiais formados por dois ou mais constituintes com distintas composições, estruturas e propriedades, que estão separados por uma interface. Alguns exemplos são metais e polímeros, metais e cerâmicas ou polímeros e cerâmicas.

A criação de compósitos possui como finalidade alcançar a produção de um único dispositivo com propriedades superiores às dos componentes unitários, através da combinação de diferentes materiais.

Algumas vantagens que os compósitos podem apresentar dependendo de como são feitos são alta resistência e rigidez, longa vida a fadiga, baixa densidade, boa adaptabilidade às funções requeridas, resistência a corrosão, ao desgaste, estabilidade térmica, isolamento térmico e elétrico, estanquidade, condutividade térmica e considerável redução de peso.

Os materiais que compõem um compósito são classificados em dois tipos: matriz e reforço. A matriz é o componente que confere estrutura ao material compósito, preenchendo os espaços vazios que ficam entre o reforço e mantendo-o em sua posição relativa.

O reforço, por sua vez, é o que realça as propriedades mecânicas, eletromagnéticas ou químicas do material compósito como um todo. A sinergia entre

matriz e reforço resulta na criação de um material compósito final que apresenta propriedades não existentes nos materiais originais.

Neste projeto a matriz escolhida é a resina epóxi e o reforço é a fibra de vidro. Esta matriz irá manter as fibras posicionadas corretamente e irá garantir a estanquidade do tubo. Caso não houvesse matriz, as fibras quebrariam devido a esforços de compressão ou de tração. A matriz confere a este compósito, propriedades como leveza, fácil processamento, resistência à corrosão, resistência ao impacto e isolamento elétrico.

A resina epóxi é um polímero termorrígido que apresenta ligações cruzadas, no qual as cadeias de sua composição travam umas as outras, aferindo a esta matriz maior resistência. Esta matriz não possui fase plástica, como isso sofre deformação elástica até romper, o mesmo ocorre para a fibra de vidro.

Os polímeros termorrígidos não se fundem naturalmente, não podem ser dissolvidos e se degradam com o tempo, porém em comparação com o polímero termoplástico, os termorrígidos suportam maior temperatura e possuem maior resistência.

As fibras são definidas como um corpo flexível e cilíndrico com elevada razão comprimento/diâmetro e é composta principalmente por moléculas lineares orientadas. O segredo da fibra quando esta está íntegra é o seu diâmetro, pois quanto menor for o diâmetro do material, menor serão os defeitos internos e maior será a resistência estrutural, sendo assim como as fibras comerciais possuem um diâmetro muito pequeno, em torno de 12 μm , elas não possuem defeitos internos.

Na fabricação do compósito, a fibra perde parte de sua resistência, assim quanto maior for a porcentagem de fibra no compósito, maior será a resistência estrutural deste material. Além disso, uma fibra não pode ficar encostada em outra fibra, o que ocasionaria em perda de resistência, para isso, a laminação deve ser feita corretamente, respeitando a proporção de fibra e de matriz.

A orientação das fibras é de fundamental importância na performance do duto metal-compósito, pois as fibras só conferem resistência em única direção, assim neste trabalho foi escolhido o uso da manta de fibra de vidro bidirecional, na qual metade das fibras é orientada na direção circunferencial do tubo e a outra metade na direção longitudinal para garantir melhor resistência estrutural em todas as direções.

A ligação entre a fibra que é um material inorgânico e a resina epóxi que é um material orgânico é do tipo covalente que é uma ligação fraca. Assim para melhorar a aderência entre esses dois materiais é adicionado Silano (Si) que promove o acoplamento da fibra com a matriz. Atualmente, grande parte das mantas de fibra de vidro vendida comercialmente já apresenta silano em sua composição.

2.2.2. Aplicação

O ritmo de desenvolvimento de materiais modernos nunca foi tão intenso quanto ao observado nas últimas duas décadas. Assim Engenheiros e Designers estão sendo confrontados com exigências para criação de equipamentos que apresentem maiores qualificações com o objetivo de atender as especificações cada vez mais rigorosas, e este quadro atual tem gerado excelentes desafios para metalúrgicos e tecnólogos para desenvolverem materiais com alto desempenho.

Durante os últimos 20 anos, foi observado um substancial desenvolvimento de compósitos para aplicações estruturais. A principal motivação desta grande evolução foi à possibilidade de se produzir compósitos com altas propriedades mecânicas e baixas densidades que potencialmente poderiam substituir materiais usualmente utilizados, como por exemplo, o aço e madeira. A combinação de polímeros de alto desempenho com fibras cerâmicas ou poliméricas de alto módulo elástico e resistência mecânica, permitiu a produção de novos compósitos com um grupo de propriedades específicas (por unidade de peso) superiores ao aço, alumínio e outros. Esses compósitos apresentam em geral altas razões módulo/peso e resistência/peso superiores à de materiais cerâmicos, poliméricos e metálicos.

2.2.3. Pressão de Colapso

No Brasil, a maior parte produção nacional de petróleo é obtida a partir de poços offshore situados em águas profundas e ultraprofundas, assim uma das grandes preocupações na exploração de hidrocarbonetos em alto mar será manter a integridade estrutural dos dutos submarinos que transportam o óleo do poço até a unidade flutuante ou até o continente.

As linhas de produção e exportação de óleo em águas ultraprofundas são compostas de dutos de aço de parede simples. Em função das altíssimas pressões externas atuantes é necessário projetá-las com grandes espessuras de parede. Tais espessuras aumentam em demasia o peso dessas estruturas dificultando o processo de instalação no mar. Além disso, tubos de grande espessura dificultam o processo de soldagem dos tramos.

O duto projetado para transporte de fluidos deverá ter capacidade de resistir aos esforços oriundos da atuação de pressão gerada internamente e externamente, a

combinação da pressão externa com flexão, além de ter que ser dimensionado em função da pressão de propagação do colapso.

Como os flowlines e os pipelines são dutos sob carregamento estático, os mesmos estão sujeitos somente à pressão hidrostática, diferente dos risers que estão sujeitos a carregamentos dinâmicos de ondas e correntes submarinas.

2.3. Instalação

A instalação de pipelines e flowlines e suas conexões com a plataforma contituem uma das mais desafiantes operações offshore, nos dias de hoje, exigindo um alto nível de engenharia e de esforço. Neste contexto, os dutos submarinos podem ser instalados através de diferentes métodos. A variação entre os métodos consiste na maneira pela qual o duto é transferido da terra para o local de instalação e como o mesmo é posicionado no fundo do mar.

A maior dificuldade encontra-se em manter a configuração do duto da superfície até ao fundo do mar, mantendo a sua integridade estrutural.

Dentre os diversos métodos de instalação de dutos pela superfície, os mais utilizados na indústria atualmente são: Método S-Lay, Método J-Lay, Método Reel-Lay e o Método de Arraste Controlado, que serão detalhados a seguir.

2.3.1. Método S-Lay

S-lay refere-se ao método de instalação onde o duto está inicialmente na posição horizontal no navio e adquire uma característica na forma de S no trajeto até o fundo do mar. O processo ocorre de forma relativamente lenta, pois os tramos são soldados ao longo do lançamento. A linha de dutos irá assumir uma configuração S ou J dependendo do processo a ser utilizado. O método J só deverá ser utilizado em águas profundas e o S é preferencial para águas rasas.

O método S-Lay é realizado a partir de uma barça de lançamento ancorada ou com posicionamento dinâmico, onde a construção da linha é feita sobre a embarcação de lançamento em uma posição quase horizontal, criando duas regiões que apresentam flexão acentuada, uma na rampa conhecida por “overbend” e outra junto ao leito marinho, denominada “sagbend”. Um dos principais papéis da barça de lançamento está em fornecer tensão para manter a linha suspensa e controlar a sua forma.

Na Figura 3 é apresentada uma operação de lançamento na qual se vê a embarcação e a linha sendo instalada. Os segmentos do duto são soldados sobre uma rampa de montagem, que contém estações de soldagem. Um ou mais tensionadores, que controlam a tração na linha e, conseqüentemente, os momentos concomitantes são posicionados no convés. Uma rampa treliçada chamada “stinger”, usada para suavizar ou minimizar a forte variação angular que o duto sofre ao deixar a embarcação é construída externamente a embarcação e atende a critérios de projeto específicos.

A Figura 3 abaixo apresenta a típica trajetória em S do duto até chegar ao fundo do mar. Deve-se ainda ser ressaltado que há roletes ao longo de toda a rampa de montagem destinada para a movimentação dos dutos, mas estes roletes só começam a formar uma curva no trecho localizado após os tensionadores, pois há um alinhamento perfeito dos segmentos ao serem soldados. Neste método, os equipamentos ficam dispostos em linha, assim à construção em série é permitida, o que contribui para aumentar a produtividade do método S-Lay.

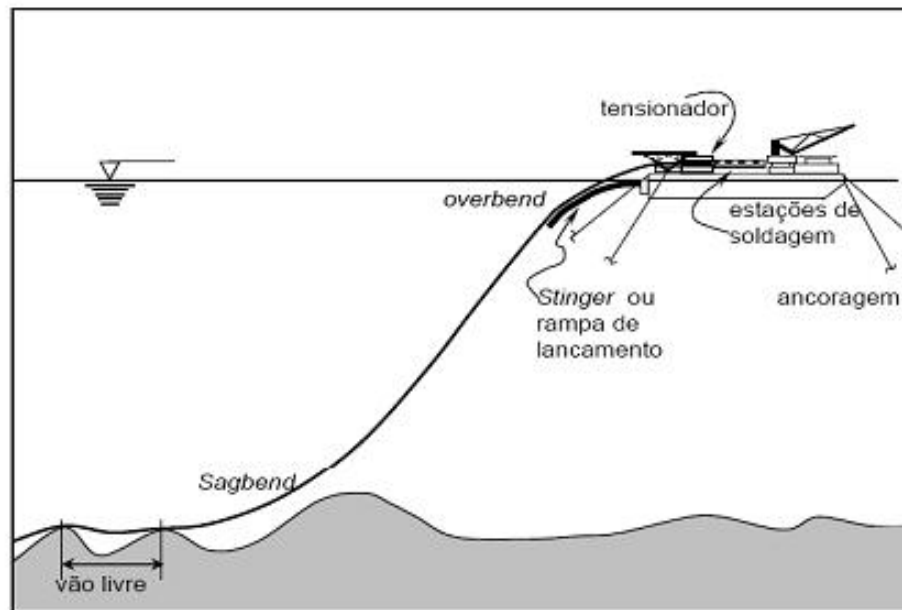


Figura 3: Método S-lay

Os principais equipamentos presentes na embarcação destinada para o 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.

Características do Método S-lay:

- Adequado para instalação em águas rasas e intermediárias;
- Alta taxa de produção devido a várias estações de trabalho;
- Adequado para instalar duto revestido com concreto;
- Lâmina de água mais profunda exige uma rampa de lançamento muito longa (> 100m).

2.3.2. Método Reel-Lay

O método Reel-Lay pode ser utilizado para a instalação de dutos submarinos flexíveis ou rígidos. Neste método, a linha é fabricada em terra, onde longos segmentos de dutos são soldados, testados e revestidos e em seguida são enrolados formando um carretel de grande comprimento e diâmetro, que são estocados no convés da embarcação para transporte e instalação.

Uma vez que a embarcação destinada para realizar Reel-Lay estiver na posição, o duto é desenrolado, em seguida esticado e colocado no mar enquanto o navio se desloca para frente. O esquema do lançamento utilizando o método Reel-Lay pode ser observado na figura 5. O navio de Reel-Lay necessita de uma base em terra perto para reduzir o tempo de trânsito entre o local onde está ocorrendo à instalação e onde estão estocados os carretéis.

As vantagens obtidas pela alta taxa de produção, assim como as condições controladas em terra de soldagem e inspeção, tornam o Reel-Lay um método extremamente eficiente para a instalação de dutos com distância de até 20 polegadas em todas as lâminas da águas. Porém em relação aos outros métodos, a única vantagem é grande velocidade de instalação.

Em consequência às deformações impostas ao duto, durante a seqüência de enrolamento e desenrolamento, normalmente a espessura de parede necessita ser maior do que a requerida para os demais métodos. Assim, este método apresenta algumas limitações, sendo uma das maiores a respeito do diâmetro máximo do duto, que pode ser estocado na forma de carretel, no qual são utilizados diâmetros de até 16 polegadas.

Outra limitação encontrada no método Reel-Lay é a restrição quanto à utilização de alguns tipos de revestimentos devido à curvatura imposta pelo enrolamento. Sendo impraticável para este método, o uso de revestimento de concreto e de algum tipo de isolamento térmico de alta rigidez, além de que o revestimento não pode ser sensível às condições climáticas, pois o duto precisa ser todo desenrolado e lançado por inteiro, consequentemente esta operação não pode ser interrompida por eventuais condições climáticas.

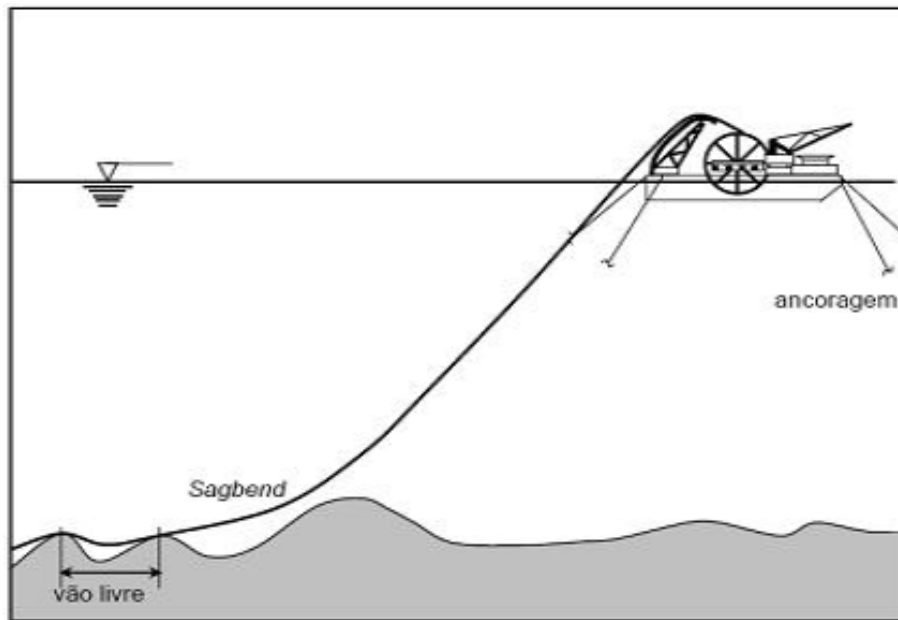


Figura 5: Lançamento utilizando o método *Reel-Lay*.

Equipamentos encontrados no método *Reel-Lay*:

- Tambor de armazenamento;
- Equipamento de retificação;
- Máquinas de tração;
- Estação para montagem de ânodo de sacrifício;
- Estação para corte, biselamento, alinhamento, soldagem, inspeção, e revestimento de eventuais juntas de campo;
- Equipamento de suporte da linha;
- Rampa de lançamento

Características do método *Reel-Lay*:

- Possui alta taxa de produção;
- Adequado para águas rasas a ultraprofundas;
- Condições controladas durante a soldagem dos dutos (onshore);
- É necessária uma base próxima ao local de instalação para a preparação duto;
- Diâmetro do tubo é limitado pelo tamanho do carretel;
- Não é adequado para instalação de duto revestido com concreto;
- Utilizado para duto com revestimento térmico exterior ou forrado.

2.3.3. Método J-Lay

O método J-Lay é uma variação do método S-Lay, onde a rampa de lançamento é construída em posição quase vertical, sendo transformada numa torre de lançamento. Neste modelo, a região de overbend não existe e a configuração do duto se assemelha ao desenho da letra J. A ausência da região de overbend foi o grande motivo pelo qual este método foi desenvolvido primordialmente para águas profundas. A Figura 4 mostra o esquema de um lançamento utilizando o método J-Lay.

Com a utilização da torre de lançamento, as operações de construção já não podem ser mais totalmente desenvolvidas em série, obtendo em decorrência disto a uma redução na produtividade deste método.

Para alcançar uma maior produtividade e reduzir o tempo de instalação dos dutos rígidos, várias formas de otimizações vêm sendo desenvolvidas, tais como o sistema de soldagem automático e a pré-fabricação de tramos, para utilização de juntas de maior comprimento na torre de lançamento, as juntas pré-fabricadas e conectadas, no momento da instalação através de conectores mecânicos, são do trecho horizontal, o trecho suspenso é feito soldado, pois os conectores mecânicos ainda não estão qualificados para a utilização em dutos rígidos em catenárias, apesar de já terem sido usados em aplicações sujeitas à fadiga.

O método de instalação J-lay apresenta vantagens como, por exemplo, a não necessita de ferramentas especiais submarinas, tais como tratores, para montagem de linha; e a não demanda de instalações fabris em regiões costeiras e grandes canteiros, perpendiculares à praia para a construção das linhas.

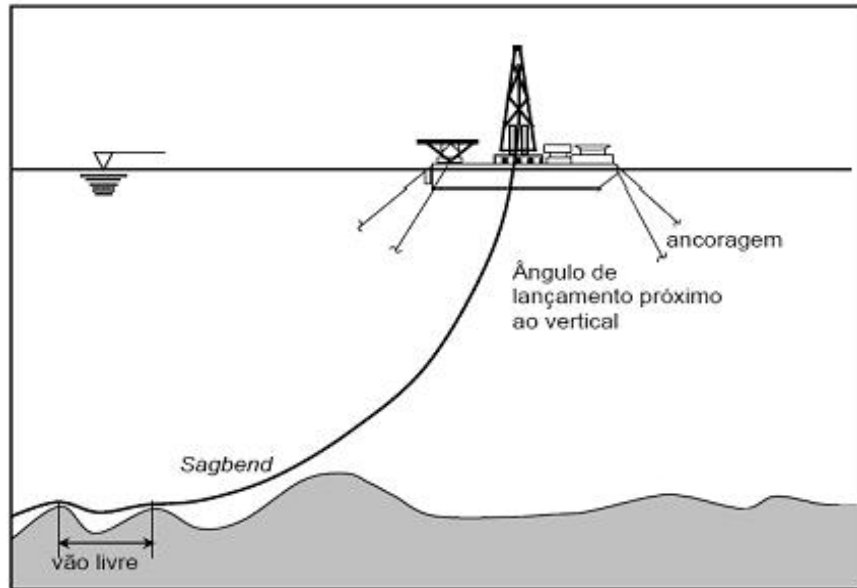


Figura 4: Método J-lay

Em um processo típico de lançamento J-Lay estão presentes as seguintes fases:

- Pré-fabricação de tramos, tipicamente entre 12 e 48m;
- Sistema de elevação para verticalização do tramo pré-fabricado;
- Sistema de transferência do tramo para a torre de lançamento;
- Estação de trabalho, visando alinhamento, soldagem, inspeção por ultrassom e revestimento.

Características do Método J-Lay:

- Adequado para instalação em água profunda;
- Adequado para instalação de duto de grande diâmetro e revestido com concreto;
- Adequado para dutos sensíveis à fadiga, como por exemplo, risers;
- Adequado para a instalação de itens especiais, como PLETS;
- Baixa taxa de produção devido à soldagem em uma única estação;
- Não é apropriado para a instalação de dutos em águas rasas devido ao ângulo do duto limitado;

Atualmente utiliza-se a opção híbrida para o lançamento de dutos, onde o método J-lay é realizado para as regiões críticas, por exemplo, a superfície e touch down point (TDP) e o método carretel para as demais regiões.

2.3.4. Método de Arraste Controlado

No método de arraste controlado (Figura 6), a linha de dutos é transportada por reboque e lentamente baixada até o leito marinho. São utilizadas bóias de flutuação para auxiliar o lançamento. Uma limitação deste método encontra-se no fato que ele só pode ser realizado sob condições ambientais favoráveis.

Este método é utilizado para o lançamento de dutos rígidos.

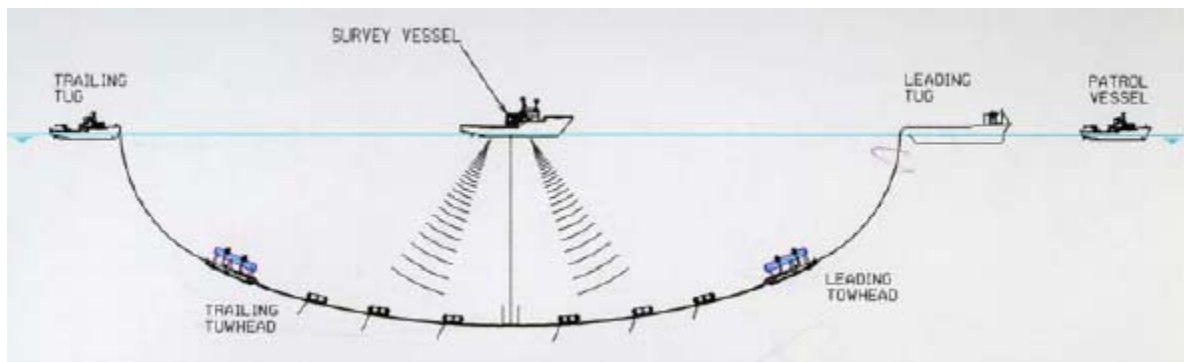


Figura 6: Método de arraste controlado

3. Análise Experimental

Inicialmente foi necessária a fabricação de modelos reduzidos de dutos metal-compósito (espécimens) a partir de tubos de alumínio revestidos com fibra de vidro e resina epóxi. Ao todo foram fabricados seis modelos de dutos.

Com os espécimens prontos foi realizada a caracterização da pressão de colapso a partir de testes experimentais em câmara hiperbárica, onde as amostras foram submetidas a um carregamento quase-estático de pressão hidrostática até o colapso.

As propriedades mecânicas do compósito foram obtidas através de testes de tração e de compressão. Para a realização destes testes foram fabricados corpos de prova a partir de placas do compósito estudado com diferentes espessuras. Ambos os testes foram realizados em uma máquina servo-hidráulica para testes mecânicos. Com o resultado dos testes mecânicos foi possível definir as propriedades mecânicas dos modelos utilizados, para futuras simulações numéricas.

3.1. Fabricação de Modelos

Os modelos reduzidos foram fabricados pela laminação através do processo de vacuum bag. Um aparato mecânico foi utilizado para a fixação das extremidades do tubo para facilitar o processo de laminação. Este aparato é mostrado na figura 7. Antes da laminação, os tubos de alumínio tiveram a sua superfície lixada.



Figura 7: Aplicação da graxa sobre o tubo mapeado

Neste projeto foi definido um único caso para ser analisado, o de não-aderência entre o tubo de alumínio e a camada de compósito a ser testada, pois a aderência entre as camadas afeta muito a pressão de colapso final e não era desejada a inclusão de mais um parâmetro de análise. Assim antes de começar o procedimento de laminação foi necessário à aplicação de uma graxa de silicone na superfície externa do tubo de alumínio.

Após a aplicação da graxa, a manta de fibra bidirecional Woven Roving é colocada sobre a superfície do tubo (figura 8), e em seguida a Resina Epóxi é aplicada sobre esta manta com o auxílio de um rolinho de espuma até que seja obtida total impregnação do tecido, como é mostrado na figura 9. Depois disso foi utilizado um rolinho de ferro para remover o excesso de resina.



Figura 8: Aplicação da manta de fibra de vidro bidirecional.



Figura 9: Aplicação da resina epóxi sobre a manta.

Ao fim da laminação quando todo o comprimento da manta foi enrolado ao redor do tubo (figura 10), uma série de diferentes camadas foi sobreposta para que a aplicação do vácuo não danifique o laminado e seja obtida uma laminação perfeita.

Neste processo, o tubo é coberto manualmente por um tecido a base de poliéster chamado peel ply (figura 11). Este tecido será responsável por garantir a textura e o acabamento final do compósito obtendo o laminado com uma superfície lisa, sem que a manta de fibra de vidro marcada. O resultado esperado após o vácuo pode ser observado na figura 17.



Figura 10: Tubo laminado pronto para receber as camadas.



Figura 11: Aplicação do *Peel Ply*

Após o peel ply, o acrylon é enrolado ao tubo com o objetivo de absorver o excesso de resina retido no peel ply e permitir que alguns voláteis escapem. Na figura 12, está sendo aplicado o acrylon sobre uma placa que foi posteriormente utilizada para a fabricação de corpos de prova para o teste de tração.



Figura 12: Aplicação do *Acrylon*

Em seguida, o tubo é coberto com um plástico perfurado, representado na figura 13, de PVC fino com pequenos buracos ao longo de seu comprimento. Os furos no plástico terão como finalidade permitir o fluxo e acesso do vácuo no laminado. A última camada será de plástico bolha. Esta é colocada sobre o tubo para permitir uma distribuição uniforme da pressão ao longo do laminado. Na figura 14, tem-se o tubo completo com todas as camadas necessárias para a obtenção de um laminado correto.



Figura 13: Aplicação do *Plástico Perfurado*



Figura 14: Aplicação do Plástico Bolha.

Por fim, todo o conjunto será envolvido por uma bolsa de material plástico duro (figura 15) que deverá ser devidamente selada em todas as suas extremidades com fita silver tape, para evitar fuga de ar. Em um determinado ponto localizado no meio do comprimento do tubo será feito um furo onde é conectada uma pequena mangueira. Esta mangueira é ligada a bomba de vácuo (figura 16), que possui uma capacidade máxima de 1 atm, sendo o vácuo fornecida a partir de um compressor de ar.

O vácuo é aplicado ao conjunto por aproximadamente 1 hora e tem como objetivo eliminar vazios ou ar aprisionado, além do excesso de resina acumulado durante o processo de laminação (figura 15).



Figura 15: Aplicação do Vácuo.



Figura 16: Bomba de Vácuo.

Após a bomba ser desligada e a mangueira desconectada, inicia-se o processo de cura. Para garantir que a camada de compósito dos modelos reduzidos fique totalmente seca, o conjunto foi deixado dentro da bolsa plástica à temperatura ambiente durante 24 horas. Por fim, retiram-se todas as camadas que foram empilhadas no tubo, obtendo-se o resultado final, um tubo de alumínio revestido por uma camada de material compósito formado de fibra de vidro e resina epóxi, como pode ser observado na figura 17.

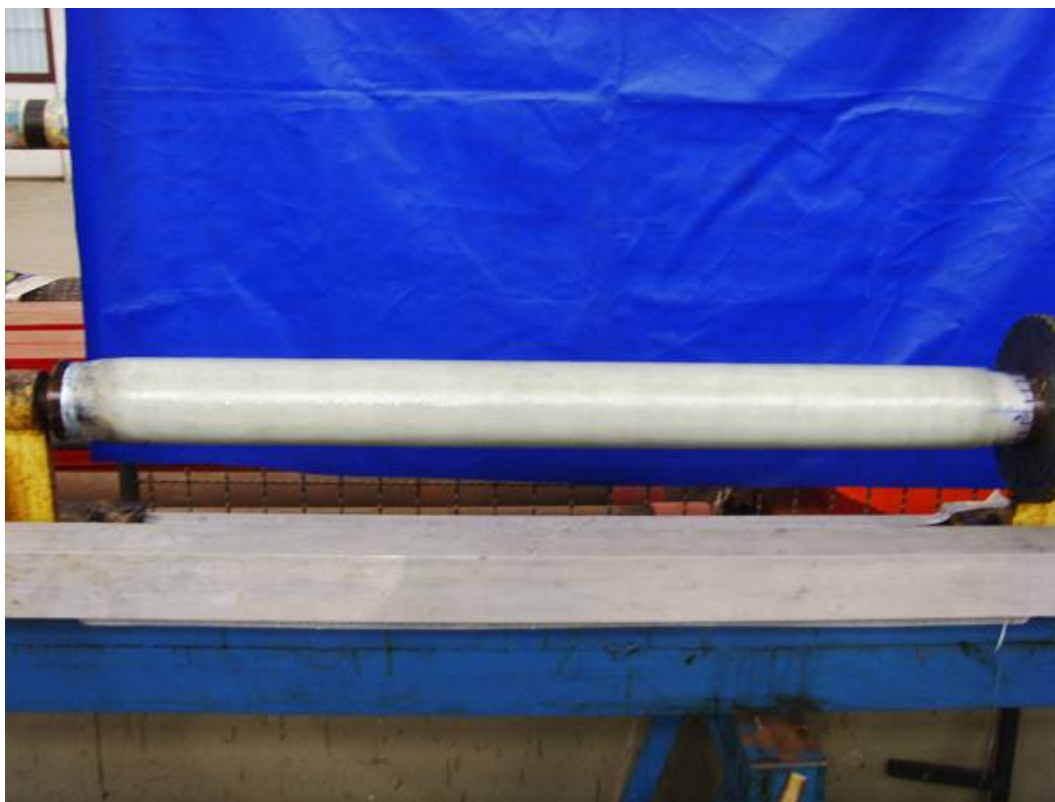


Figura 17: Tubo laminado pronto após aplicação do Vácuo.

3.2. Medição

Os tubos selecionados para receber a laminação foram cortados a partir de um tubo longo de alumínio com o comprimento total igual 5,85 m e usinado em suas extremidades. As amostras foram inicialmente mapeadas com o objetivo de obter a espessura média inicial (t_{om}) e o diâmetro médio inicial (D_{om}), com essas medidas são calculadas a ovalização inicial (Δ_o) e a excentricidade (Ξ_o) de cada tubo.

Cada amostra do tubo de alumínio apresenta um comprimento total de 975 mm e um diâmetro em torno de 76 cm, e para melhor identificação de cada tubo, foi escolhida uma nomenclatura utilizando letras, indo de A até F.

Na figura 18 é apresentado o comportamento do tubo de alumínio sem o reforço do compósito, é esperado que com a inclusão da camada de compósito a pressão suportada pelo conjunto seja superior a do tubo de alumínio sozinho. O módulo de elasticidade do alumínio encontrado na literatura é de aproximadamente 61,39 GPa.

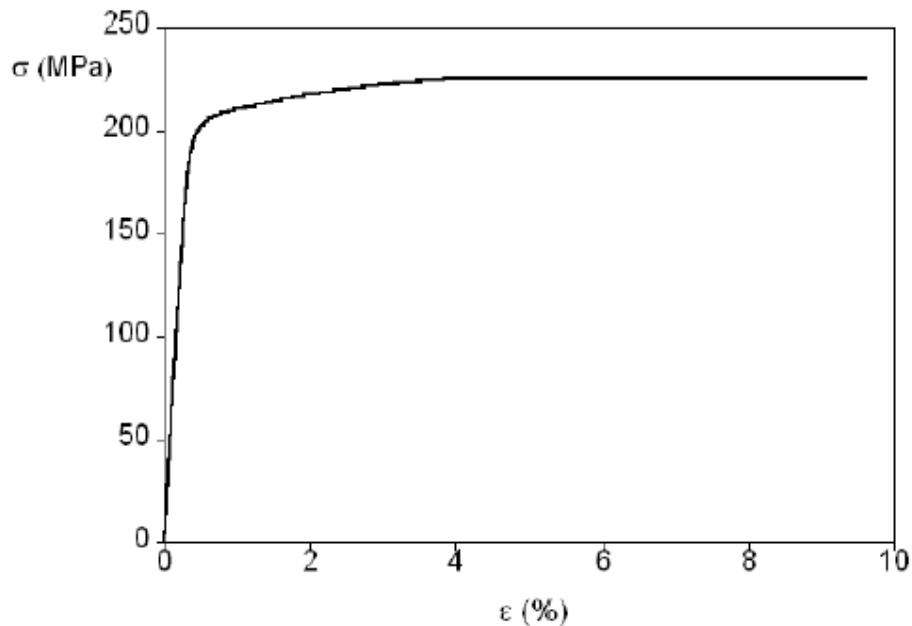


Figura 18: curva de tensão versus deformação nominal do alumínio

Após a laminação, os tubos precisam ser novamente mapeados para que sejam obtidos a espessura média final (t_{fm}) e o diâmetro médio final (D_{fm}), e com a nova

medição, é calculada a ovalização final (Δ_f). A excentricidade não é calculada no tubo laminado.

Com os diâmetros médios do tubo laminado e do tubo de alumínio é possível obter a espessura média do compósito (t_c). O cálculo t_c consiste na subtração do D_{om} da D_{jm} , o valor obtido desta subtração é dividido por dois e assim temos a espessura do compósito.

O mapeamento consiste na marcação do tubo com uma caneta ao longo de seu comprimento, assim a cada 65 cm é marcada com tinta a seção transversal do tubo, como pode ser observado na figura 18, no final são obtidas quinze partes iguais.

Nas seções transversais marcadas são feitos pequenos traços na direção circunferencial do tubo a cada 18° , totalizando vinte pontos até completar 360° . O objetivo do mapeamento é obter o diâmetro e a espessura média de cada amostra, através das marcações feitas, como é mostrado na tabela 1.

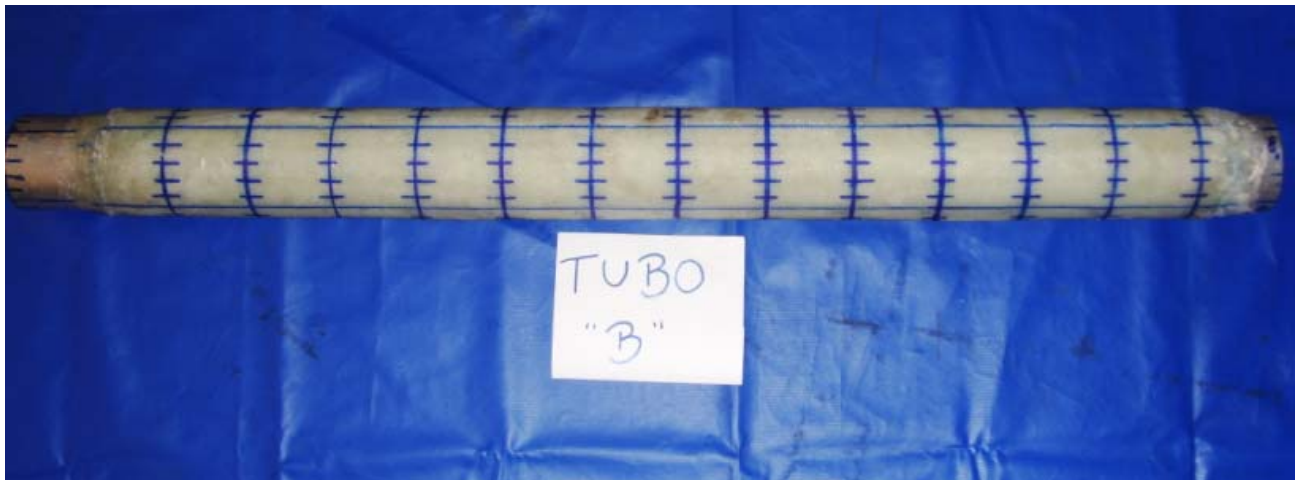


Figura 19: Tubo B laminado e Mapeado

Modelo	T_0 m (mm)	t_c (mm)	D_{om} (mm)	D_{jm} (mm)
A	2,17	4,47	76,32	85,26
B	2,18	4,96	76,31	86,23
C	2,19	5,32	76,32	86,97
D	2,19	5,22	76,31	86,75
E	2,21	1,52	76,32	79,35
F	2,20	1,75	76,32	79,79

Tabela 1: Parâmetros geométricos dos modelos (Espessuras e Diâmetros Médios).

A ovalização inicial (Δ_o) de cada tubo de alumínio será calculada através da divisão entre diâmetro externo máximo (D_{\max}) menos o diâmetro externo mínimo (D_{\min}) pela soma do diâmetro externo máximo com o diâmetro externo mínimo, como pode ser observado na equação 1. A mesma equação é utilizada para obter a ovalização final, porém para este cálculo serão considerados os diâmetros externos máximos e mínimos de cada tubo laminado.

$$\Delta_o = \frac{D_{\max} - D_{\min}}{D_{\max} + D_{\min}} \quad (1)$$

A excentricidade (Ξ_o) é calculada a partir das espessuras máximas (t_{\max}) e mínimas (t_{\min}) de cada tubo através da equação 2, sendo calculada apenas para o tubo de alumínio antes de receber a laminação. Esta propriedade influencia a pressão de colapso, pois quanto maior for Ξ_o , menor será a pressão de colapso. O resultado dos cálculos é demonstrado na tabela 2.

$$\Xi_o = \frac{t_{\max} - t_{\min}}{t_{\max} + t_{\min}} \quad (2)$$

Modelo	Δ_0 (%)	Δ_F (%)	Ξ_o (%)
A	0,29	0,56	5,69
B	0,30	1,38	6,35
C	0,32	0,36	5,67
D	0,28	0,38	6,35
E	0,33	0,17	5,74
F	0,33	0,05	6,74

Tabela 2: Parâmetros geométricos dos modelos (Ovalização e Excentricidade)

3.3. Teste de Material

Neste capítulo serão descritos os testes experimentais de tração e de compressão utilizados para obter as propriedades mecânicas do compósito através de corpos de prova fabricados a partir de placas adicionais.

3.3.1. Teste de Tração

O teste de tração uniaxial tem como objetivo determinar as propriedades elásticas do material compósito como a tensão limite de ruptura (σ_r), a deformação axial limite de ruptura (ϵ_r) e o módulo de elasticidade (E), listadas nas tabelas 3 e 4 abaixo.

Para a realização deste teste foram utilizados corpos de prova efetuados seguindo às exigências da norma ASTM D 3039/D 3039M, Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. Esta norma é direcionada a materiais compósitos reforçados com fibra.

Para a fabricação dos corpos de prova foram laminadas duas placas retangulares de compósito com espessuras diferentes. Na placa de espessura de 1,2 mm foram usadas para a laminação, quatro mantas de fibra de vidro e resina epóxi de cura lenta e para a outra placa, foi definida uma espessura maior de 2,4 mm, fabricada com oito mantas e resina epóxi.

Os corpos de prova de tração possuem comprimento de 250 mm; largura de 25 mm; e a espessura variando de 1,2 mm ou 2,4 mm dependendo da placa de origem. Dois modelos com 1,2 mm de espessura podem ser observados na figura 19.



Figura 20: Modelo do Corpo de Prova para o teste de Tração (Modelo CP01)

A nomenclatura definida para essas amostras foi CPXXYY, onde CP significa corpo de prova; XX qual espessura o corpo de prova possui, 01 para 1,2 mm e 02 para a espessura de 2,4 mm; YY é o número da amostra de 01 a 04 para cada espessura.

As amostras receberam em cada uma de suas extremidades reforços de madeira com comprimento de 50 mm e largura de 25 mm para que ao longo do teste não houvesse concentração de carga perto das garras mecânicas.

O desejado com a utilização de reforços presos as extremidades dos corpos de prova é que a deformação não ocorra perto da extremidade. O indicado no teste de tração é que a deformação ocorra no centro do corpo de prova.

Inicialmente, as amostras foram pesadas, sendo este peso equivalente ao peso total (P_T); após a realização do teste, os corpos de prova tracionados foram queimados para que toda resina evaporasse, e ficasse apenas a fibra. Esse resíduo é pesado novamente, obtendo assim o peso da fibra (P_F).

Dividindo o peso da fibra pelo peso total obtido antes da queima foi possível obter a percentagem de fibra de cada amostra, a formula para esta cálculo é mostrada na equação 3. O processo de queima é baseado na norma ASTM D2584 (1985) e foi realizado também nos testes de compressão e de colapso.

$$\% F = \frac{P_F}{P_T} \times 100 \quad (\text{percentagem de fibras}) \quad (3)$$

Nas tabelas 3 e 4 são apresentadas as propriedades elásticas resultantes do teste de tração das amostras, a tensão limite de ruptura (σ_r) e a deformação axial limite de ruptura (ε_r). A partir da análise dos gráficos de tensão versus deformação, nas figuras 20 e 21, foi obtido o módulo de elasticidade (E) de cada corpo de prova correspondendo ao coeficiente angular de sua respectiva reta. Tal propriedade também pode ser calculada através da equação 4.

$$E = \frac{\sigma_r}{\varepsilon_r} \quad (4)$$

Nome	σ_r	ϵ_r	E (MPa)	%F
CP0101	313,66	0,0195	15500	71,40
CP0102	230,35	0,0165	10833	70,00
CP0103	314,71	0,0197	16667	74,30
CP0104	220,93	0,0170	10000	74,70

Tabela 3: Dados experimentais do corpo de prova com espessura de 1.2 mm

Nome	σ_r	ϵ_r	E (MPa)	%F
CP0201	313,66	0,019	15625	73,20
CP0202	313,92	0,019	15000	73,00
CP0203	314,87	0,017	20000	78,00

Tabela 4: Dados experimentais do corpo de prova com espessura de 2.4 mm

Nas figuras 20 e 21 são plotados os resultados experimentais da deformação axial versus tensão de ruptura das amostras testadas. Na figura 20 estão apresentadas às retas resultantes do teste de tração para o corpo de prova com espessura de 1.2 mm e na figura 21 são apresentados os resultados para os corpos de prova com 2.4 mm. Pode-se observar que os corpos de prova com maior percentagem de fibra tiveram uma maior resistência estrutural, obtendo maiores valores de tensão.

Para os modelos CP0103 e CP0104 era esperado um comportamento semelhante ao longo do teste, devido às percentagens de fibra apresentarem valores próximos, e a espessura de ambos ser a mesma, porém foi observado uma discrepância no valor da tensão obtido pelos corpos de prova, no qual o CP0103 suportou uma tensão superior a 300 MPa, enquanto CP0104 obteve uma tensão inferior a 250 MPa. Esta diferença é explicada pelo escorregamento do suporte de madeira do CP0104 no teste, prejudicando o resultado final.

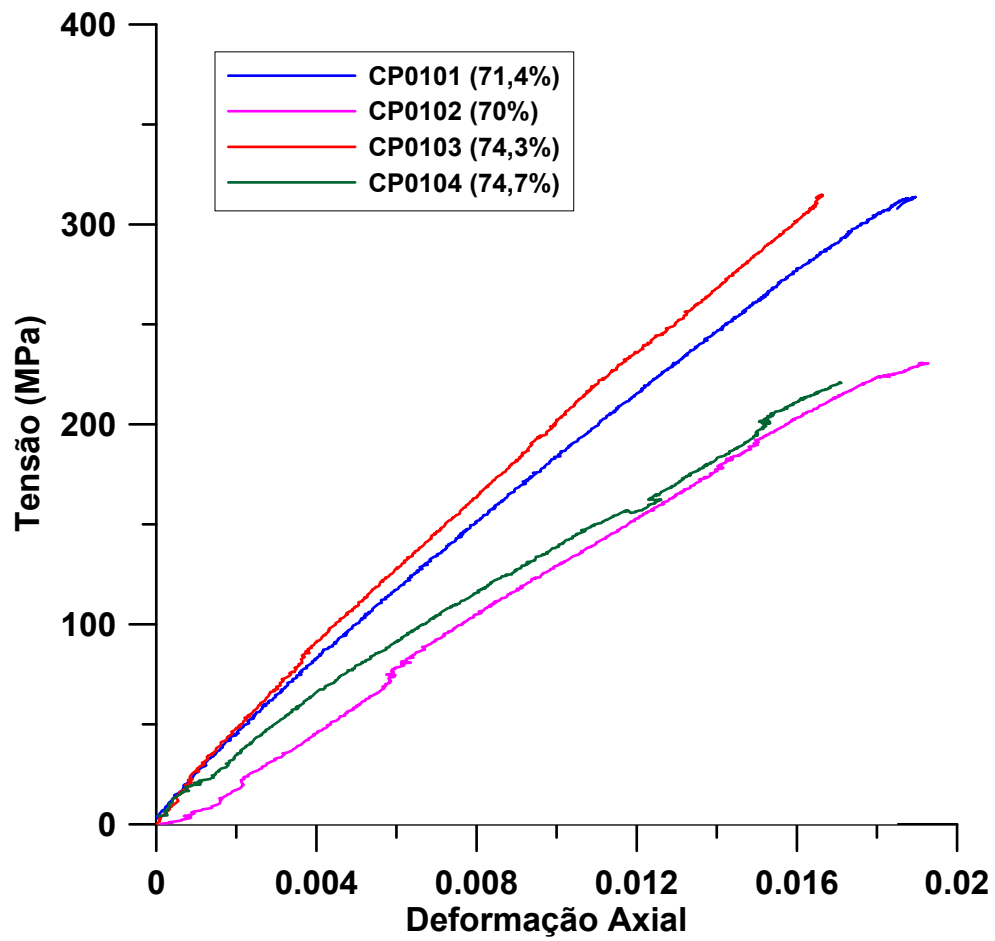


Figura 21: Teste de Tração - espessura 1,2 mm com % de vidro

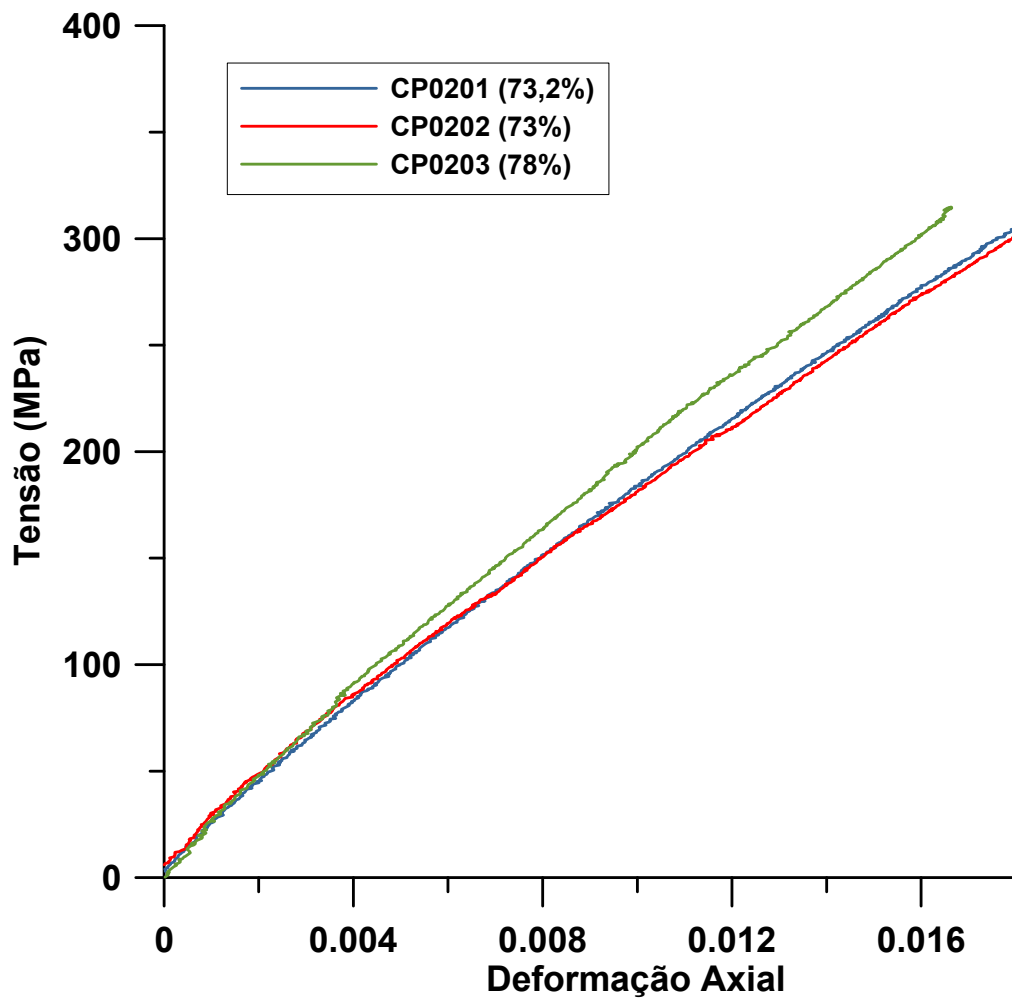


Figura 22: Teste de Tração - espessura 2.4mm com % de vidro

3.3.2. Teste de Compressão

Para a realização do teste de compressão foi adotada a recomendação da norma ASTM D 695, Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics, para a fabricação dos corpos de prova.

A geometria definida para o corpo de prova retangular foi um comprimento de 25 mm, uma largura de 12,65 mm e uma espessura de 5 mm. Uma nova placa foi laminada para a fabricação das amostras.

A nomenclatura utilizada para identificação das amostras é CPTAABB, onde CP representa corpo de prova; T é a direção X ou Y na placa retangular de onde o corpo de prova foi removido; AA é o número da amostra inicial 01 ou 02; e BB representa qual pedaço da amostra inicial está sendo testada.

Inicialmente, foram testados corpos de prova com 50 mm de altura, porém quando era aplicada a compressão, a amostra não agüentava o esforço e tombava. Então os corpos de prova foram cortados ao meio, ficando com comprimento final de 25 mm. Por esse motivo, a nomenclatura final tem em sua composição BB que determina qual é a parte do corpo de prova inicial, 1 ou 2. Na figura 25, pode ser observado o corpo de prova inicial com 50 mm de comprimento e os corpos de prova finais após serem cortados.

Nas figuras 23 e 24 está representado o aparato montado, necessário para o teste de compressão. É mostrado em detalhe na figura 23, o corpo de prova sendo comprimido e a utilização de uma rótula para zerar o momento fletor aplicado na extremidade da amostra; na figura 24, tem-se a máquina servo-hidráulica realizando o teste de compressão no corpo de prova.



Figura 23: Teste de Compressão



Figura 24: Detalhe do Teste de Compressão

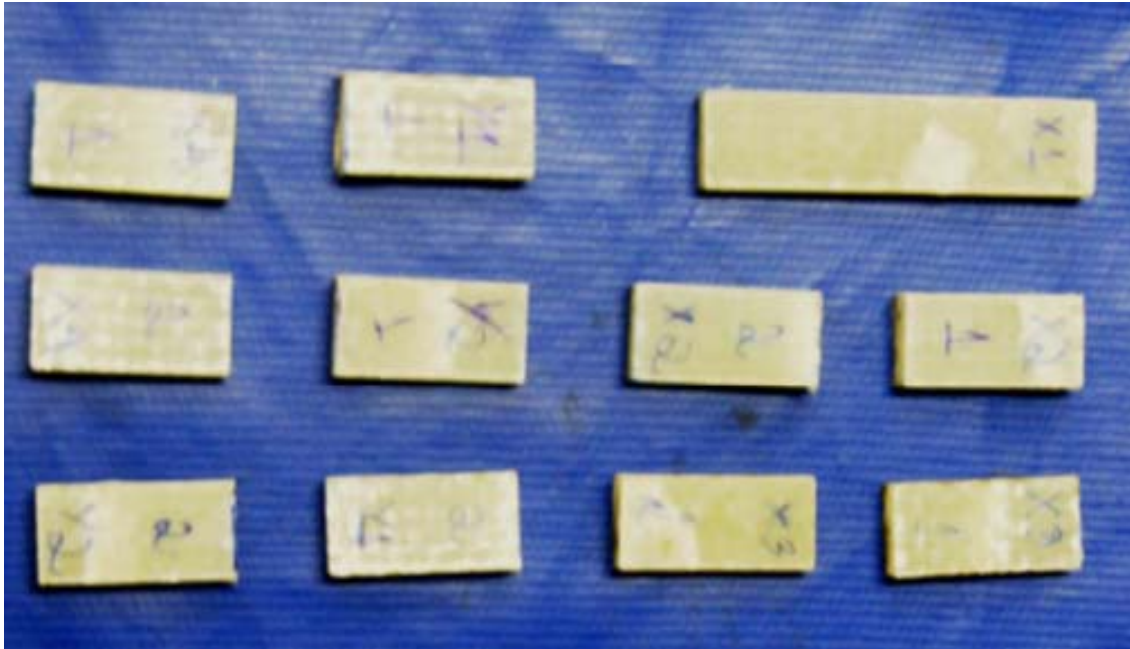


Figura 25: Corpos de Prova para o teste de Compressão

Nas tabelas 5 e 6 são apresentadas as propriedades elásticas resultantes do teste de compressão das amostras, a tensão limite de ruptura (σ_r) e a deformação axial limite (ϵ_r). A partir da análise dos gráficos de tensão versus deformação, nas figuras 22 e 23, foi obtido o módulo de elasticidade (E) de cada corpo de prova correspondendo ao coeficiente angular de sua respectiva reta.

Nome	σ_r (MPa)	ϵ_r	E (MPa)	%F
CPY0101	55,083	0,0254	4500	66,66
CPY0102	97,716	0,0297	7250	68,97
CPY0201	86,709	0,029	7250	67,74
CPY0202	93,565	0,019	7500	64,52

Tabela 5: Dados experimentais dos Corpos de Prova na Direção Y

Nome	σ_r (MPa)	ϵ_r	E (MPa)	%F
CPX0201	88,477	0,0188	6000	64,52
CPX0401	84,247	0,0189	6750	68,97
CPX0402	65,195	0,0122	8750	67,74

Tabela 6: Dados experimentais dos Corpos de Prova na Direção X

Nas figuras 22 e 23 são plotados os resultados experimentais da deformação axial versus tensão de Compressão das amostras testadas. Na figura 22 estão apresentadas às retas resultantes do teste de tração para os corpos de prova retirados na direção Y da placa retangular e na figura 23 são apresentados os resultados para os corpos de prova retirados na direção X da placa retangular. Pode-se observar que os corpos de prova apresentaram resultados semelhantes em ambas as direções.

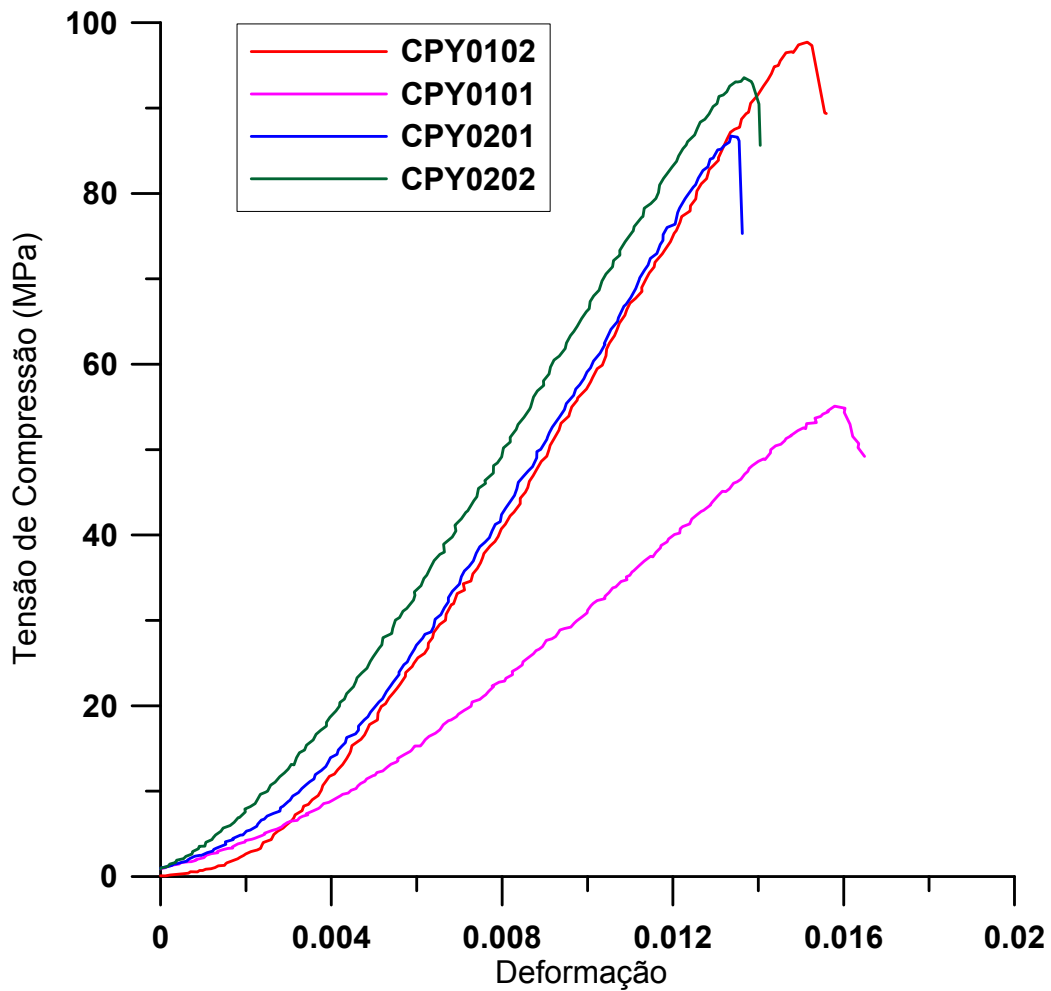


Figura 26: Resultado de Teste de Compressão para Corpos de Prova na direção Y.

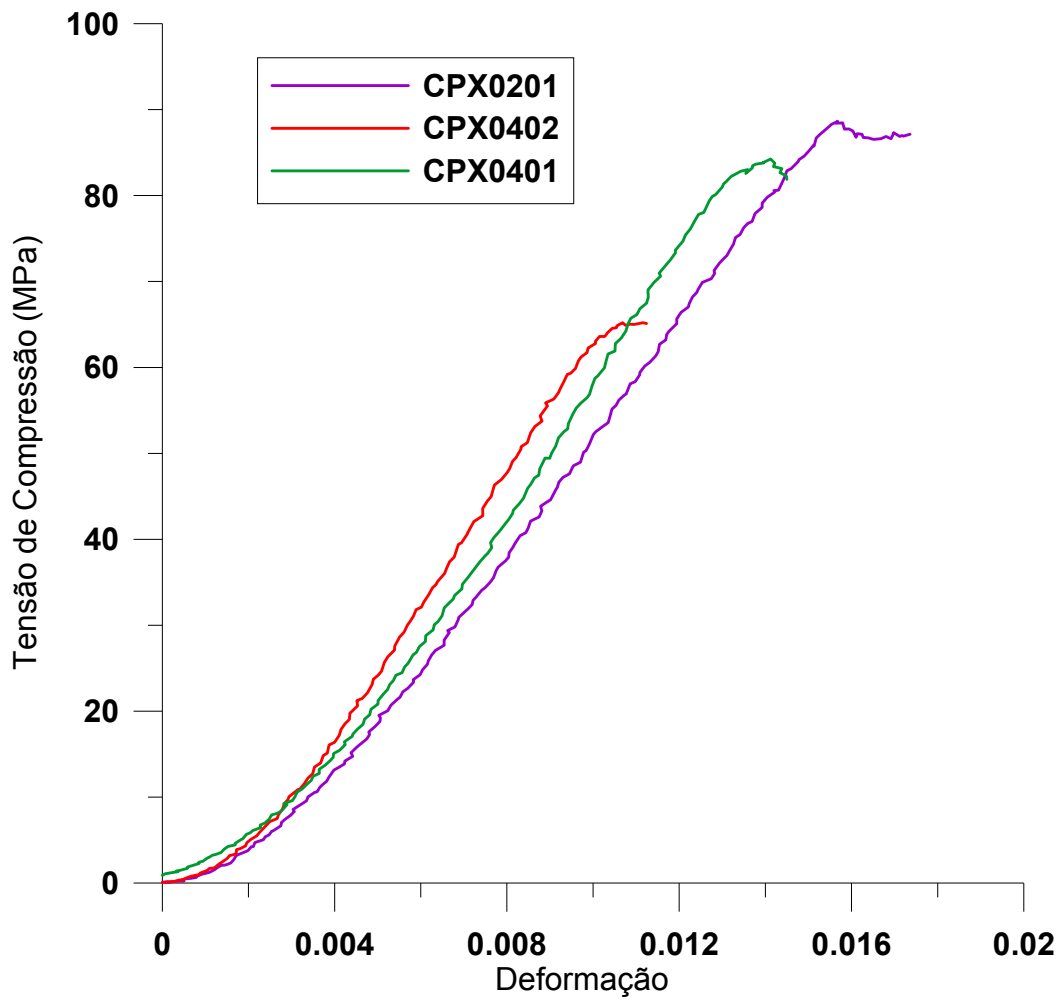


Figura 27: Resultado de Teste de Compressão para Corpos de Prova na direção X.

3.4. Teste de Colapso

O teste de colapso foi feito com o objetivo de obter a pressão de colapso dos modelos reduzidos fabricados. O teste foi realizado em uma Câmara Hiperbárica com diâmetro interno de 380 mm e comprimento de 5000 mm. A câmara e sua representação lateral podem ser observadas nas figuras 28 e 29, respectivamente. A pressão máxima suportada por este equipamento é de 7500 psi e para este projeto foi utilizada uma taxa de pressurização de 60 Psi/minuto.



Figura 28: Câmara Hiperbárica



Figura 29: Esquema da Vista lateral da Câmara Hiperbárica

Este tipo de teste consiste na inserção dos espécimes no interior da câmara hiperbárica, na qual apenas pode ser testado um modelo por vez. Em seguida a câmara é fechada e começa a ser preenchida com água doce. Quando a câmara está totalmente completa de água e todo o ar drenado, o teste é iniciado. Assim a câmara é pressurizada a uma taxa de aproximadamente 60 psi/min usando uma bomba hidráulica de acionamento pneumático provida de válvula micrométrica para o controle da vazão.

Antes do teste, os tubos laminados precisam ser devidamente selados, assim primeiramente cada extremidade do tubo recebe uma cabeça de vedação. Estas duas cabeças terão como função impedir a entrada de água dentro do tubo, o que atrapalharia o teste e conseqüentemente levaria a obtenção de uma pressão de colapso final errada.

Dentro de cada cabeça é colocado um anel de vedação de borracha que serve para garantir total estanquidade durante o teste, e este anel é fixado na cabeça de vedação com uma massa epóxi que fica no espaço entre o tubo e o final de cada cabeça, esta montagem pode ser observada na figura 30.



Figura 30: Extremidade do tubo B selada

Por fim, o tubo recebe em sua superfície uma camada de tinta epóxi com a finalidade de impedir que a água entre em contato direto com o laminado, isolando assim as fibras. Quando a tinta está completamente seca, o tubo já pode ser testado. É aconselhado que a tinta fique em processo de cura a temperatura ambiente por um período de 24 horas.

O conjunto final é posicionado dentro da câmara hiperbárica. Um manômetro e um transdutor eletrônico de pressão conectado a um sistema computadorizado de aquisição de dados são usados no monitoramento da pressão ao longo do teste. A pressão dentro da câmara vai aumentando até que o tubo colapse.

O momento em que o tubo é colapsado é caracterizado por um forte ruído e em seguida ocorre uma sensível queda de pressão no interior da câmara. Assim com a queda de pressão observada o teste é finalizado e a pressão hidrostática é aliviada. A câmara é esvaziada e o tubo é retirado para inspeção visual.

Caso a impermeabilização seja ineficaz e a pressão atue diretamente na superfície metálica do tubo devido à penetração da água ao longo da camada de material compósito, o tubo interno de alumínio irá colapsar a uma pressão inferior. Esta pressão resultante é definida sem a contribuição da camada de material compósito. O tubo metálico colapsa no modo de falha do tipo U devido à restrição imposto pela camada de material compósito que permanece intacta. Este tipo de falha é mostrado na figura 31.



Figura 31: Modo de falha do tipo U devido à ausência de proteção externa.

Nas tabelas 7 e 8 são apresentados os dados experimentais dos modelos reduzidos a serem testados na câmara hiperbárica. Na tabela 7 são mostrados as espessuras iniciais dos modelos, a espessura da camada de compósito (t_c), t_c/t_o , a percentagem de fibra e a pressão de colapso.

Tubo	Espessura Inicial (t_o)	Espessura do Compósito (t_c)	t_c/t_o	Porcentagem de Fibra (%)	Pressão de Colapso (Psi)
A	2,17	4,47	2,06	63,2	684,29
B	2,18	4,96	2,28	60,5	559,77
C	2,19	5,32	2,43	66	791,88
D	2,19	5,22	2,38	67,7	915,88
E	2,21	1,52	0,69	68,43	549,00
F	2,20	1,75	0,79	67,99	518,00

Tabela 7: Dados experimentais dos tubos

Tubo	Ξ_o (%)	Diâmetro do Tubo Inicial D_o (mm)	Tubo Inicial Δ_o (%)	Diâmetro do Tubo Laminado D_L (mm)	Tubo Laminado Δ_F (%)
A	5,69	76,32	0,29	85,26	0,56
B	6,35	76,31	0,30	86,23	1,38
C	5,67	76,32	0,32	86,97	0,36
D	6,53	76,31	0,28	86,75	0,38
E	5,74	76,32	0,33	79,35	0,17
F	6,74	76,32	0,33	79,79	0,05

Tabela 8: Dados experimentais complementares dos tubos



Figura 32: Seção transversal colapsada do tubo A



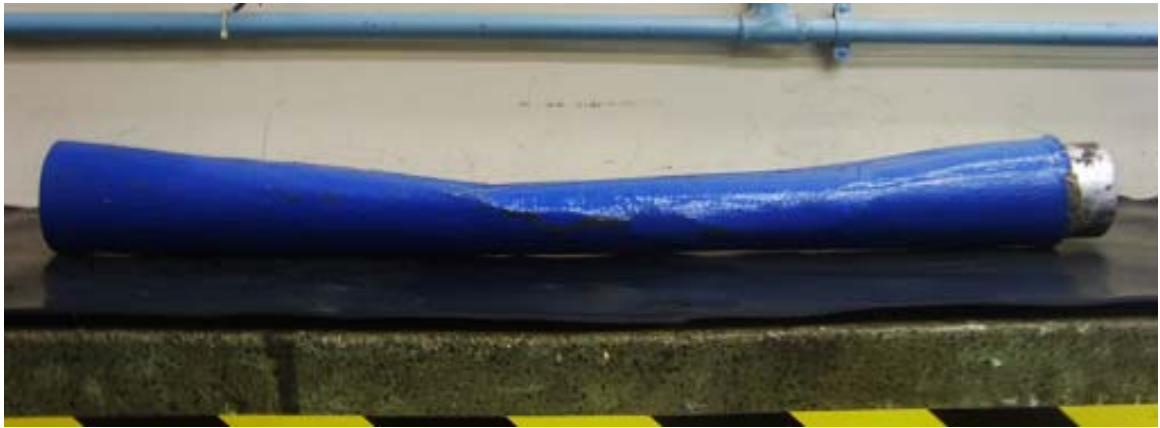
a) Tubo A



b) Tubo B



c) Tubo C



d) Tubo D



e) Tubo E



f) Tubo F

Figura 33: Configuração dos Tubos Colapsados

Na figura 33, são apresentados à vista lateral dos modelos reduzidos colapsados pelo modo de falha flat, no qual o compósito falha após o limite de carga, à medida que a seção transversal achata e as deformações de flexão tornam-se excessivas.

O modo flat, também conhecido como osso de cachorro (*dogbone*), é o modo de colapso típico de dutos rígidos metálicos, caracterizado por um achatamento da seção com aproximadamente dois planos ortogonais de simetria da seção. A visão frontal deste modo de falha é ilustrada na figura 32. Este modo de falha foi observado em todos os modelos colapsados neste projeto.

Na figura 34 é apresentado o resultado do teste de colapso de todos os modelos reduzidos, com exceção do tubo E, pois os dados do teste deste tubo foram perdidos devido à mudança do sistema de aquisição de dados. No gráfico acima da pressão de colapso versus o tempo em segundos, os modelos reduzidos com maior tc/t obtiveram maior pressão de colapso como era esperado, com exceção do tubo B.

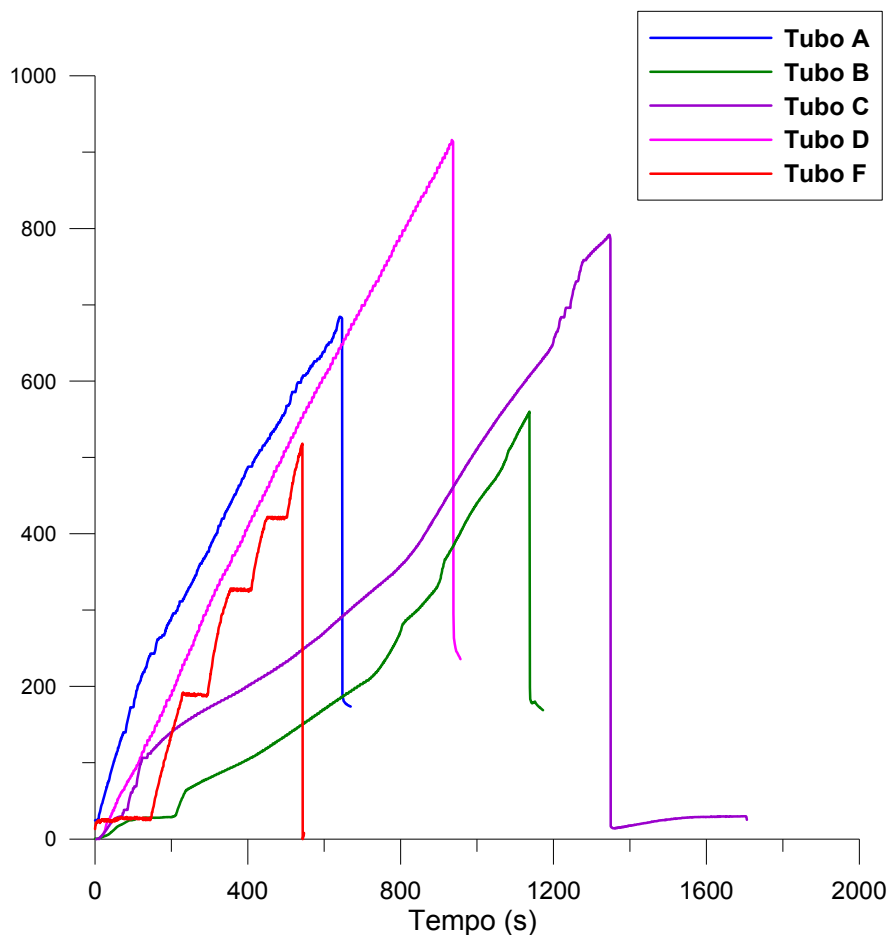


Figura 34: Resultado do Teste de Colapso

Na figura 35, é mostrado o gráfico das pressões de colapso do compósito (P_c) dividido pela pressão de colapso do tubo de alumínio (P) versus t_c/t , e foi incluído em um espaço separado o percentual de fibras de cada tubo para melhor avaliação dos resultados. A pressão de colapso do tubo de alumínio foi obtida através de dados experimentais de trabalhos anteriores e a partir de uma média entre os valores resultantes. Esta pressão foi estimada em 476,75 psi. Os testes para obtenção da pressão do tubo de alumínio também foram realizados em câmara hiperbárica.

A partir da análise do gráfico foi constatada a tendência de aumento da pressão de colapso com o aumento da espessura do compósito, porém para a definição de uma curva será necessária a fabricação de mais modelos reduzidos e a realização de mais testes de colapso.

A partir da avaliação do gráfico é possível comprovar a dependência da pressão de colapso com a percentagem de fibra, a espessura do compósito e com a qualidade do laminado, na qual quanto maior e melhor forem essas propriedades, maior será o valor da pressão de colapso.

O tubo D obteve a pressão de colapso maior que o tubo C, apesar de o tubo C ter a maior t_c/t . Porém o tubo D possui maior percentagem de fibra, tendo assim uma resistência estrutural maior. A mesma situação é observada para os tubos E e F, porém os valores da pressão resultante dos dois tubos ficaram bem próximos, onde a menor t_c/t do tubo E em comparação ao tubo F foi compensada pelo maior percentual de fibra presente no tubo E.

O resultado do tubo B foi o que mais divergiu do padrão observado para os outros modelos, pois o tubo B apresenta uma pressão de colapso bem próxima as dos tubos E e F que possuem uma t_c/t bem inferior a sua. Porém a laminação do tubo B não foi bem sucedida, deixando o tubo B com imperfeições na direção circunferencial prejudicando assim a resistência deste tubo no teste de colapso.

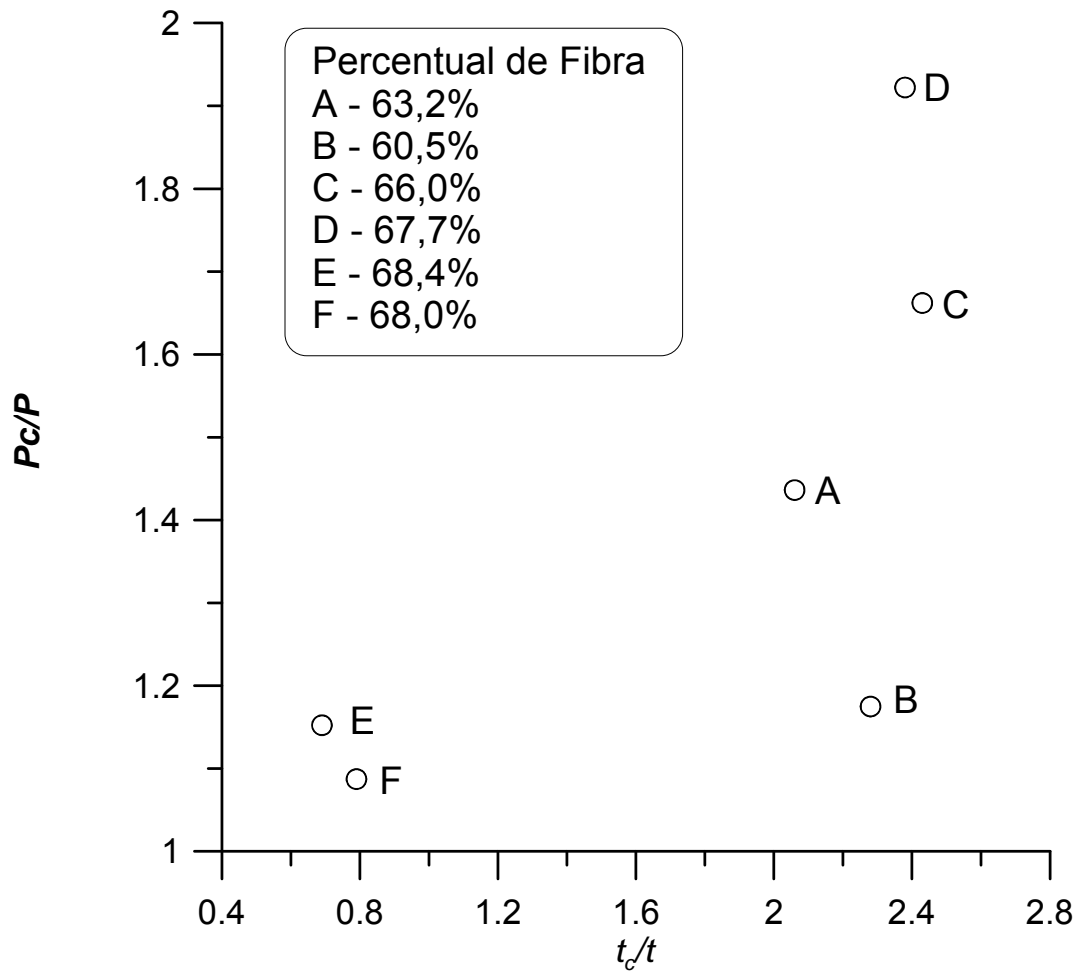


Figura 35: Gráfico de P_c/P versus t_c/t

4. Conclusão

O desempenho estrutural de dutos metal-compósito sob carregamento de pressão hidrostática foi investigado através da realização de testes experimentais de colapso. De acordo com os resultados experimentais obtidos na câmara hiperbárica, conclui-se que a pressão de colapso dos modelos reduzidos de dutos metal-compósito depende linearmente da espessura da camada de compósito escolhida para cada tubo, da qualidade da laminação e da porcentagem de fibra, no qual o aumento de uma destas propriedades resulta em uma pressão de colapso maior.

Em contrapartida, a ovalização e a excentricidade calculadas para os tubos de alumínio seguinte as fórmulas 1 e 2 respectivamente, são inversamente proporcionais a pressão de colapso, no qual os tubos com menor Δo e/ou Ξo , apresentaram maior pressão de colapso como pode ser observado nas tabelas 7 e 8.

O tubo D apresentou a maior pressão de colapso com 915,88 psi, apesar de não ter a maior espessura de compósito, sua T_c é igual a 5,22 mm, enquanto o tubo C tem T_c igual a 5,32 mm, porém o Tubo D possui a maior porcentagem de fibra. Portanto, a porcentagem de fibra representa uma grande contribuição na resistência ao colapso.

A influencia da qualidade da laminação pode ser comprovada no resultado do tubo B, pois durante a aplicação do vácuo, o laminado formou ondulações na superfície da camada de compósito, assim após o processo de cura foi observado que a superfície do compósito não ficou totalmente lisa. Assim o tubo B apresentou uma pressão de colapso (559,77 psi) inferior ao tubo A (684,29 psi) cuja laminação foi perfeita apesar de o tubo A ter sua t_c menor que o tubo B.

Em todos os testes de colapso realizados foi observado que a ovalização do modelo é acentuada na região central e que ocorreu um descolamento da fibra ao longo do comprimento do modelo na região colapsada. Nas figuras 31 e 32 são ilustradas a seção transversal e a configuração lateral do tubo laminado após o colapso.

Por fim, os resultados dos testes de colapso mostraram que a camada de material compósito aumenta significativamente o desempenho sob pressão hidrostática do duto metal-compósito, quando comparado com o tubo de alumínio de parede simples.

Este trabalho de pesquisa forneceu resultados experimentais de pressão de colapso de dutos metal-compósito, que possibilitará a calibração de futuros programas numéricos desenvolvidos para simular o comportamento estrutural de dutos metal compósitos, que permitam a otimização desta concepção.

Os testes de tração e de compressão promoveram a caracterização experimental das propriedades mecânicas do compósito, como tração, deformação e módulo de elasticidade. Essas propriedades mecânicas resultantes serão necessárias como dados de entrada para modelos teóricos e futuras correlações entre resultados numéricos e experimentais.

A validação dos modelos numéricos será útil para o estudo do duto metal-compósito quando sujeito a outros tipos de carregamento (ex. flexão combinada com pressão, tração, torção, etc).

5. Referências Bibliográficas

- PORCIÚNCULA, S. L., RIBEIRO, J. E. D., GONCALVES, R. C. F. Marlim field: risers, flowlines and umbilicals developed. In: OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE, 1999. Proceedings....Houston: Offshore Technology Conference, 1999. v. 2, p. 87-103
- OLIVEIRA Jr., S.C., 2006, “Estudo Numérico-Experimental de Dutos Metal-Compósito sob Carregamento de Pressão Hidrostática”, Dissertação de Doutorado, COPPE/ Universidade do Federal Rio de Janeiro.
- SOUZA, DANIEL MAX BUCCONI PEREIRA, 2006, “Análise dos Métodos de Lançamento de Dutos Rígidos para Diferentes Profundidades”, Projeto de Graduação, COPPE/ Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- NETTO, T.A, PASQUALINO, I.P.,NETTO, F.A., 2008, “Collapse Mechanism of Unbounded Metal-Composite Pipes Under Hydrostatic Pressure”. In: ASME 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering.