

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

PPGE3M

EFEITO DO DANO CAUSADO POR FADIGA DE BAIXO CICLO SOBRE O  
DESEMPENHO A FADIGA DE ALTO CICLO EM TUBOS DE AÇO SUPERDUPLEX  
UNS 32750 APLICADOS EM UMBILICAIS SUBMARINOS

Yonathan Reboh

Dissertação para obtenção do título de Mestre  
em Engenharia

Porto Alegre  
2014

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

PPGE3M

EFEITO DO DANO CAUSADO POR FADIGA DE BAIXO CICLO SOBRE O  
DESEMPENHO A FADIGA DE ALTO CICLO EM TUBOS DE AÇO SUPERDUPLEX  
UNS 32750 APLICADOS EM UMBILICAIS SUBMARINOS

Yonathan Reboh  
Engenheiro Mecânico

Trabalho realizado no Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais

Porto Alegre  
2014

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração em Ciência e Tecnologia dos Materiais, e aprovada em sua forma final, pelo orientador e pela Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker

Banca Examinadora:

Dr. Carlos Alberto Duarte de Lemos, CENPES PETROBRAS

Dr. Toni Roger Schifelhain de Lima, FAURGS

Prof. Dr. Thomas Gabriel Rosauo Clarke, PPGE3M/UFRGS

Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker  
Coordenador do PPGE3M

*Dedico este trabalho a todas as pessoas que participaram diretamente e indiretamente na sua construção*

## **AGRADECIMENTOS**

À minha família e amigos por estarem sempre ao meu lado e especialmente pelo apoio e incentivo incessante.

Aos professores Telmo Roberto Strohaecker, Sandro Griza e Afonso Reguly por todos os ensinamentos, orientações e apoio.

Aos colegas e amigos Fernando Buscacio, William Albuquerque, André Athayde e Lea Margarida por todos os conhecimentos passados.

Aos amigos Leandro Finzetto e Paulo Nascimento pela disponibilização das amostras utilizadas neste trabalho e de importantes informações sobre o projeto dos tubos metálicos.

Aos colegas Bill Paiva, Cláudio Almirón e Fabiano Mattei pelo apoio direto na realização deste trabalho.

A todos os colegas do Laboratório de Metalurgia Física da UFRGS pelo companheirismo.

## RESUMO

O uso de tubos metálicos como componentes integrantes de umbilicais submarinos vem apresentando uma tendência de crescimento na costa brasileira. Apesar de ser uma tecnologia madura, já difundida em outras regiões de produção de petróleo em mar no mundo, o ineditismo de sua aplicação no Brasil traz a necessidade de se estudar algumas questões específicas na busca de se garantir a adequada implementação da tecnologia. Um dos aspectos peculiares à costa brasileira diz respeito ao tipo de embarcações especializadas à instalação dos umbilicais. Tomando-se a instalação de um umbilical típico de tubos metálicos sendo feita por estas embarcações observa-se uma condição bastante severa de processo de fadiga de baixo ciclo nos tubos. Trabalhos vem sendo feitos para se estudar o efeito da fadiga de baixo ciclo no desempenho a fadiga de alto ciclo destes tubos, entretanto, nenhum trabalho foi específico para o tipo de regime de fadiga de baixo ciclo que aparece no cenário de instalação da costa brasileira.

Neste trabalho foi proposto um método de teste para se simular, em amostras em laboratório, este regime específico de dano de fadiga de baixo ciclo. Após a aplicação deste dano as amostras foram submetidas a um regime de fadiga de alto ciclo para construção de curvas SN e comparação com as curvas disponíveis na literatura. Para a determinação dos carregamentos impostos aos umbilicais e tubos metálicos foram definidos dois cenários de profundidade (lâmina d'água) e condições ambientais típicos de instalações de umbilicais na costa brasileira. Para determinação das deformações sofridas pelos tubos metálicos foi utilizado um software dedicado a este tipo de análise e que emprega o método de elementos finitos. Nas simulações do software foram utilizadas curvas Tensão-Deformação obtidas de 6 amostras de tubos ensaiadas. O universo de amostras utilizado para os testes em laboratório, simulando o dano à fadiga de baixo ciclo e construção das curvas SN, foi de 15 amostras com espessura de parede de 1,1mm sem solda e 14 amostras com espessura de parede de 1,3mm com solda circunferencial. A aplicação do dano à fadiga de baixo ciclo foi feita utilizando-se o método de teste de flexão em quatro pontos. Para a construção das curvas SN foi utilizado método de fadiga axial. Após o teste de fadiga axial algumas das amostras foram selecionadas para caracterização das superfícies de fratura. Os resultados dos testes indicaram que, apesar do dano de fadiga de baixo ciclo ser em regime bastante diferente dos estudos disponíveis na literatura, o desempenho à fadiga de alto ciclo dos tubos não apresentou queda quando comparado com estes estudos.

## **ABSTRACT**

The use of steel tubes in subsea umbilicals is showing a continuous growth in offshore Brazil. Although steel tubes are a mature technology in other offshore oil production areas abroad, its ineditism in Brazil brings the necessity of verifying some local specific characteristic to guarantee its adequate implementation. One of these specific characteristics is regarding the umbilical installation fleet. Taking one typical steel tube installation by one of those vessels one can found a very severe low cycle fatigue condition. Studies have been made for understanding the effect of low cycle fatigue in the high cycle fatigue behavior of steel tubes for umbilicals, but, no specific study on the low cycle fatigue regime that figures on brazilian coast installation scenario.

This work proposed a test method for simulating, in samples in laboratory, this specific regime of low cycle fatigue, and after imposing this damage the samples was subjected to a high cycle fatigue regime in order to build SN curves and to compare with the curves presented in the literature. For determining the loads imposed to umbilicals and steel tubes two typical installation scenarios of water depth and environmental data was defined. For determining strains on steel tubes it was used a specific finite element method software. On the software simulation it was used 6 stress-strain curves obtained of 6 steel tube samples testes. The sampling universe for the laboratory tests, for simulating the low cycle fatigue and SN curves build, was 15 samples of 1,1mm wall thickness without weld tubes and 14 samples of 1,3mm wall thickness with weld tubes. The low cycle fatigue regime was performed in a four point bending apparatus and axial fatigue test was used for the SN curves. After axial fatigue test some samples were selected for fracture characterization. The tests results indicated that, although low cycle fatigue regime been different to studies in the literature, the steel tubes didn't show detrimental effects on high cycle fatigue resistance when compared to these studies.

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO .....	1
1.1.	OBJETIVO.....	3
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1.	UMBILICAIS SUBMARINOS.....	4
2.2.	COMPONENTES FUNCIONAIS .....	6
2.2.1.	Mangueiras Poliméricas para Controle Hidráulico.....	6
2.2.2.	Mangueiras Poliméricas com Camada Metálica Resistente ao Colapso .....	8
2.2.3.	Tubos Metálicos .....	9
2.2.4.	Cabos Elétricos e Cabos Óticos.....	10
2.3.	TIPOS DE UMBILICAIS .....	11
2.3.1.	Umbilicais Termoplásticos <i>TPUs (Thermoplastic Umbilicals)</i> .....	12
2.3.2.	Umbilicais de Tubos Metálicos <i>STUs (Steel Tube Umbilicals)</i> .....	13
2.4.	FADIGA DE BAIXO CICLO EM UMBILICAIS DO TIPO <i>STU</i> .....	15
2.4.1.	Fabricação dos <i>STUs</i> .....	15
2.4.1.1.	Fabricação dos Tubos Metálicos .....	16
2.4.1.2.	Reunião dos Componentes Funcionais.....	19
2.4.1.3.	Manuseio Durante a Fabricação .....	19
2.4.2.	Instalação dos <i>STUs</i> .....	20
2.4.3.	Considerações de Projeto .....	24
2.4.4.	Comportamento Cíclico do Aço UNS 32750 .....	27
3.	METODOLOGIA E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....	29
3.1.	DEFINIÇÃO DAS BASES PARA A METODOLOGIA .....	30
3.2.	DEFINIÇÃO DOS CENÁRIOS DE INSTALAÇÃO .....	31
3.3.	DEFINIÇÃO DOS UMBILICAIS .....	32
3.4.	DETERMINAÇÃO DOS CARREGAMENTOS GLOBAIS DE INSTALAÇÃO DOS UMBILICAIS 33	
3.5.	DETERMINAÇÃO DOS ESFORÇOS LOCAIS NOS TUBOS METÁLICOS NA INSTALAÇÃO DOS UMBILICAIS.....	35
3.5.1.	Obtenção das Curvas Tensão-Deformação.....	35
3.5.2.	Modelamento dos Umbilicais e Casos de Carregamento .....	36
3.6.	Definição de Método e Parâmetros dos Testes e Amostragem .....	38
3.6.1.	Determinação de Método e Parâmetros de Teste para Fadiga de Baixo Ciclo .....	38
3.6.2.	Construção do Dispositivo de Flexão em quatro pontos .....	39
3.6.3.	Instrumentação de Amostras para Calibração dos Controles de Teste .....	40
3.6.4.	Determinação de Método e Parâmetros de Teste para Fadiga de Alto Ciclo .....	41
3.6.5.	Execução de Testes Exploratórios para Verificação Inicial da Metodologia .....	41
3.6.6.	Definição de Amostragem para Construção das Curvas SN .....	42
3.7.	CARACTERIZAÇÃO DAS SUPERFÍCIES DE FRATURA .....	43
3.8.	CONSTRUÇÃO DAS CURVAS SN.....	43
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	45
4.1.	Curvas tensão-deformação .....	45
4.2.	Determinação dos esforços locais nos tubos metálicos durante a instalação dos umbilicais.....	48
4.3.	Testes exploratórios para verificação inicial da metodologia.....	56
4.3.1.	Testes de Calibração.....	56
4.3.2.	Testes exploratórios.....	58
4.4.	Execução do programa de testes e resultados.....	60
4.5.	Caracterização das superfícies de fratura .....	62
4.6.	Construção das curvas SN.....	64
5.	CONCLUSÕES.....	69
6.	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS .....	70
	REFERÊNCIAS .....	71



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 – Exemplo de um umbilical submarino. Fonte: Autor .....	5
Figura 2-2: Mangueira termoplástica. Fonte: Adaptada de Almeida (2003).....	7
Figura 2-3: Mangueira <i>HCR</i> . Fonte: Adaptada de Almeida (2003) .....	9
Figura 2-4: Tubos metálicos sem costura utilizados em umbilicais submarinos. Fonte: Sandvik S.A. ....	10
Figura 2-5: Seção de um umbilical composto por cabo de potência tripolar, cabo ótico e 10 mangueiras de controle. Fonte: Autor .....	11
Figura 2-6: Umbilical do tipo <i>TPU</i> e identificação das armaduras de tração. Fonte: Adaptada de Almeida (2003) .....	13
Figura 2-7: Imagem (a) mostra um <i>STU</i> armado e a imagem (b) mostra um <i>STU</i> não armado. Fonte: Autor.....	14
Figura 2-8: Fluxograma típico de fabricação de um <i>STU</i> .....	16
Figura 2-9: Rota de fabricação de tubos metálicos sem costura. Fonte: Sandvik S.A. ....	18
Figura 2-10: Reunidora horizontal (a) e reunidora vertical (b). Fonte: Adaptadas de Almeida (2003) .....	19
Figura 2-11: Imagem (a) mostrando uma bobina em fábrica e imagem (b) mostrando uma cesta de transporte. Fonte: Adaptadas de Almeida (2003) .....	20
Figura 2-12: Imagem esquemática de uma operação de extrusão de capa. O umbilical passa da bobina emissora para a receptora. Fonte: Adaptada de Almeida (2003).....	20
Figura 2-13: <i>PLSV</i> com sistema <i>HLS</i> . Fonte: Autor.....	21
Figura 2-14: Exemplos de tensionadores. Fontes: Autor .....	22
Figura 2-15: Fotos em detalhe de polias de popa. Fontes: Adaptadas de Almeida (2003) .....	22
Figura 2-16: <i>PLSV</i> com sistema <i>VLS</i> . Fonte: Erik Azevedo .....	23
Figura 3-1: Fluxograma geral das atividades .....	30
Figura 3-2: Seção transversal definida para os estudos. Fonte: Autor .....	32
Figura 3-3: Fluxograma das atividades .....	35
Figura 3-4: Fluxograma das atividades .....	38
Figura 3-5: Dispositivo de flexão em quatro pontos desenvolvido para os testes. Imagem (a) mostra a concepção para fabricação e a imagem (b) mostra o dispositivo em teste. Fontes: Autor.....	40

Figura 3-6: Tubos instrumentados para calibração do ensaio de flexão. Fonte: Autor.....	41
Figura 4-1: Curvas Tensão-Deformação obtidas nos ensaios de tração.....	46
Figura 4-2: Comparação entre as curvas obtidas nos ensaios de tração e as utilizadas nos modelamentos numéricos.....	46
Figura 4-3: Curvas utilizadas nos modelamentos.....	47
Figura 4-4: Máquina e dispositivo utilizados nos testes mostrados na imagem (a) e uma amostra de tubos após ensaio mostrado na figura (b). Fontes: Autor.....	48
Figura 4-5: Resultados de tensão máxima das análises numéricas.....	52
Figura 4-6: Montagem utilizado para o ensaio de flexão em quatro pontos. Fonte: Autor.....	56
Figura 4-7: Imagens (a) e (b) mostram trinca observada em ensaios preliminares. Fontes: Autor.....	57
Figura 4-8: Imagem (a) mostrando dispositivo inicialmente utilizando roletes metálicos e imagem (b) mostrando alteração para os roletes poliméricos. Fontes: Autor.....	57
Figura 4-9: Imagens mostrando em detalhe o sistema de travamento de giro dos tubos. Fontes: Autor.....	58
Figura 4-10: Imagem (a) mostrando falha do tubo na região das garras e imagem (b) mostrando a amostra novamente posta em teste. Fontes: Autor.....	60
Figura 4-11: Exemplo de amostra com ruptura na região de interesse após ajustes no dispositivo de teste. Fonte: Autor.....	61
Figura 4-12: Imagens em lupa de baixo aumento das superfícies de fratura. Fonte: Autor.....	62
Figura 4-13: Fractografias obtidas em MEV mostrando pontos de iniciação de trinca de fadiga e micromecanismos presentes nas superfícies de fratura. Fonte: Autor.....	64

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3-1: Cenários definidos para avaliação.....	31
Tabela 3-2: Parâmetros considerados para os cálculos de instalação.....	34
Tabela 3-3: Plano de testes para obtenção das curvas Tensão-Deformação .....	36
Tabela 3-4: Dados dos modelos analisados .....	37
Tabela 3-5: Programa de testes exploratórios.....	42
Tabela 3-6: Programa de testes para construção das curvas SN.....	43
Tabela 4-1: Correlação Tensão-Deformação no escoamento para as curvas .....	47
Tabela 4-2: Resultados das análises numéricas .....	55
Tabela 4-3: Cálculo de APS para os modelos analisados.....	55
Tabela 4-4: Resultados dos testes de fadiga flexão em quatro pontos exploratórios .....	58
Tabela 4-5: Resultados dos ensaios completos exploratórios .....	59
Tabela 4-6: Comparação dos resultados dos testes exploratórios com a expectativa de vida apresentada na DNV RP-C203 .....	59
Tabela 4-7: Resultados dos testes de fadiga de alto ciclo.....	61
Tabela 4-8: Dados das curvas construídas.....	65

## 1. INTRODUÇÃO

O ano de 2006 marcou o início de um novo rumo na produção de petróleo no Brasil com a implantação do Plano de Antecipação de Produção de Gás (PLANGAS). Este plano foi criado com objetivo de suprir a crescente demanda de gás natural com produção local. Diminuindo, desta forma, a dependência de importações e minimizando os impactos das flutuações externas.

Como desdobramento do PLANGAS novas áreas de produção em mar foram priorizadas e juntamente com esta novas áreas foi necessário desenvolver novas tecnologias de produção e incorporar tecnologias já utilizadas em outras regiões no mundo mas inéditas na costa brasileira.

Um dos equipamentos do sistema submarino de produção para o qual foi necessário se aplicar uma tecnologia ainda não empregada em escala no Brasil foi o chamado umbilical submarino. Este equipamento é utilizado para interligação da plataforma de produção com os demais equipamentos instalados no leito marinho e possibilitar o seus controles remotamente.

Historicamente os umbilicais submarinos empregados na costa brasileira são fabricados com mangueiras poliméricas para o transporte dos fluidos de controle hidráulico dos equipamentos submarinos e mangueiras poliméricas resistentes ao colapso para o transporte de produtos químicos. Com a introdução de alguns campos de gás natural de alta pressão veio a necessidade de se substituir as tradicionais mangueiras poliméricas por tubos metálicos. Como toda a cultura de produção e recursos fabris presentes na época estavam voltados para umbilicais com mangueiras poliméricas a introdução deste novo produto iniciou uma série de desenvolvimentos e adaptações estruturais e de projeto que vieram em ritmo compatível com as necessidades do Plano.

O descobrimento de grandes jazidas de petróleo na costa brasileira em lâminas d'água ultra profundas e com pressões de reservatório mais elevadas, em uma nova camada geológica denominada de Pré-Sal, sinalizou para uma possível necessidade de se dispor da solução tecnológicas de umbilicais com tubos metálicos em maior escala. Esta disponibilização de tecnologia carrega obrigatoriamente um trabalho maciço de ajuste dos recursos de produção e instalação e, principalmente, a nacionalização do conhecimento sobre o projeto da tecnologia.

É intuitivo perceber que os processos de fabricação, manuseio, instalação e operação de um produto composto por mangueiras poliméricas são bastante distintos quando comparados com os utilizados em um produto composto por tubos metálicos. Como consequência são esperadas também diferenças de requisitos e critérios de projeto. Uma

diferença bastante pronunciada entre as duas tecnologias, e objetivo de estudo deste trabalho, é a abordagem dada ao projeto à fadiga. Olhando-se todos os processos pelos quais um umbilical de tubos metálicos passa até o início de sua operação, vê-se que, inevitavelmente, os tubos acabam sendo submetidos a eventos com alto nível de deformação, em muitos casos ultrapassando o limite elástico do material. Esta característica inerente às limitações de fabricação e projeto dos umbilicais com tubos metálicos resulta em um fenômeno de fadiga de baixo ciclo antes mesmo de o umbilical iniciar efetivamente seu papel na produção do campo de petróleo. Após sua instalação, o umbilical passará a ser submetido a um regime predominantemente de fadiga de alto ciclo. Por se tratar de um regime de fadiga de baixo ciclo, o entendimento de seu consumo de vida e sua relação com o desempenho à fadiga de alto ciclo não são tarefas triviais. Para as áreas de produção aonde esta tecnologia já vem sendo empregada a mais tempo foram incorporados recursos de fabricação, manuseio e instalação adequados aos critérios de projeto sedimentados nestas regiões. Na introdução desta tecnologia na costa brasileira assumiu-se o caminho de não somente trazer tais recursos, à exemplo de outras regiões, mas também buscar condicionar os projetos aos recursos aqui já existentes. Esta iniciativa acabou gerando a necessidade de se estudar novas condições de projeto.

Dentre as novas condições específicas da costa brasileira a principal diz respeito aos recursos de instalação dos umbilicais. Muitos dos navios operando no Brasil foram concebidos para o manuseio e instalação de umbilicais compostos de mangueiras poliméricas. Quando, à luz dos critérios atuais de projeto, estes navios são considerados para instalação de umbilicais com tubos metálicos chega-se a condições tão restritivas que não raramente impossibilitam a operação. Criou-se então uma oportunidade de ganho de conhecimento na busca de se verificar se são os critérios de projeto aplicados atualmente que colocam este cenário de instalação em uma posição restritiva ou se realmente a instalação de umbilicais com tubos metálicos por navios concebidos para instalar umbilicais com mangueiras poliméricas resulta em danos tão severos que a operação fica inviabilizada. Este trabalho se dispõe a iniciar uma avaliação deste cenário descrito através de uma proposta de metodologia de teste e em cima dos resultados discutir os limites hoje aceitos pela indústria.

## 1.1. OBJETIVO

Este trabalho tem dois principais objetivos:

- a. Estudar o efeito do dano causado por um regime de fadiga de baixo ciclo sobre o desempenho a fadiga de alto ciclo em tubos de aço super duplex UNS 32750 utilizados em umbilicais submarinos;
- b. Avaliar a aplicabilidade do ensaio de fadiga por flexão em quatro pontos para simulação do regime de fadiga de baixo ciclo em tubos de aço utilizados em umbilicais submarinos;

A primeira parte do trabalho é focada na análise teórica para se determinar os esforços impostos a um umbilical submarino típico durante uma operação de instalação em um cenário característico da costa brasileira. Os requisitos utilizados para o projeto do umbilical bem como para os parâmetros simulados na instalação, como as características da embarcação e as condições meteoceanográficas, foram baseados em especificações técnicas da Petrobras. Para a determinação dos esforços impostos aos tubos metálicos foi utilizado o software UFlex (EKEBERG, 2006) que é uma ferramenta específica para este tipo de análise e que utiliza o método dos elementos finitos.

A segunda parte do trabalho consiste em submeter amostras de tubos metálicos aos carregamentos obtidos na primeira parte do trabalho. Esta parte experimental pode ser subdividida em duas etapas, a primeira sendo em regime de fadiga de baixo ciclo, imposição do dano previsto durante a instalação do umbilical, e a segunda em regime de fadiga de alto ciclo, com objetivo de se construir curvas SN de projeto.

A terceira parte do trabalho aborda os tratamentos necessários aos dados experimentais, a comparação com curvas de projeto disponíveis e as discussões sobre a metodologia experimental utilizada.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. UMBILICAIS SUBMARINOS

Os umbilicais submarinos podem ser definidos de uma forma geral como cabos compósitos, formados por um conjunto de elementos funcionais e elementos estruturais, utilizados para interligar os diversos componentes do sistema submarino de produção e possibilitar que os equipamentos submarinos sejam controlados remotamente, podendo ser de uma unidade de produção instalada em mar ou uma unidade de controle instalada em terra.

Os umbilicais podem ter desde quilômetros de comprimento quando aplicados para interligação de equipamentos distantes das unidades de produção até comprimentos relativamente pequenos, da ordem de algumas dezenas de metros, para interligação curta entre equipamentos.

Como todo equipamento submarino, para o qual as atividades de inspeção e manutenção são extremamente custosas e de difícil execução, os umbilicais devem ser altamente confiáveis e para se garantir esta alta confiabilidade é necessário o máximo de conhecimento sobre o comportamento de cada um de seus componentes ao longo de sua vida.

As principais funções desempenhadas pelos umbilicais para o sistema submarino são:

- Condução de potência hidráulica para atuação de válvulas presentes nos equipamentos submarinos;
- Transporte de produtos químicos a serem injetados em pontos específicos da malha submarina para auxiliar, ou até mesmo viabilizar, o escoamento da produção.
- Condução de sinal elétrico ou ótico para comunicação com sensores e sistemas de controle presentes nos equipamentos submarinos;
- Condução de potência elétrica para alimentação de sistemas de bombeio submarino ou para interligação entre unidades de produção;

Observando-se uma seção transversal típica de um umbilical submarino é possível diferenciar os diversos elementos presentes em duas classes principais de componentes, a primeira classe sendo a dos chamados componentes funcionais e a segunda classe a dos chamados componentes estruturais. A Figura 2-1 apresenta um exemplo de um umbilical com a indicação dos componentes presentes e na sequência deste capítulo serão detalhadas as aplicações e diferenças entre as duas classes.

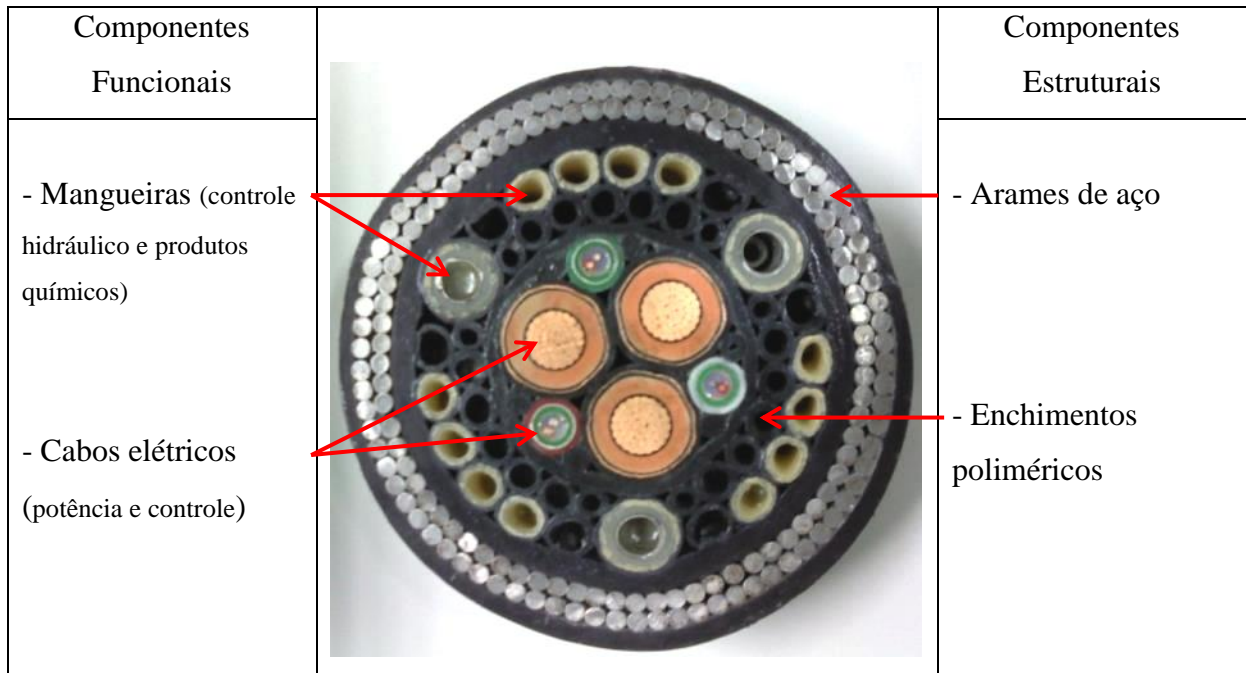


Figura 2-1 – Exemplo de um umbilical submarino. Fonte: Autor

Os chamados componentes funcionais são todos aqueles que desempenham uma função específica para o sistema submarino de produção, enquanto os componentes estruturais são os que desempenham função estrutural para o umbilical. No Capítulo 2.2 os principais componentes funcionais utilizados nos umbilicais atualmente serão apresentados de forma mais detalhada.

Os componentes funcionais quando considerados em termos de sua aplicação para o sistema submarino podem ser subdivididos da forma seguinte:

- Condução de fluídos:
  - Mangueiras Poliméricas para controle hidráulico
  - Mangueiras Poliméricas com camada metálica resistente ao colapso para transporte de produtos químicos
  - Tubos metálicos para controle hidráulico e transporte de produtos químicos
- Transmissão de sinal e/ou potência elétrica:
  - Cabos elétricos de baixa potência
  - Cabos elétricos de média potência
- Transmissão de sinal ótico:
  - Cabos óticos



Quando considerados em termos dos principais esforços aos quais são destinados a resistir os principais componentes estruturais podem ser subdivididos da seguinte forma:

- Resistência aos esforços axiais
  - Arames de aço
  - Cabos de aço
  - Fibra de carbono
- Auxiliar na distribuição dos esforços radiais
  - Enchimentos poliméricos
  - Matrizes poliméricas

Alguns conceitos de umbilicais com tubos metálicos também utilizam os tubos como componentes estruturais de forma a otimizar o projeto da seção transversal.

Atualmente o tipo de configuração mais utilizado no projeto dos umbilicais submarino é o de uma seção transversal circular onde os componentes funcionais são posicionados na porção central da seção e os componentes estruturais são dispostos em coroas mais externas. A Figura 2-1 é um exemplo deste tipo de configuração.

De forma a se garantir boa resistência aos grandes esforços axiais impostos aos umbilicais sem comprometer a sua capacidade de absorver esforços de flexão todos os componentes são reunidos em forma helicoidal.

Considerando as particularidades de cada projeto de sistema submarino, que são concebidos para atender condições específicas como profundidade, características regionais de mar e tipos de fluídos produzidos, existe uma grande variedade de combinações de componentes funcionais possíveis, fazendo com que os umbilicais sejam equipamentos com grande diversidade de projetos.

## **2.2. COMPONENTES FUNCIONAIS**

### **2.2.1. Mangueiras Poliméricas para Controle Hidráulico**

São os componentes utilizados para o transporte dos fluídos de controle das válvulas presentes nos demais equipamentos submarinos. Os fluídos são normalmente à base de água com aditivos anticorrosivos, bactericidas e lubrificantes.

A Figura 2-2 apresenta uma mangueira de controle típica com a estratificação das camadas que a compõe.

De sua camada mais interna para a mais externa as mangueiras são comumente construídas conforme descrito abaixo:

1. Tubo interno: Tubo polimérico extrudado normalmente em poliamida (PA) ou polifluoreto de vinilideno (PVDF). Sua função é a contenção do fluido de controle;
2. Camadas de fibras sintéticas trançadas: Geralmente fabricadas em aramida estas camadas são responsáveis por conferir alta resistência a pressão interna.
3. Capa: Tubo polimérico extrudado normalmente em poliuretano (PU) ou polietileno (PE). Tem como funções proteger as camadas de fibras sintéticas contra desgaste e contaminação e promover uma adequada condição de atrito interno entre os componentes.

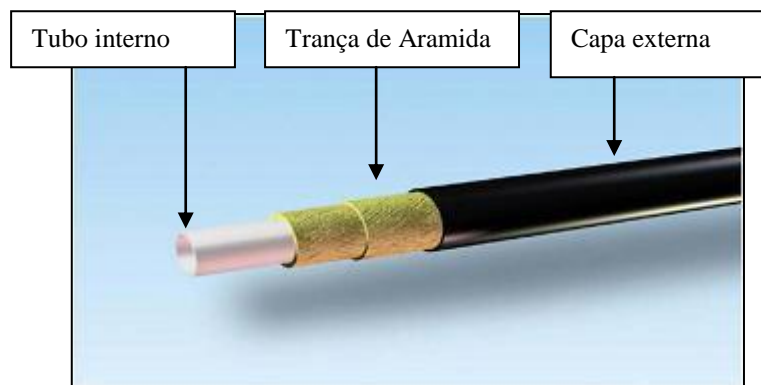


Figura 2-2: Mangueira termoplástica. Fonte: Adaptada de Almeida (2003)

Nota-se que este tipo de mangueira não apresenta nenhuma camada ou elemento estrutural dedicado a suportar esforços de tração ou esforços de compressão radial. Portanto, é imprescindível que o projeto do umbilical submarino garanta baixas transmissões de esforços axiais para as mangueiras e que durante manuseio, instalação e operação elas estejam sempre preenchidas com fluido hidráulico.

Estas mangueiras são normalmente fabricadas com diâmetros internos entre 3/8" e 1/2" e projetadas para operar com pressões internas entre 3000 e 10000 psi.

### 2.2.2. Mangueiras Poliméricas com Camada Metálica Resistente ao Colapso

São os componentes utilizados para o transporte de produtos químicos. As operações de injeção de produtos químicos tem como objetivo auxiliar no escoamento da produção, quando são injetados desemulsificantes, anti-incrustantes e álcoois, e proteger os demais equipamentos submarinos, por exemplo através da injeção de anti-corrosivos e sequestrantes de H<sub>2</sub>S.

Em termos de construção são bastante similares as mangueiras poliméricas para controle hidráulico com a diferença da presença de uma camada metálica intertravada que tem como função conferir resistência a esforços de compressão radial.

Em razão desta resistência a esforços radiais externos esses componentes são comumente chamados de mangueiras *HCR*, onde *HCR* vem do inglês *High Collapse Resistant*.

A Figura 2-3 mostra uma típica mangueira HCR com a estratificação de suas diversas camadas. De sua camada mais interna para a mais externa são construídas conforme descrito abaixo:

1. Carcaça intertravada: Camada fabricada a partir de uma fita metálica que é conformada de modo a se ter uma espiral contínua intertravada. Geralmente fabricada em aço inoxidável AISI 316L. Tem como função conferir resistência às cargas radiais de compressão.
2. Tubo interno: Tubo polimérico extrudado normalmente em poliamida (PA) ou polifluoreto de vinilideno (PVDF) cuja função é a contenção do fluido de controle;
3. Camadas de fibras sintéticas trançadas: Geralmente fabricadas em aramida estas camadas são responsáveis por conferir alta resistência a pressão interna.
4. Capa: Tubo polimérico extrudado normalmente em poliuretano (PU) ou polietileno (PE). Tem como funções proteger as camadas de fibras sintéticas contra desgaste e contaminação e promover uma adequada condição de atrito interno entre os componentes.

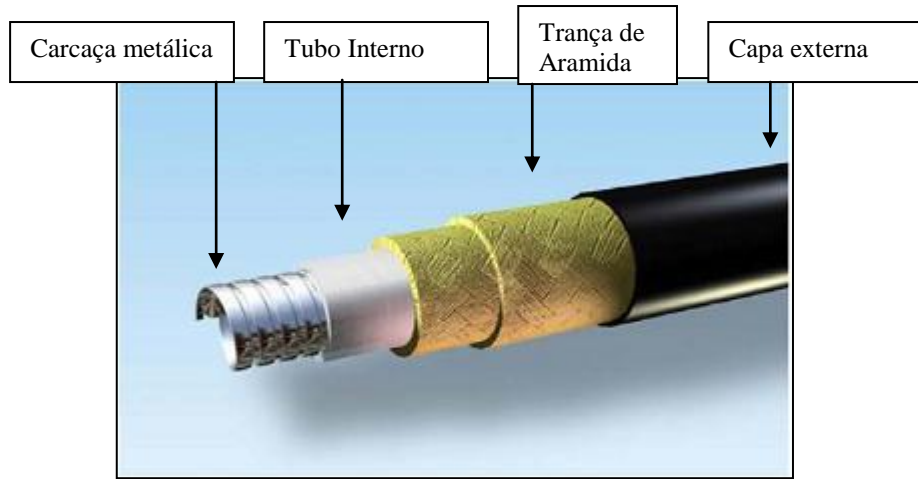


Figura 2-3: Mangueira *HCR*. Fonte: Adaptada de Almeida (2003)

Do mesmo modo que as mangueiras poliméricas de controle as mangueiras *HCR* não tem camadas dedicadas a suportar esforços de tração e o projeto do umbilical deve considerar esta característica. Pela presença da carcaça resistente a esforços radiais de compressão estas mangueiras podem ficar vazias durante o manuseio, instalação e operação do umbilical.

As mangueiras *HCR* são normalmente fabricadas com diâmetros internos entre ½” e 1” polegada e projetadas para operar com pressões internas entre 3000 e 10000 psi.

### 2.2.3. Tubos Metálicos

São componentes que podem ser utilizados para qualquer necessidade de transporte de fluido, atendendo, portanto, tanto as demandas de controle hidráulico como transporte de produtos químicos.

Os tubos metálicos são normalmente fabricados em ligas de aço inoxidável com alta resistência a corrosão. Algumas das principais ligas utilizadas são as das famílias dos aços super duplex e duplex, como por exemplo o UNS 32750 e o Nitronic 19D. Existem também outras soluções que consideram a utilização de tubos em aço carbono com revestimentos anti-corrosivos, como por exemplo o Zinco, porém, são aplicações bastante específicas e pouco utilizadas.

Em razão das grandes limitações que existem para se realizar a inspeção e, se necessário, manutenção destes tubos após a instalação do umbilical submarino, é imprescindível ter-se uma alta confiabilidade para o desempenho mecânico e funcional destes componentes. Atualmente, a solução que atende a esta necessidade de alta confiabilidade é a tecnologia de fabricação de tubos sem costura. Os tubos são normalmente fabricados em varas de comprimento entre 20 metros e 40 metros que são unidos por solda circunferencial até se

atingir os comprimentos finais necessários, que normalmente tem alguns quilômetros de extensão.

Diferente das mangueiras de controle e *HCR* os tubos metálicos são componentes que conjugam boa resistência a esforços axiais e excelente capacidade de absorver esforços radiais de compressão. Estas características são normalmente utilizadas para otimização do projeto do umbilical onde os tubos metálicos passam a ser tanto como componentes funcionais como estruturais.

Em termos de diversidade de diâmetro interno e classe de pressão os tubos metálicos são menos restritivos que as mangueiras poliméricas, sendo normalmente utilizados em diâmetros variando de ¼” até 2 ½” e para pressões de até 15000 psi.

A Figura 2-4 ilustra alguns destes componentes.



Figura 2-4: Tubos metálicos sem costura utilizados em umbilicais submarinos. Fonte: Sandvik S.A.

#### 2.2.4. Cabos Elétricos e Cabos Óticos

Os cabos elétricos de baixa tensão, também chamados de cabos elétricos de controle, são utilizados para alimentação de sensores, transmissão dos sinais e alimentação e comunicação com os sistemas de controle dos equipamentos submarinos. Estes cabos são fabricados com condutores de cobre com bitola normalmente variando de 2,5 mm<sup>2</sup> a 10 mm<sup>2</sup> e em diversas configurações de pares e quadras.

Cabos elétricos trifásicos de média tensão, também chamados de cabos elétricos de potência, são utilizados para alimentação de sistemas de bombeio submarino. Devido a demanda de potência estes cabos são dimensionados com bitolas variando entre 50 mm<sup>2</sup> até 240 mm<sup>2</sup>.

Cabos óticos são normalmente utilizados em substituição aos cabos elétricos de controle quando o volume de dados a ser transmitido é muito grande ou quando existe a possibilidade de haver interferência eletromagnética com outros sistemas, dificultando, ou até mesmo inviabilizando, a transmissão dos dados em cabos de cobre.

A Figura 2-5 mostra uma seção transversal de um umbilical contendo um cabo de potência tripolar, um cabo ótico e 10 mangueiras de controle hidráulico.

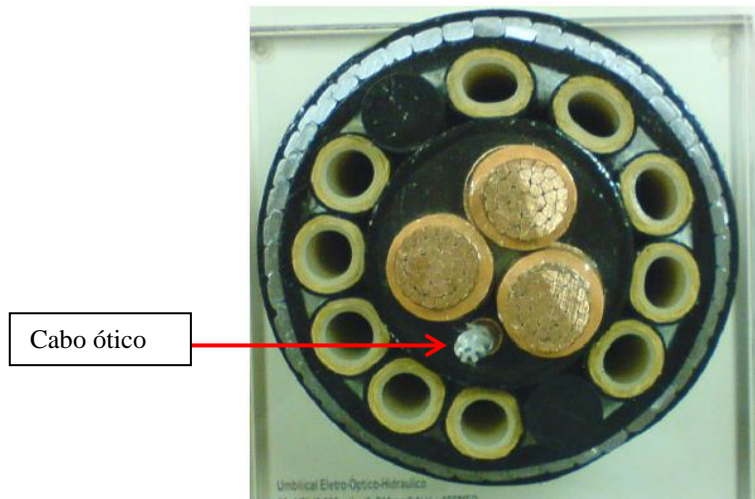


Figura 2-5: Seção de um umbilical composto por cabo de potência tripolar, cabo ótico e 10 mangueiras de controle. Fonte: Autor

### 2.3. TIPOS DE UMBILICAIS

Diversos fatores concorrem para a definição dos componentes funcionais que serão utilizados em um determinado projeto de umbilical submarino. Alguns desses fatores podem ser vistos como naturais e, onde não se tem atuação, como exemplo, as características básicas do reservatório de petróleo, como sua localização, pressão, temperatura, composição do óleo, que são definitivos para a escolha dos componentes mais adequados. E outros fatores são muitas vezes baseados em estratégias técnicas e comerciais, como por exemplo, a existência de mercado local para atender determinada tecnologia, a presença de recursos fabris, meios de instalação adequados e cultura de produção.

Dois principais tipos de umbilicais podem ser distinguidos em razão da combinação dos componentes funcionais utilizados. O objetivo desta diferenciação, além de propor uma organização dos umbilicais por similaridade estrutural, é a definição de famílias que tem critérios e metodologias de projeto e, portanto, requisitos operacionais comuns. O detalhamento desta estruturação em famílias será apresentado nos capítulos seguintes.

### 2.3.1. Umbilicais Termoplásticos *TPUs (Thermoplastic Umbilicals)*

Umbilicais termoplásticos, comumente chamados também de *TPUs (Thermoplastic Umbilicals)* são aqueles em que todos os componentes funcionais utilizados para o transporte de fluídos, tanto controle hidráulico como produtos químicos, são mangueiras poliméricas e mangueiras *HCR*.

Este tipo de umbilical requer necessariamente a presença de componentes estruturais projetados para suportar os esforços durante a fabricação, instalação e operação do produto. Como anteriormente discutido as mangueiras não são componentes com boa resistência estrutural.

Normalmente o projeto deste tipo de umbilical contempla a utilização de camadas de arames de aço galvanizado, chamadas de armaduras de tração, que são reunidos em forma de hélice contínua sobre o núcleo de componentes funcionais e que tem como função promover a resistência estrutural. A Figura 2-6 apresenta uma seção de um umbilical submarino onde é possível visualizar o ângulo de reunião das armaduras.

As armaduras de tração são geralmente aplicadas aos pares onde o sentido de assentamento de cada camada é invertido em relação a camada anterior de forma a ser ter uma estrutura balanceada ao torque quando submetida a esforços de tração. O assentamento dos arames em uma hélice contínua, além de conferir ao umbilical facilidade de absorver esforços de flexão, cria um efeito de esmagamento do núcleo, contendo os componentes funcionais, garantindo a deformação homogênea da seção da estrutura. Sendo as armaduras os componentes principais para suportaçõ dos carregamentos impostos ao umbilical o projeto a fadiga dos *TPUs* é concentrado no dimensionamento dessas camadas e, para praticamente todos os casos, contempla somente os esforços durante a operação do produto.

Componentes funcionais como mangueiras e cabos elétricos tem grande influência em outras características estruturais dos umbilicais como rigidez a flexão, torção e atrito interno.

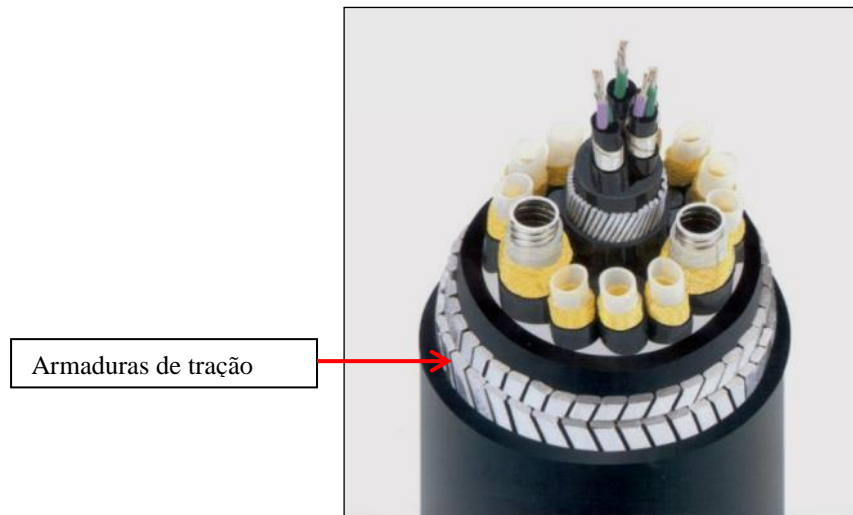


Figura 2-6: Umbilical do tipo *TPU* e identificação das armaduras de tração. Fonte: Adaptada de Almeida (2003)

### 2.3.2. Umbilicais de Tubos Metálicos *STUs* (*Steel Tube Umbilicals*)

Umbilicais de tubos metálicos, geralmente chamados de *STUs* (*Steel Tube Umbilicals*), são aqueles em que todos os componentes funcionais utilizados para o transporte de fluídos, tanto controle hidráulico como produtos químicos, são tubos metálicos.

Conforme anteriormente exposto, os tubos metálicos apresentam a versatilidade de possibilitar sua utilização como componentes funcionais e estruturais. Quando utilizados como componentes estruturais podem compartilhar a função com camadas convencionais de armaduras de tração, caracterizando assim um subtipo de *STU* denominado de armado, ou podem ser os únicos elementos estruturais, dando origem a um outro subtipo *STU* denominado não-armado. A Figura 2-7 mostra alguns exemplos destes subtipos.



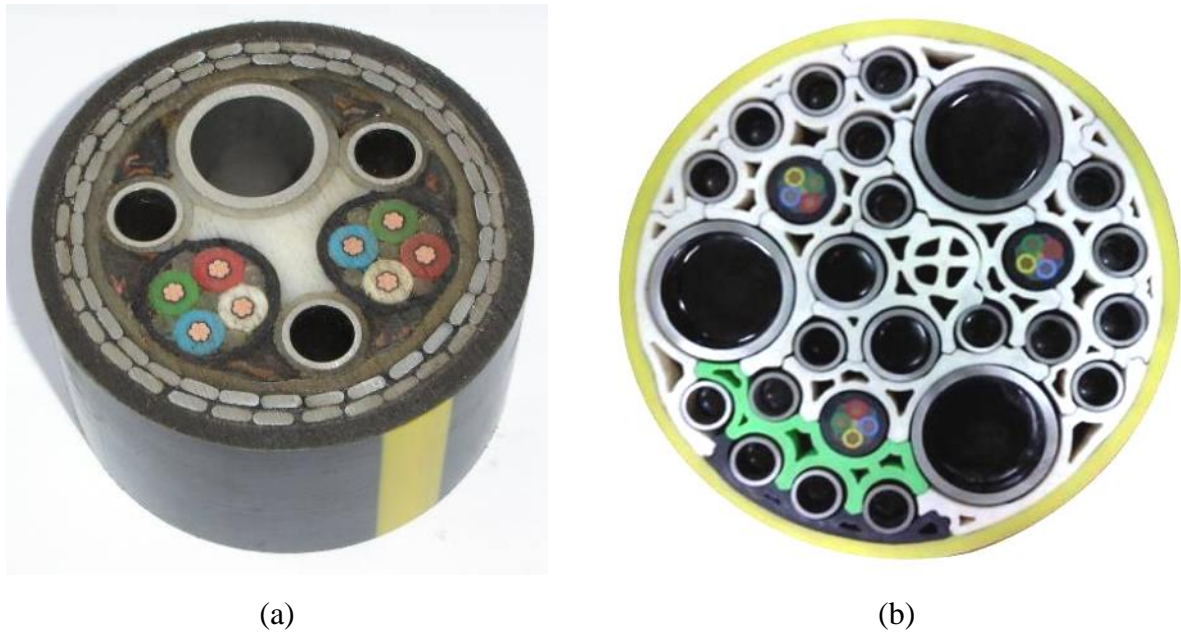


Figura 2-7: Imagem (a) mostra um *STU* armado e a imagem (b) mostra um *STU* não armado.

Fonte: Autor

Apesar de os *STUs* armados terem camadas de armaduras dedicadas a suportar os carregamentos externos, a pequena diferença de rigidez entre o aço carbono das armaduras e aço inoxidável dos tubos faz com que os tubos sempre participem da distribuição de carga. Este efeito pode ser melhorado trabalhando-se na variação entre os ângulos de assentamento de cada uma das camadas.

Com relação a metodologia de projeto à fadiga a abordagem adotada para os umbilicais de tubos metálicos difere em vários aspectos da adotada para os umbilicais termoplásticos.

A primeira grande diferença que se observa é com relação aos componentes críticos em termos de vida. Enquanto que para os umbilicais termoplásticos o projeto a fadiga basicamente se concentra no dimensionamento das armaduras de tração, para *STUs* os tubos metálicos normalmente governam a vida do produto. Uma segunda diferença importante é com respeito aos trechos ao longo do comprimento do umbilical que aparecem como críticos para a fadiga. Por exemplo, a região de contato do trecho dinâmico com o leito marinho, *TDP* (*Touchdown Point*), que raramente merece atenção no projeto à fadiga de umbilicais com mangueiras poliméricas é uma região de grande importância quando se tem tubos metálicos.

Uma terceira questão específica ao projeto de *STUs*, e que demanda maiores esforços para sua abordagem, surge em razão de aspectos particulares de sua rota de fabricação e instalação e que não são triviais de serem considerados no projeto à fadiga. Durante a

fabricação e a instalação dos *STUs* os tubos metálicos são constantemente submetidos a operações de manuseio e passagem por equipamentos das plantas fabris e dos navios de instalação onde, necessariamente, são impostos altos níveis de deformação, muitas vezes ultrapassando o limite elástico do material. Esta sequência de operações resulta então em um processo de fadiga de baixo ciclo. Antes mesmo de o umbilical submarino começar a sua operação os tubos metálicos já podem ter sofrido um consumo considerável de vida.

Surgem então algumas questões que precisam ser respondidas para o adequado projeto à fadiga dos *STUs*, como por exemplo: Como determinar o consumo de vida dos tubos durante as fases de fabricação e instalação? Como avaliar e considerar o impacto deste consumo de vida no desempenho em operação do produto, onde se tem um regime de carregamento de fadiga de alto ciclo?

Os capítulos seguintes serão dedicados a apresentar e discutir informações importantes sobre as questões acima colocadas. Serão apresentadas também as metodologias atualmente utilizadas pela indústria para tratar dos aspectos de fadiga de baixo ciclo e fadiga de alto ciclo que devem ser considerados nos projetos dos *STUs*.

## **2.4. FADIGA DE BAIXO CICLO EM UMBILICAIS DO TIPO *STU***

### **2.4.1. Fabricação dos *STUs***

Como será demonstrado neste capítulo, o projeto à fadiga dos *STUs* deve iniciar com as primeiras etapas de fabricação dos tubos metálicos.

O fluxo da Figura 2-8 apresenta uma rota convencional de fabricação de *STUs*. Na sequência do capítulo serão detalhadas as etapas que tem influência significativa no processo de fadiga de baixo ciclo dos tubos.

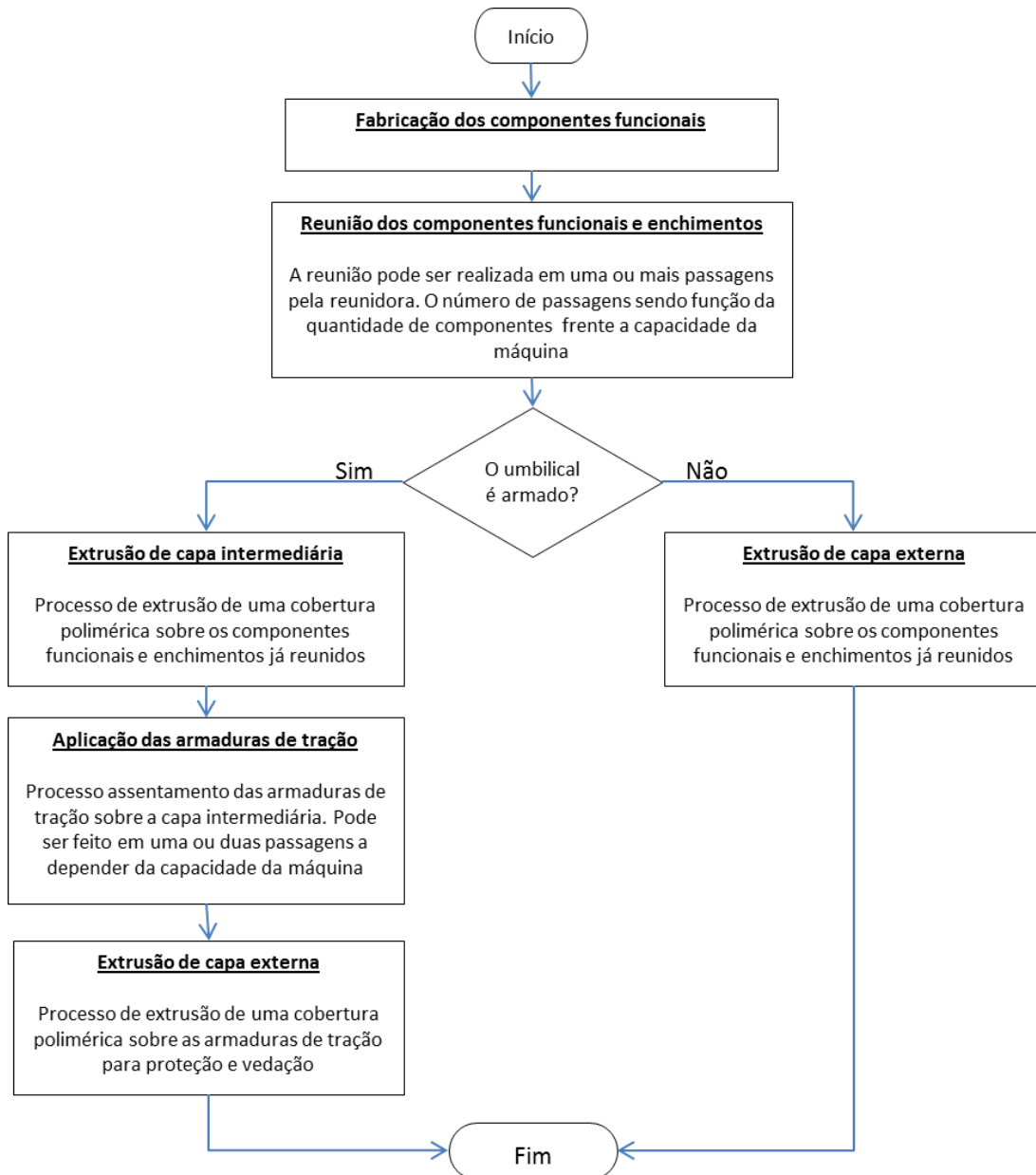


Figura 2-8: Fluxograma típico de fabricação de um *STU*

#### 2.4.1.1. Fabricação dos Tubos Metálicos

Em razão da alta confiabilidade necessária os tubos metálicos são fabricados sem a inclusão de solda longitudinal contínua, comumente chamada de costura, para construção de sua seção circular. A Figura 2-9 apresenta uma rota típica de fabricação destes tubos.

De forma resumida a fabricação dos tubos em aços duplex e superduplex tem uma primeira etapa de conformação a frio, feita a partir de um tarugo já perfurado, onde os dimensionais finais de diâmetro interno e espessura de parede são obtidos. O tubo passa então por uma etapa de desempenho para seguir ao processo de tratamento térmico, que pode ser considerado o mais crítico para obtenção das propriedades mecânicas e metalúrgicas

adequadas do produto. As rampas de aquecimento e resfriamento devem ser bem controladas para se garantir a correta proporção entre as fases ferrita e austenita sem a formação de fases deletérias ao material. Após tratamento térmico 100% do comprimento do tubo é submetido a inspeção por correntes parasitas para verificação da presença de fases indesejadas. Verificadas as propriedades metalúrgicas as varas passam à linha de soldagem onde serão unidas através de uma solda tipo TIG orbital. As soldas são 100% inspecionadas por raio-x. A medida que as soldas são liberadas os tubos vão sendo armazenados em bobinas até ser obtido o comprimento desejado.

Como pode ser observado na Figura 2-9 o acondicionamento dos tubos soldados é feito em bobinas de pequeno diâmetro próprias para permitir o transporte e alimentação das máquinas reunidoras dos fabricantes de umbilicais. Salvo algumas exceções de tubos de pequeno diâmetro interno e pequena espessura de parede, a grande maioria dos tubos sofre deformação plástica apreciável quando acondicionados nestas bobinas.

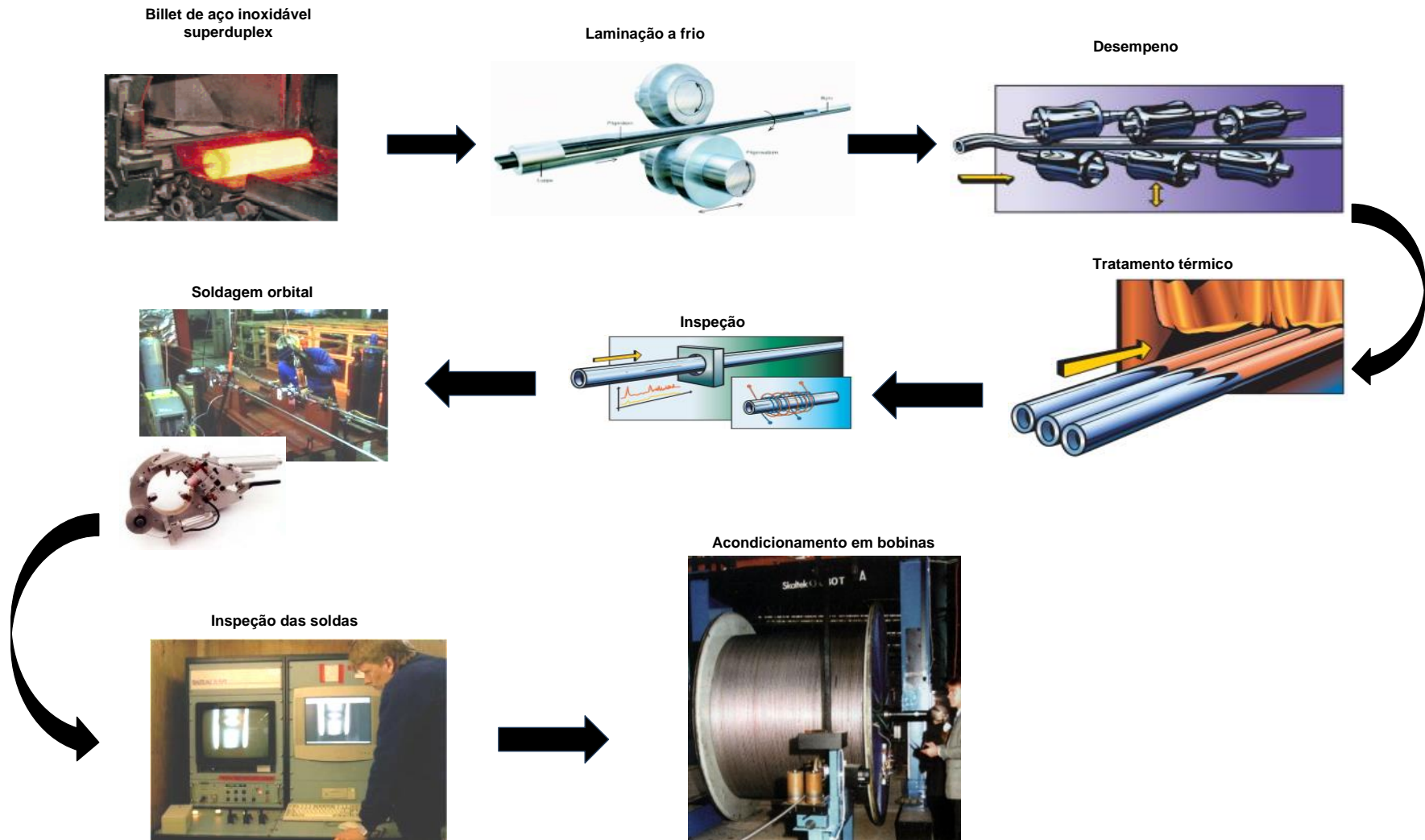


Figura 2-9: Rota de fabricação de tubos metálicos sem costura. Fonte: Sandvik S.A.

### 2.4.1.2. Reunião dos Componentes Funcionais

Este processo é realizado em grandes máquinas chamadas de reunidoras ou cabeadoras. Estas máquinas contem um eixo central e uma série de berços que orbitam este eixo e onde são acomodados os componentes funcionais e enchimentos.

O movimento de translação dos berços ao redor do eixo central permite uma alimentação contínua dos componentes em hélice fechada para uma matriz localizada na extremidade da máquina. A Figura 2-10 mostra exemplos de uma reunidora horizontal e uma vertical.

As reunidoras podem receber diretamente as bobinas do fabricante do tubo ou pode ser necessário se realizar um repasse para bobinas específicas do fabricante do umbilical. Em muitas dessas operações de repasse os tubos são novamente submetidos a retificações e curvaturas resultando em mais ciclos de deformações plásticas.

Devido a rigidez dos tubos metálicos é muitas vezes necessário realizar-se uma pré-conformação entre a sua saída do berço e a reunião na matriz o que resulta em mais incrementos de deformação plástica.



Figura 2-10: Reunidora horizontal (a) e reunidora vertical (b). Fonte: Adaptadas de Almeida (2003)

### 2.4.1.3. Manuseio Durante a Fabricação

Entre cada uma das etapas principais de fabricação do umbilical, como por exemplo, entre a reunião dos componentes funcionais e a extrusão da capa intermediária ou entre o processo de armação e extrusão da capa externa, o umbilical é acondicionado em bobinas ou



cestos, como os ilustrados na Figura 2-11, onde, a depender do projeto é possível ter-se novos incrementos de deformação plástica nos tubos. A Figura 2-12 mostra uma visão esquemática de um processo de extrusão de capa onde é possível ver um exemplo de repasse de bobina que ocorre em fábrica.



Figura 2-11: Imagem (a) mostrando uma bobina em fábrica e imagem (b) mostrando uma cesta de transporte. Fonte: Adaptadas de Almeida (2003)

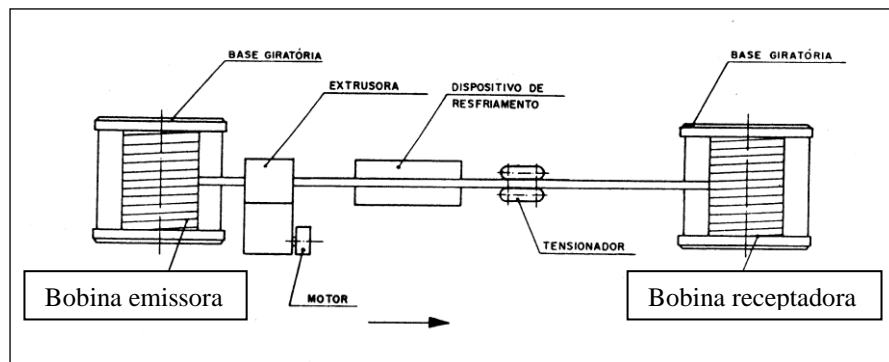


Figura 2-12: Imagem esquemática de uma operação de extrusão de capa. O umbilical passa da bobina emissora para a receptora. Fonte: Adaptada de Almeida (2003)

#### 2.4.2. Instalação dos STUs

A instalação dos umbilicais submarinos é feita por embarcações especializadas, comumente chamadas de *PLSVs* (*Pipe Laying Support Vessels*), que são projetadas especificamente para o manuseio de linha flexíveis. Os *PLSVs* tem todas as facilidades e recursos necessários para execução das operações que envolvem acondicionamento e instalação dos umbilicais e sua conexão aos demais equipamentos submarinos e unidades de produção.

Os projetos de *PLSVs* atualmente existentes no mundo podem ser divididos em duas famílias em função do seu sistema de instalação, uma família de sistema *HLS* (*Horizontal Laying System*) e uma família de sistema *VLS* (*Vertical Laying System*). O sistema de instalação refere-se basicamente a forma como o umbilical é encaminhado da área de armazenamento do navio até sua entrada na água e, portanto, define os tipos de equipamentos que deverão equipar o navio e suas localizações no deck de operações. A importância de se distinguir estes sistemas é que, apesar da concepção básica de seus objetivos serem a mesma, as diferenças na forma em que os umbilicais são manuseados alteram significativamente os esforços que são impostos ao produto e, conseqüentemente, interferem também no projeto.

A Figura 2-13 mostra um navio com sistema *HLS*. Neste sistema o umbilical sai da área de armazenamento, onde pode estar acondicionado em cestas ou bobinas e é encaminhado a um trem de tensionadores posicionados horizontalmente do deck de operações. Os tensionadores são formados por um conjunto de esteiras onde o umbilical passa pelo seu interior e tem como objetivo controlar a velocidade de instalação e, através da aplicação de uma carga de compressão radial sobre o corpo do umbilical, sustentar o peso do comprimento já lançado ao mar. A Figura 2-14 mostra alguns exemplos destes equipamentos. Após os tensionadores o umbilical é direcionado a uma grande polia localizada na popa da embarcação que verticaliza o lançamento conduzindo o umbilical para sua entrada na água (Figura 2-15).



Figura 2-13: *PLSV* com sistema *HLS*. Fonte: Autor





Figura 2-14: Exemplos de tensionadores. Fontes: Autor



Figura 2-15: Fotos em detalhe de polias de popa. Fontes: Adaptadas de Almeida (2003)

A Figura 2-16 mostra um navio com sistema *VLS*. Neste sistema o umbilical sai da área de armazenamento do navio, onde pode estar acondicionado em cestas ou bobinas, e é encaminhado ao topo de uma estrutura chamada de torre de lançamento, que pode estar localizada na popa da embarcação ou a meia-nau. No topo desta torre o umbilical passa por uma grande polia, onde faz um contorno de 180 graus, e é então direcionado ao trem de tensionadores que ficam posicionados verticalmente. Após os tensionadores, o umbilical, já verticalizado, é encaminhado diretamente ao mar.

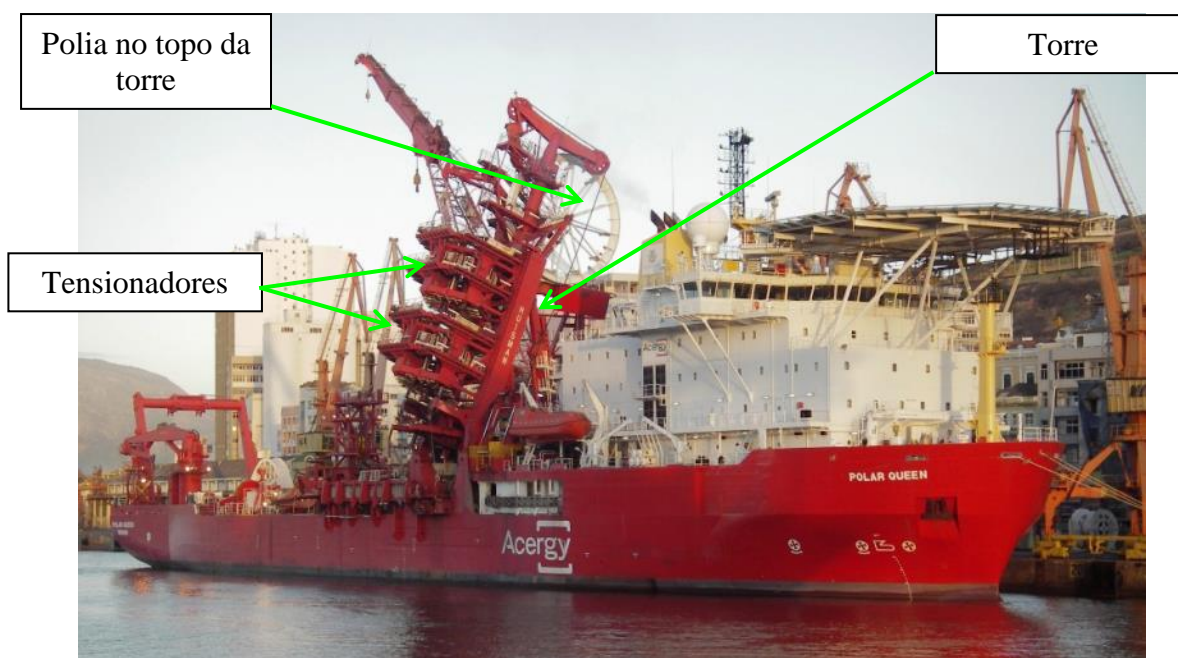


Figura 2-16: *PLSV* com sistema *VLS*. Fonte: Erik Azevedo

Focando-se no projeto dos umbilicais para a sua instalação, em um sistema *VLS* os principais esforços sofridos pelo produto são os carregamentos combinados de tração e compressão radial que ocorrem ao longo do trem de tensionadores. Durante a passagem pela polia localizada no topo da torre o umbilical é submetido a um esforço simples de flexão, ou seja, sem carga de tração associada, o que não gera uma condição crítica que mereça grande atenção no projeto. Em um sistema *HLS* se tem duas regiões, ou condições, críticas de esforços sofridos pelo umbilical. A primeira, a exemplo do que ocorre no sistema *VLS*, é a combinação de tração e compressão radial no trem de tensionadores. A segunda, que diferencia estes sistema, é a associação de tração e flexão que ocorre na polia de popa do *PLSV*. Para *STUs* esta combinação de esforços é particularmente importante porque impõe ao umbilical, e conseqüentemente aos tubos metálicos, altos níveis de deformação.

De uma forma geral, evidentemente existem particularidades para cada projeto, considerando-se tubos metálicos com diâmetro interno de  $\frac{1}{2}$ " ou maiores e as características atualmente utilizadas em projeto, é possível estimar-se que na instalação de *STUs* em lâminas d'água acima de 2000m a passagem pela roda de popa causa deformação plástica nos tubos ou são atingidos níveis de deformação muito próximos do limite elástico teórico. Este fato não deveria representar um desafio para o projeto dos *STUs* se as operação de instalação fossem atividades seguramente controláveis. Entretanto, é um trabalho que tem diversos fatores que não estão sob o domínio da equipe de instalação ou da operação da embarcação. Variáveis como: condição de mar, condição de vento, conhecimento restrito do leito marinho e outras,

fazem com que a atividade seja bastante imprevisível. Uma consequência direta desta imprevisibilidade é que comumente surge a necessidade de se interromper as operações em diversos momentos ao longo de uma instalação. Nestes eventos, flexionados e tracionados sobre a roda de popa, os tubos metálicos passam a ser submetidos a um processo de fadiga de baixo ciclo. Sob a ótica de projeto de um *STU* cada parada na instalação representa um potencial consumo de vida útil do produto. E a depender da condição é possível ter-se uma falha prematura durante a instalação.

Atualmente, os limites para a deformação plástica dos tubos aceitáveis pela indústria são bastante restritivos quando comparados com valores estimados para uma instalação realizada em um *PLSV* com sistema *HLS*. Esta limitação tem um impacto significativo na disponibilidade de embarcações aptas à execução da instalação e, conseqüentemente, na logística das campanhas de interligação dos sistemas submarinos.

### **2.4.3. Considerações de Projeto**

Com base nos detalhes expostos nos capítulos 2.4.1 e 2.4.2 2.4.4 torna-se clara a necessidade de se dispor de uma metodologia de projeto que contemple o efeito da fadiga de baixo ciclo sofrida pelos tubos metálicos durante a fabricação e instalação do umbilical no seu desempenho à fadiga de alto ciclo durante a vida em operação.

Observando-se as datas de trabalhos publicados sobre o assunto percebe-se um crescente esforço na indústria e em instituições de pesquisa na busca de metodologias e critérios de projeto mais precisos. De acordo com os resultados divulgados ainda existem incertezas e áreas de estudo no tema.

Em trabalho publicado em 2004, KRISTOFFERSEN e HAAGENSEN, apresentaram um dos estudos pioneiros abrangentes sobre o assunto após terem acesso a uma grande quantidade de resultados de testes de fadiga realizados por fabricantes de umbilicais e fabricantes de tubos metálicos. Até a data da publicação deste estudo não havia nenhuma sugestão ou recomendação internacional de curva de fadiga a ser adotada para tubos metálicos aplicados em umbilicais. Conseqüentemente, os fabricantes tinham suas próprias curvas construídas com metodologias próprias. Como as metodologias utilizadas foram adotadas de forma independente havia uma grande dispersão nos resultados o que levou os autores a investigar a influência dos parâmetros de teste na construção das curvas. Parâmetros destacados como de grande influência para a dispersão foram: o método de teste (por exemplo:

fadiga axial, fadiga por flexão em quatro pontos, fadiga por flexão rotativa), a razão de carregamento, o efeito de espessura, o efeito de deformações plásticas.

Após a análise dos dados os autores identificaram um significativo efeito de espessura de parede nos resultados e propuseram curvas de fadiga para dois intervalos de espessura. Com relação ao efeito de fadiga de baixo ciclo no desempenho a fadiga de alto ciclo dos tubos o universo de dados continha apenas algumas amostras submetidas a um único ciclo de deformação total de 5%, sendo que os resultados na época não foram conclusivos.

Além da necessidade de se determinar um método geral para construção de curvas de fadiga a indústria viu também a necessidade de se ter uma metodologia para considerar a sequência de deformações plásticas impostas aos tubos no projeto à fadiga do umbilical. A abordagem assumida foi derivada de um conceito empregado em projetos de dutos rígidos de grandes diâmetro em que o histórico de deformações plásticas é tratado somando-se cada evento de deformação para se ter uma medida indireta de dano. Essa soma de deformações plásticas resulta em um parâmetro denominado de Deformação Plástica Acumulada, normalmente tratado pela sigla *APS* (*Accumulated Plastic Strain*).

A deformação plástica acumulada pode ser definida como “a soma dos incrementos de deformações plásticas, independente do sinal e direção” (DNV F101). Apesar de a soma algébrica das deformações plásticas não ter significado físico (DOBSON, 2007), ela pode ser assumida como uma medida indireta do dano imposto aos tubos e assim adotada como uma ferramenta de engenharia para o projeto dos umbilicais.

No ano de 2005 a *Det Norske Veritas* (DNV), em sua recomendação de prática DNV-RP-C203 (DNV-RP-C203, 2005), apresentou a primeira curvas de fadiga para projeto de tubos metálicos em super duplex aplicados em umbilicais submarinos contemplando o dano causado por um inventário de deformações plásticas. Apesar de as amostras utilizadas para construção das curvas não terem sido pré-deformadas, a recomendação considera aceitável sua aplicação para casos em que os tubos sofram no máximo 10 ciclos com 2% de deformação total por ciclo. De forma similar ao trabalho publicado por KRISTOFFERSEN e HAAGENSEN, a DNV incluiu uma correção nas curvas para a espessura de parede dos tubos. Nota-se que os limites impostos pela recomendação são relativos a deformação total por ciclo e número de eventos de deformação plástica, mas como cada projeto tem suas peculiaridades algumas situações ficam descobertas na envoltória de aplicação da DNV. Para estes casos tem-se duas alternativas, a primeira é avaliar a viabilidade de se alterar o projeto do umbilical, ou o projeto da sua instalação, e a segunda a construção de curvas de fadiga considerando os limites específicos de deformações plásticas.

Incentivada por essa necessidade, a indústria passou a concentrar esforços no desenvolvimento de estudos mais específicos. BUITRAGO *et al.* (BUITRAGO, 2006) elaboraram uma metodologia de teste de forma a controlar os níveis de deformações plásticas impostas aos tubos para cada ciclo de carregamento. Com esta metodologia, os autores avaliaram o desempenho de tubos submetidos a inventários de 12% e 20% de *APS* e compararam com curvas genéricas para aço, não específicas para tubos de pequeno diâmetro, apresentadas na recomendação DNV-RP-C203 (2001) e na norma BS 7608 (1993). Uma das constatações descritas pelos autores é a degradação observada na vida a fadiga dos tubos pré-deformados de forma que curvas bastante conservadoras para tubos virgens passaram a ser não conservadoras após aplicação da fadiga de baixo ciclo. De maneira similar a BUITRAGO *et al.*, DOBSON (DOBSON, 2007) também investigou o desempenho a fadiga de tubos submetidos a inventários de *APS* em torno de 20% chegando a resultados muito semelhantes àqueles autores. Considerando que um acúmulo de deformações plásticas de 20% poderia ser um limite baixo para determinados projetos, BALENA *et al.* (BALENA, 2008), elevaram o dano causado pela fadiga de baixo ciclo impondo um nível de *APS* de 30 %, e propuseram uma nova curva para esta condição. Além do desempenho a fadiga, os autores avaliaram os efeitos das deformações plásticas nas propriedades mecânicas do material, sendo que não foram observadas alterações significativas para o limite de escoamento e tensão de ruptura das amostras.

A metodologia hoje difundida na indústria, baseada na construção de curvas de fadiga utilizando amostras submetidas a um dano pré-determinado, aparece como uma alternativa eficaz para aplicação em projeto. Devido as particularidades dos projetos dos umbilicais, e especialmente do comportamento dos materiais utilizados para fabricação dos tubos, outras metodologias que tratam a fadiga de baixo ciclo e a fadiga de alto ciclo como modos de falha separados mostraram-se não adequadas.

A metodologia de se realizar o somatório das deformações plásticas nos tubos metálicos é atualmente considerada adequada para se avaliar o dano causado por este histórico de carregamentos no desempenho a fadiga de alto ciclo. Da mesma forma, as curvas apresentadas pela DNV-RP-C203 são amplamente empregadas em projeto sendo hoje a principal referência para fadiga. Entretanto, conforme exposto anteriormente, as curvas DNV são aplicáveis para uma envoltória que considera apenas alguns ciclos de deformação plástica, tipicamente incorporando a fabricação dos tubos e fabricação e algumas operações de manuseio do umbilical. Quando se avalia a instalação de *STUs* por *PLSVs* com sistema *HLS*

em lâminas d'água profunda e ultra-profunda chega-se a somatórios de deformações plásticas da ordem de 10 vezes os valores da recomendação.

#### **2.4.4. Comportamento Cíclico do Aço UNS 32750**

Os primeiros registros de utilização de aços austeno-ferríticos datam do período compreendido entre os anos 30 e 40. Ao longo desta década tem-se relatos de estudos na França, Suécia e Estados Unidos, sendo, portanto, adequado assumir que o nascimento dessa família de aços ocorreu de forma simultânea nos três países.

A primeira produção de *DSSs (Duplex Stainless Steel)* não fundidos foi registrada na Suécia no ano de 1930 e utilizada pela indústria de papel e celulose. Neste caso o desenvolvimento da liga foi motivado por problemas gerados pela corrosão intergranular que atacava os aços inoxidáveis austeníticos, com alto teor de carbono, utilizados na época. Esta primeira geração de *DSSs* eram ligas de cromo, níquel e molibdênio, que quando comparadas com os aços puramente austeníticos, mostravam um desempenho superior em termos de resistência a corrosão sob tensão na presença de cloretos. Embora com desempenho comprovado de resistência mecânica associada a boa resistência a corrosão sob tensão na presença de cloretos, os primeiros *DSSs* apresentavam uma grande limitação para aplicações envolvendo soldagem em razão da dificuldade de se controlar as propriedades do material na zona termicamente afetada. Com o desenvolvimento de novas tecnologias de refino, principalmente a introdução dos processos de refino à vácuo e argônio, foi possível reduzir consideravelmente os níveis de elementos residuais e produzir aços mais limpos com controle estreito das faixas composicionais de elementos como carbono e nitrogênio. Desta forma, nos anos 80, surgiu uma segunda geração de aços duplex com soldabilidade aprimorada principalmente pela adição de nitrogênio. Embora estes materiais possuíssem uma excelente resistência a corrosão em ambientes contendo cloretos, a indústria de petróleo, principalmente a área de produção *offshore*, apresentou a necessidade de aços mais resistentes. Nas últimas décadas foi então desenvolvida uma nova geração de aços austeno-ferríticos para aplicação marítima que foram denominados de super duplex (*SDSSs – Super Duplex Stainless Steel*) (ALVAREZ-ARMAS, 2007).

Em comparação com aços inoxidáveis austeníticos, especialmente os graus AISI 316 e 304, que são alternativas normalmente concorrentes, e com a primeira e segunda geração de aços austeno-ferríticos, os aços super duplex apresentam propriedades mecânicas de limite de escoamento e ruptura bastante superiores. Desta forma, esta classe de material foi a escolha

natural como principal alternativa para utilização em umbilicais submarinos, onde o peso e as dimensões finais do produto, relacionados diretamente com a espessura de parede dos tubos, são parâmetros críticos no projeto. Atualmente, a grande maioria dos *STUs* é fabricada com tubos super duplex utilizando a liga UNS 32750. Em termos de resistência a corrosão este aço vem sendo aplicada em ambiente submarino por aproximadamente vinte anos demonstrando um desempenho igual ou superior ao de ligas superausteníticas, como a UNS N08926 (KIVISÄKK, 1999).

Pela natureza bifásica do material o comportamento a fadiga dentro do regime plástico é fortemente influenciado tanto pela resposta de cada uma das fases ao carregamento externo como pela própria interação das tensões internas geradas pela heterogeneidade microestrutural. Por se tratar de um fenômeno complexo, este assunto vem recebendo atenção de muitos pesquisadores.

MAGNIN et al. (MAGNIN, 1988) estudando a deformação cíclica dos aços duplex foram os primeiros a identificar mecanismos distintos de acomodação interna das tensões em função do nível de deformação plástica ( $\epsilon_p$ ) aplicada. Para o que foi definido como sendo um regime de baixas amplitudes de deformações plásticas ( $\Delta\epsilon_p/2 < 10^{-3}$ ), os autores observaram que a fase austenítica é a principal responsável pela acomodação das deformações, caracterizando o comportamento a fadiga do material. Aplicando maiores níveis de deformação, que foi definido como um regime de altas amplitudes de deformações plásticas ( $\Delta\epsilon_p/2 > 10^{-3}$ ), passa-se a ter um compartilhamento das tensões pelas duas fases, porém, observou-se a nucleação preferencial de trincas ocorrendo na fase ferrítica. Com base nestas constatações, os autores concluíram que para  $\Delta\epsilon_p/2 < 10^{-3}$  o comportamento em fadiga do material se aproxima ao de ligas austeníticas e para  $\Delta\epsilon_p/2 > 10^{-3}$  o comportamento é semelhante ao de ligas ferríticas. Em complemento ao trabalho de MAGNIN et al., MATEO et al. (MATEO, 1996), estenderam os limites de deformação plástica impostos ao material ( $2,9 \times 10^{-5} < \Delta\epsilon_p/2 < 6,6 \times 10^{-3}$ ) e realizaram um estudo profundo da relação entre a deformação e a resposta microestrutural. Os autores propuseram um novo regime intermediário aos apresentados por MAGNIN et al., de forma que o comportamento em fadiga em função do nível de deformação plástica pôde ser caracterizados como: tipo austenítico, tipo austeno-ferrítico e tipo ferrítico.

A partir dos trabalhos até então realizados e que buscaram estudar o comportamento dos aços inoxidáveis duplex em altos regimes de deformação é possível verificar que os mecanismos mobilizados para a acomodação das tensões internas variam em razão dos níveis de deformação aplicados e criam-se processos de nucleação e propagação de trincas

particulares para cada regime de carregamento. Esta variação de comportamento resultado da heterogeneidade inerente do material acaba gerando mais incertezas quanto a resposta dos tubos metálicos quando submetidos a um processo de fadiga de baixo ciclo. Um determinado projeto se dimensionado levando-se em conta critérios de fadiga que consideram apenas um regime de carregamento, onde, por exemplo, a nucleação e propagação de trincas ocorrem em apenas uma das fases, pode estar subdimensionado se na prática o regime de carregamento real resultar na nucleação e propagação de trincas nas duas fases. E uma condição oposta também pode ocorrer, tendo-se um projeto superdimensionado, mais seguro do ponto de vista da garantia da integridade dos tubos, porém, certamente mais caro.

### **3. METODOLOGIA E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL**

Os objetivos buscados na determinação das metodologias utilizadas neste trabalho foram a construção de métodos coerentes e embasados em normas e melhores práticas da engenharia e cujos resultados pudessem ser diretamente comparáveis com critérios atualmente empregados em projetos de umbilicais submarinos. O fluxograma da Figura 3-1 apresenta a ordem cronológica das atividades realizadas. As atividades destacadas em amarelo serão detalhadas nos capítulos 3.1 ao 3.8, onde também serão discutidas as premissas assumidas e as considerações necessárias para a construção dos métodos e procedimentos experimentais.



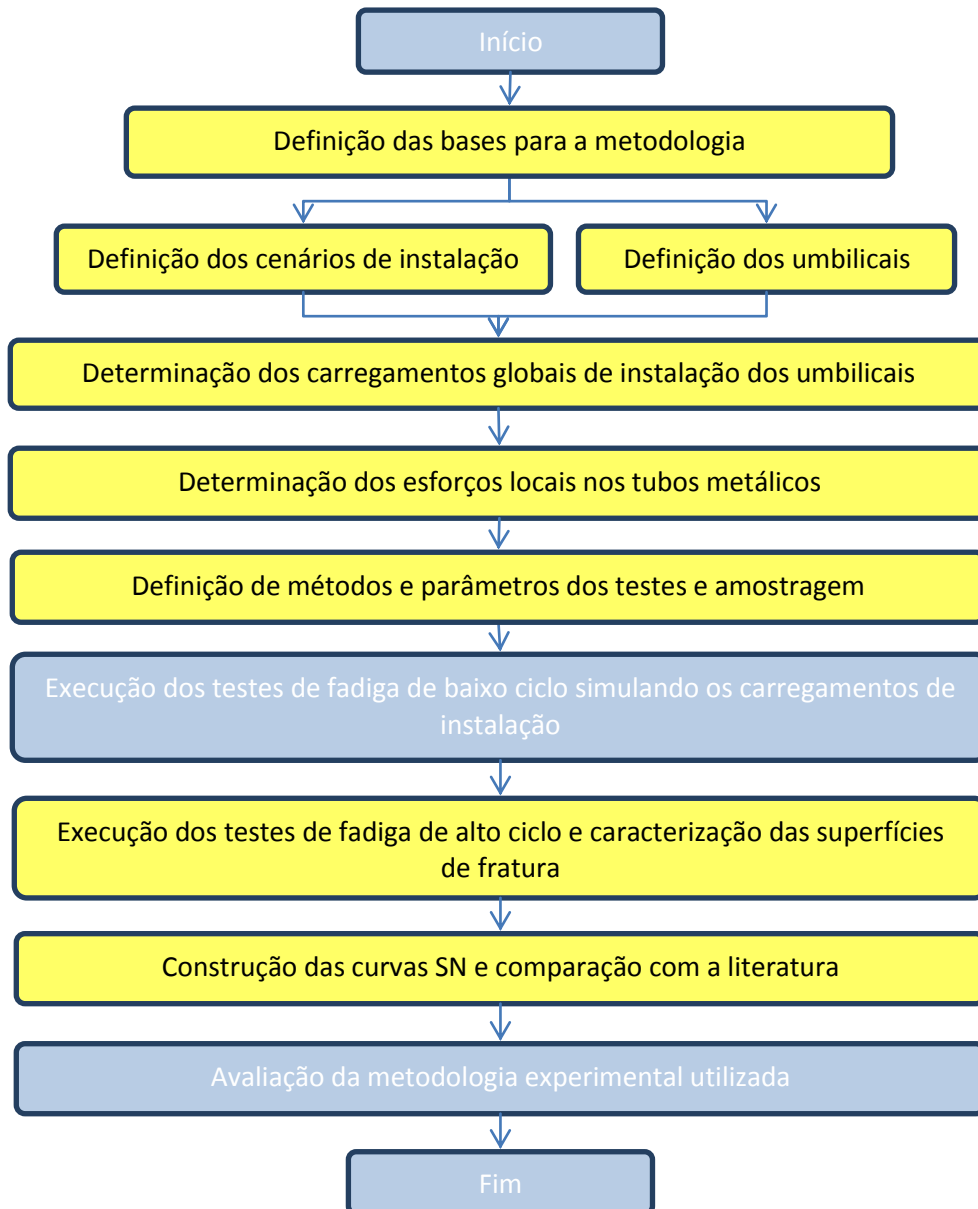


Figura 3-1: Fluxograma geral das atividades

### 3.1. DEFINIÇÃO DAS BASES PARA A METODOLOGIA

As premissas apresentadas neste capítulo foram tomadas como base para a definição dos métodos utilizados neste trabalho e conseqüentemente foram propagadas para todas as atividades:

- 1º. Os testes experimentais deverão se aproximar ao máximo da condição real de carregamento experimentada pelos tubos metálicos dentro de um umbilical submarino;

- 2°. A metodologia de amostragem deve garantir que as curvas SN construídas possam ser enquadradas como Dado de Confiabilidade conforme a norma ASTM A739.
- 3°. Sempre que possível deverão ser adotadas diretrizes de normas e recomendações práticas utilizadas pela indústria;

### 3.2. DEFINIÇÃO DOS CENÁRIOS DE INSTALAÇÃO

As primeiras atividades realizadas para este trabalho foram a identificação dos potenciais cenários a serem estudados e a seleção daqueles que possibilitariam a maior abrangência de aplicações.

Na instalação de umbilicais submarinos o produto fica normalmente toda a operação de instalação em uma configuração de catenária livre, ou seja, com sua extremidade superior suportada no navio e descendo livremente até o apoio no leito marinho, sem nenhum sistema ou equipamento intermediário de flutuação. Como os esforços impostos ao umbilical são crescentes com o aumento de lâmina d'água, foram escolhidas duas profundidades a serem analisadas para que fosse possível um estudo de sensibilidade através da comparação dos resultados.

Com objetivo de se ter uma avaliação abrangente assumiu-se não considerar uma condição específica de mar, de uma região restrita da costa brasileira. A abordagem desta análise de instalação está detalhada no capítulo 3.4.

O tipo de navio considerado foi baseado na frota atualmente em operação no Brasil. O navio possui sistema de instalação *HLS* e roda de popa com diâmetro de 6 metros. Para se garantir resultados de carregamentos abrangentes foi utilizado um fator de amplificação dinâmica conservador. O capítulo 3.4 apresenta o detalhamento dos cálculos realizados.

A Tabela 3-1 apresenta os cenários definidos para avaliação.

Tabela 3-1: Cenários definidos para avaliação

	LDA (m)	Método de instalação	Diâmetro da roda de popa (m)	Configuração da catenária
CENÁRIO A	2000	HLS	6	Catenária Livre
CENÁRIO B	2500	HLS	6	Catenária Livre

### 3.3. DEFINIÇÃO DOS UMBILICAIS

A configuração de seção de umbilical definida para os estudos foi a contendo os seguintes componentes funcionais:

- 10 tubos metálicos com diâmetro interno de ½”
- Cabo elétrico composto de 4 pares de condutores de cobre de 4mm<sup>2</sup>

A escolha da configuração foi baseada em um modelo de umbilical de mangueiras poliméricas muito utilizado no Brasil composto dos seguintes componentes funcionais:

- 4 mangueiras poliméricas para controle hidráulico com diâmetro interno de ½”
- 6 mangueiras poliméricas resistentes ao colapso para transporte de produtos químicos com diâmetro interno de ½”
- Cabo elétrico composto de 4 pares de condutores de cobre de 4mm<sup>2</sup>

Foram consideradas também duas espessuras de parede para os tubos metálicos em função dos cenários definidos no capítulo 3.2. Para o CENÁRIO A, lâmina d’água de 2000m, foram avaliados tubos com espessuras de 1,1mm e 1,3mm, e para o CENÁRIO B, em razão da maior lâmina d’água, 2500m, considerou-se apenas tubos com espessura de 1,3mm.

A Figura 3-2 mostra a seções transversais definidas para os estudos.

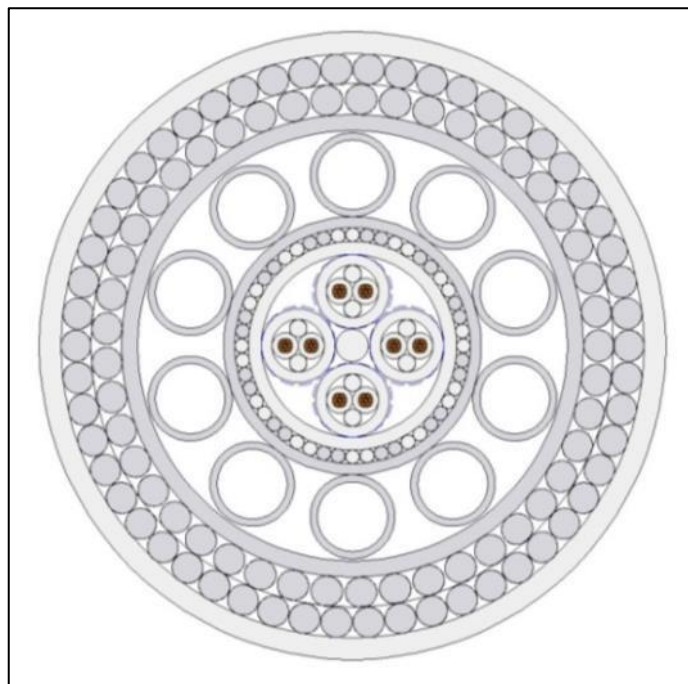


Figura 3-2: Seção transversal definida para os estudos. Fonte: Autor

Os umbilicais definidos para os estudos incorporam características e requisitos típicos dos umbilicais normalmente utilizados na costa brasileira. Se comparados com produtos especificados e projetados para outras áreas de produção como Golfo do México e Mar do Norte, algumas diferenças poderão ser percebidas, por exemplo, a utilização de armaduras de tração e a relação entre peso linear e diâmetro externo, e eventualmente será necessária uma avaliação mais detalhada sobre a aplicabilidade das premissas adotadas neste trabalho para estas outras áreas.

### **3.4. DETERMINAÇÃO DOS CARREGAMENTOS GLOBAIS DE INSTALAÇÃO DOS UMBILICAIS**

Para se chegar aos esforços nos tubos metálicos é necessário primeiro se determinar os carregamentos globais como tração, flexão e torção atuantes no umbilical. Como o objetivo deste trabalho é a verificação das deformações sofridas pelos tubos metálicos na sua região de saída do PLSV, onde tem-se uma curvatura conhecida, o carregamento de interesse é apenas o de tração. Tem-se dois caminhos como alternativas para obtenção deste carregamento.

O primeiro caminho é através da utilização de programas computacionais especificamente desenvolvidos para executar este tipo de simulação. Nestas simulações são considerados todos os dados geométricos e dinâmicos da embarcação, dados geométricos e físicos do umbilical e os dados de mar da região de interesse, como onda e correntes. O programa executa a interação dinâmica entre todas estas geometrias e carregamentos e fornece dados de esforços globais como tração e curvatura ao longo de todo umbilical. O inconveniente deste tipo de abordagem é o tempo necessário tanto para o pré-processamento e modelamento dos casos como para o processamento em si. Por outro lado, por serem análises onde são simuladas as condições de modo mais real possível, permitem a otimização dos projetos.

O segundo caminho é através de cálculos simplificados onde são considerados alguns parâmetros físicos do umbilical e assumidos fatores que representam a configuração da instalação e a interação da embarcação com as condições de mar. Apesar de o cálculo simplificado apresentar limitações evidentes quando comparado com as análises numéricas, por não fornecer informações sobre a curvatura imposta ao umbilical ao longo de seu comprimento, a sua utilização é bastante útil quando se necessita de uma rápida e razoável estimativa de carga de tração máxima aplicada ao umbilical. Por ser uma metodologia

simplificada ela acaba incorporando coeficientes de segurança e muitas vezes fornece carregamentos maiores frente aos obtidos pelas análises numéricas computacionais.

Como o foco deste trabalho é a avaliação dos limites de utilização dos tubos metálicos adotou-se a alternativa do cálculo simplificado que, apesar de mais simples do que as análises numéricas computacionais, é adequada aos objetivos deste trabalho.

Serão assumidas as seguintes nomenclaturas para descrição dos cálculos. A região da saída do umbilical do navio de instalação será tratada como região de “topo”, o trecho de umbilical em contato com o leito marinho será tratado como região de “fundo” e comprimento de umbilical entre o topo e o fundo será tratado como trecho em “suspensão”.

A expressão analítica utilizada para determinação dos esforços de tração no topo é apresentada na equação 3.1.

$$T_{\text{topo}} = P_{\text{umb}} \cdot (\text{LDA} \cdot f_{\text{cat}}) \cdot f_{\text{amp.din}} + P_{\text{adic}} \quad (3.1)$$

onde,  $T_{\text{topo}}$ , carga de tração no topo, em kgf

$P_{\text{umb}}$ , peso por metro do umbilical submerso e alagado, em kgf/m

LDA, profundidade lâmina d'água, em m

$f_{\text{cat}}$ , fator de catenária, representa o comprimento total de umbilical em catenária, adimensional

$f_{\text{amp.din}}$ , fator de amplificação dinâmica da embarcação de instalação, adimensional

$P_{\text{adic}}$ , peso adicional de acessórios presos ao umbilical, em kgf

O peso por metro do umbilical submerso e alagado foi estimado considerando-se os pesos relativos de cada componente e materiais utilizados na construção da seção transversal. O fator de catenária é deduzido para um ângulo de topo de 1 grau e o produto de sua multiplicação com a LDA resulta em uma boa aproximação do comprimento total de umbilical em suspensão, trecho que contribui para a carga de tração. O fator de amplificação dinâmica representa as acelerações verticais resultantes da interação da embarcação com as condições de mar e o valor utilizado é baseado na experiência de análises numéricas.

A Tabela 3-2 apresenta um resumo de todos os parâmetros utilizados para os cálculos dos dois cenários estudados e os valores obtidos para as cargas de tração no topo.

Tabela 3-2: Parâmetros considerados para os cálculos de instalação

	$P_{\text{umb}}$ (kgf/m)	LDA (m)	$f_{\text{cat}}$	$f_{\text{amp.din}}$	$P_{\text{adic}}$ (kgf)	$T_{\text{topo}}$ (kgf)
CENÁRIO A	21,6	2000	1,06	1,4	3000	67108
CENÁRIO B	21,6	2500	1,06	1,4	3000	83136

### 3.5. DETERMINAÇÃO DOS ESFORÇOS LOCAIS NOS TUBOS METÁLICOS NA INSTALAÇÃO DOS UMBILICAIS

O fluxograma apresentado na Figura 3-3 descreve em ordem cronológica as atividades realizadas para determinação dos esforços sofridos pelos tubos metálicos nos cenários de instalação. As deformações obtidas como resultado destas atividades serão a base para execução dos testes de fadiga de baixo ciclo.

As atividades destacadas em amarelo serão detalhadas nos capítulos 3.5.1 e 3.5.2.

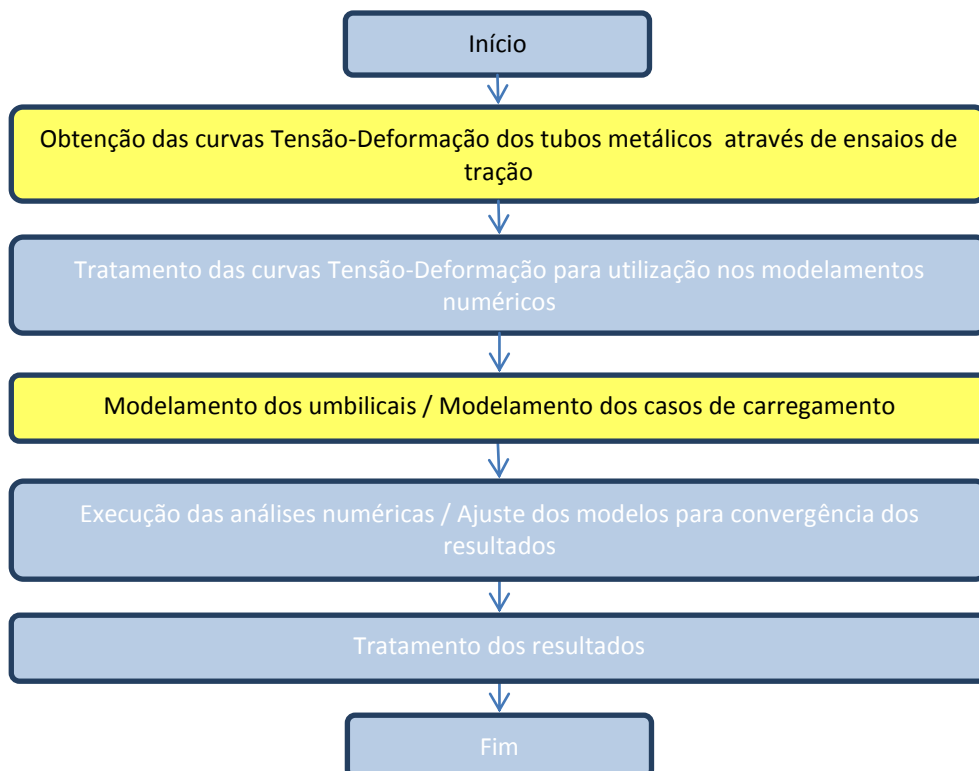


Figura 3-3: Fluxograma das atividades

#### 3.5.1. Obtenção das Curvas Tensão-Deformação

Para a obtenção das curvas tensão-deformação foram utilizadas quatro amostras de tubos com espessura de parede de 1,1mm sem solda circunferencial e duas amostras com espessura de parede de 1,3mm com solda circunferencial. A Tabela 3-3 apresenta o resumo do plano de testes. Os ensaios foram realizados conforme a norma ASTM E8/E8M (ASTM E8/E8M, 2011).

Tabela 3-3: Plano de testes para obtenção das curvas Tensão-Deformação

Amostra	Espessura de parede do tubo (mm)	Amostra contendo solda circunferencial
CP-tr_1	1,1	Não
CP-tr_2	1,1	Não
CP-tr_3	1,1	Não
CP-tr_4	1,1	Não
CP-tr_5	1,3	Sim
CP-tr_6	1,3	Sim

### 3.5.2. Modelamento dos Umbilicais e Casos de Carregamento

Os umbilicais submarinos são estruturas bastante complexas, incorporando em sua construção camadas contendo componentes reunidos helicoidalmente, componentes estes por sua vez também constituídos de série de camadas, e onde uma ampla diversidade de materiais é aplicada. Estas características fazem com que o seu modelamento, tanto analítico como numérico, para análise de tensões tenha um alto grau de dificuldade. Como os programas computacionais de elementos finitos mais sedimentados no mercado não contém os recursos necessários para este tipo de análise a indústria de petróleo identificou a necessidade de desenvolver uma ferramenta dedicada. Neste contexto iniciou-se um projeto para a criação de um *software* específico chamado UFlex. Atualmente existe um acordo de cooperação envolvendo fabricantes de umbilicais, institutos de pesquisa e empresas produtoras de petróleo para o aperfeiçoamento contínuo da ferramenta.

O UFlex é um programa computacional para análises numéricas baseado no método dos elementos finitos desenvolvido especificamente para ser capaz de tratar as não linearidades presentes em problemas envolvendo a complexidade construtiva dos umbilicais submetidos a carregamentos de tração, torção, flexão, compressão radial, pressão interna e externa. Além das não linearidades globais, como relações de contato e escorregamento entre camadas, o programa permite a utilização de modelos de materiais elásticos, hiper-elásticos e elastoplásticos, fazendo com que seja adequado para análises envolvendo deformação plástica dos componentes. O seu método de cálculo foi calibrado e validado através de um extenso programa de testes em escala real onde uma grande variedade de projetos de umbilicais instrumentados foi submetida a diferentes regimes de carregamento.

Por ser a melhor ferramenta atualmente disponível para se determinar as tensões atuantes nos componentes internos de um umbilical, o UFlex foi o programa selecionado para se realizar as análises deste trabalho.

Conforme descrito no capítulo 3.3, foram modelados dois umbilicais com seções transversais ligeiramente distintas para acomodar as duas espessuras de parede de tubo consideradas para as análises.

Durante a etapa de pré-processamento dos modelos foi realizado um estudo de sensibilidade e convergência para construção da malha de elementos finitos. Estas atividades por serem processos intrínsecos e imprescindíveis às análises numéricas não serão detalhadas.

Sendo uma ferramenta especificamente concebida, o UFlex apresenta alguns recursos para inicialmente se inibir muitas das não linearidades presentes nas análises. Estes recursos são notavelmente úteis quando se deseja realizar uma análise rápida onde é aceitável alguma imprecisão nos resultados, ou quando se deseja uma análise completa onde à medida que são ajustados geometria dos componentes, contato entre elementos e refino de malha, as não linearidades podem ser liberadas. Para as análises deste trabalho foram trabalhadas as geometrias e condições de contorno até se chegar a modelos contemplando todas as não linearidades possibilitadas pelo UFlex.

De forma a se cobrir os cenários definidos no capítulo 3.2 e os umbilicais definidos no capítulo 3.3, foram montados oito modelos para realização das análises. A Tabela 3-4 apresenta os detalhes de cada modelo.

Tabela 3-4: Dados dos modelos analisados

	Lâmina d'água (m)	Carregamentos		Características Específicas	
		Carga de Tração (kgf)	Raio de Curvatura (m)	Espessura de parede dos tubos (mm)	Curva Tensão-Deformação
MODELO 1	2000	67108	3	1,1	CP_tr_1
MODELO 2	2000	67108	3	1,1	CP_tr_2
MODELO 3	2000	67108	3	1,1	CP_tr_3
MODELO 4	2000	67108	3	1,1	CP_tr_4
MODELO 5	2000	67108	3	1,3	CP_tr_5
MODELO 6	2000	67108	3	1,3	CP_tr_6
MODELO 7	2500	83136	3	1,3	CP_tr_5
MODELO 8	2500	83136	3	1,3	CP_tr_6



### 3.6. Definição de Método e Parâmetros dos Testes e Amostragem

O fluxograma apresentado na Figura 3-4 descreve em ordem cronológica as atividades realizadas para a definição dos métodos dos testes. Nos capítulos seguintes também serão apresentadas as considerações sobre determinação de parâmetros e amostragem.

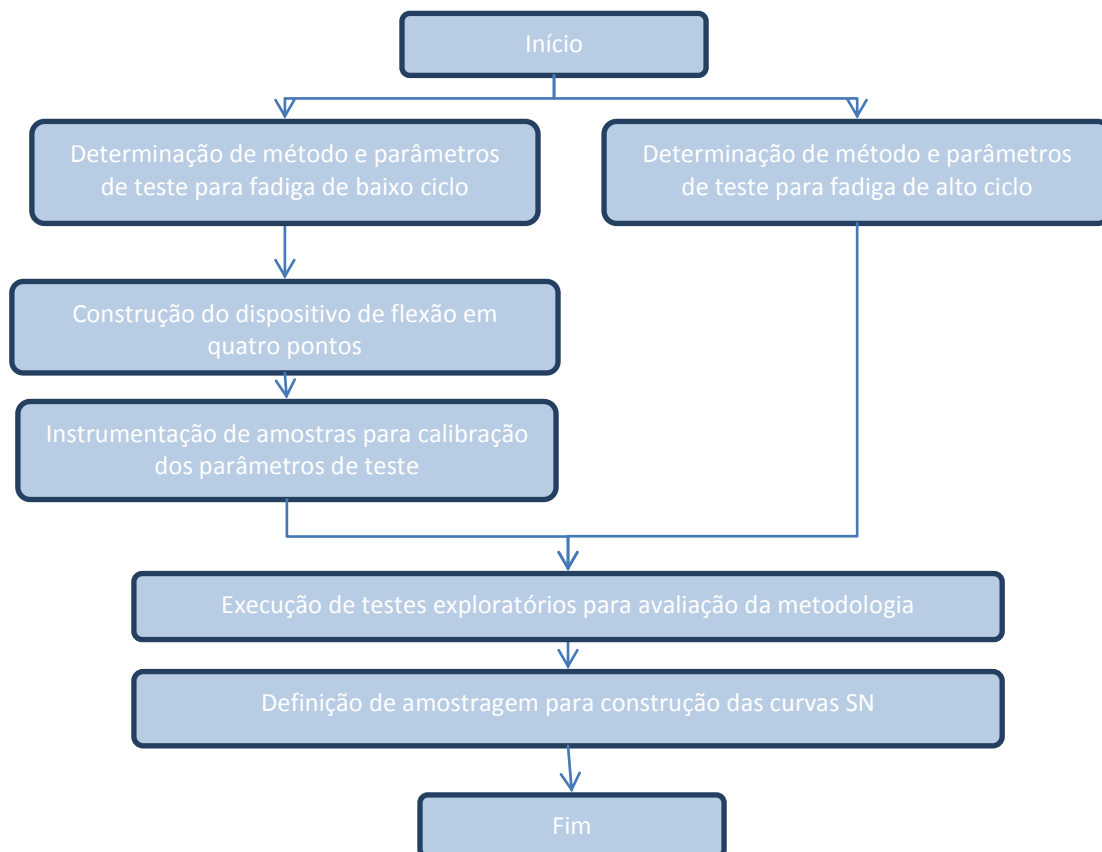


Figura 3-4: Fluxograma das atividades

#### 3.6.1. Determinação de Método e Parâmetros de Teste para Fadiga de Baixo Ciclo

Conforme as premissas descritas no capítulo 3.1, o principal objetivo buscado durante a definição do método de teste para fadiga de baixo ciclo foi a similaridade com a condição real experimentada pelos tubos metálicos durante a passagem do umbilical pela roda de popa do navio de instalação. Dentre os métodos disponíveis a fadiga por flexão em quatro pontos foi o que melhor se enquadrou nas necessidades deste trabalho.

Com relação a metodologia de execução do teste duas abordagens poderiam ser assumidas. A primeira seria a determinação da deformação plástica acumulada a ser aplicada nos tubos e proceder então com o ajuste do número de ciclos necessários para se atingir a

deformação prevista. E a segunda seria a determinação do número de ciclos a serem aplicados, de forma que a deformação plástica acumulada passasse a ser uma consequência.

Sendo um dos objetivos deste trabalho a investigação dos limites de utilização dos tubos metálicos associados a sua instalação por *PLSVs* com sistema *HLS*, o caminho de se pré-determinar um valor de deformação plástica acumulada não pareceu adequado por possibilitar a adoção de uma envoltória restritiva. A alternativa de se pré-determinar um número de ciclos mostrou-se mais alinhada com os objetivos deste trabalho permitindo uma extrapolação mais segura das condições reais de utilização dos tubos.

A determinação do número de ciclos de flexão foi baseada em condições reais de instalação de um umbilical submarino. Utilizou-se dados históricos de condições médias de mar na costa sudeste brasileira, período de onda de 8 segundos, associados com tempos médios de paradas em operações de instalação, 12 horas. Uma estimativa simplificada cruzando-se o período de onda com tempo de parada indica a possibilidade de um umbilical ser submetido a aproximadamente 6000 ciclos de flexão na roda de popa dos navios.

Para este trabalho serão então aplicados 6000 ciclos de flexão nas amostras de tubo para simular o dano relativa a instalação do umbilical. Sendo a deformação aplicada sobre os tubos, a cada ciclo de flexão, a obtida conforme descrito no capítulo 3.5.

### **3.6.2. Construção do Dispositivo de Flexão em quatro pontos**

Uma vez que o teste de fadiga de baixo ciclo contempla a imposição de deformações plásticas nos tubos metálicos, a concepção do dispositivo deve possibilitar a retificação da amostra em cada ciclo de flexão. Foi então utilizado o dispositivo mostrado na Figura 3-5 onde os roletes para o apoio da amostra permitem também a sua retificação.

Inicialmente os roletes foram fabricados em material metálico, entretanto, após a realização de testes preliminares, observou-se o surgimento de amassamentos e trincas nas amostras na região do contato com os roletes. Os amassamentos claramente exerceriam grande influência nos resultados do teste. Então para se eliminar este problema decidiu-se fabricar os roletes em material polimérico. Após novos testes com o novo material para as peças não mais foi observada a reincidência de amassamento.

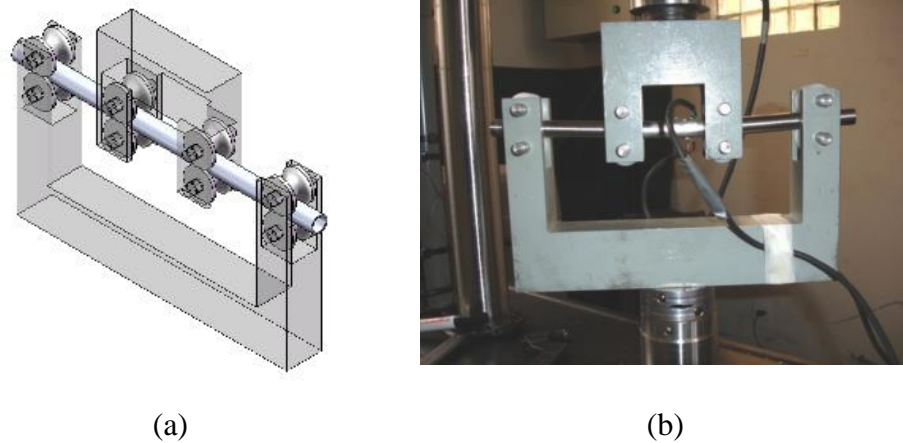


Figura 3-5: Dispositivo de flexão em quatro pontos desenvolvido para os testes. Imagem (a) mostra a concepção para fabricação e a imagem (b) mostra o dispositivo em teste. Fontes: Autor

### 3.6.3. Instrumentação de Amostras para Calibração dos Controles de Teste

Definidos o número de ciclos a serem executados e a deformação a ser imposta aos tubos em cada ciclo de flexão, a instrumentação de amostras para a calibração dos controles do teste foi extremamente importante para se garantir a correta execução dos ensaios, principalmente para o ajuste de frequência da ciclagem de forma a se aplicar as deformações desejadas.

Realizou-se uma série de ensaios com tubos instrumentados, primeiramente estáticos e depois dinâmicos, para se determinar os seguintes parâmetros de ensaio:

- Deslocamento do lado móvel do dispositivo de teste para obtenção das deformações desejadas nos tubos;
- Frequência de teste que permitisse a correta aplicação da deformação desejada;

A Figura 3-6 mostra os tubos instrumentados utilizados para a calibração do teste. Em cada amostra foram utilizados dois extensômetros de resistência elétrica posicionados com 180 graus de defasagem para que fossem monitoradas ao longo do ciclo de flexão as regiões de tração e compressão máximas.



Figura 3-6: Tubos instrumentados para calibração do ensaio de flexão. Fonte: Autor

#### **3.6.4. Determinação de Método e Parâmetros de Teste para Fadiga de Alto Ciclo**

Para a execução dos ensaios de fadiga de alto ciclo, e efetivamente a construção das curvas SN, adotou-se uma abordagem convencional de submeter as amostras a um regime de carregamento uniaxial com ciclo de tensão flutuante. A escolha dos níveis de variação de tensão foi baseada na curva de fadiga apresentada pela recomendação de prática DNV-RP-C203. Foram selecionados dois níveis de variação de tensão com expectativa de falha entre 10.000 e 100.000 ciclos e um nível de variação de tensão para uma expectativa de falha de 1.000.000 de ciclos.

#### **3.6.5. Execução de Testes Exploratórios para Verificação Inicial da Metodologia**

Conforme já mencionado em capítulos anteriores a metodologia adotada para este trabalho teve como premissa a maior similaridade possível com os tipos de esforços reais sofridos pelos tubos metálicos. Porém algumas questões importantes a respeito da representatividade da metodologia, em termos de nível de dano aplicado, surgiram no desenvolvimento do trabalho. Como exemplo, a possibilidade de falha das amostras durante os 6000 ciclos previstos para a fadiga de baixo ciclo ou não havendo falha o quanto se estaria longe dela. Então de forma a se minimizar estas incertezas entendeu-se como necessário tanto para avaliar a robustez da metodologia como para enriquecer os resultados deste trabalho, e conseqüentemente auxiliar na sua aplicação prática, a realização de testes exploratórios específicos.

Foram então definidos dois programas de testes exploratórios. O primeiro programa teve como objetivo a verificação do quão longe da falha dos tubos se estava trabalhando para o regime de carregamento de flexão isoladamente, correspondente somente a fadiga de baixo ciclo. Quatro amostras de tubo foram submetidas ao ensaio de flexão em quatro pontos até a falha dos corpos de prova. No segundo programa buscou-se realizar uma rodada piloto do programa completo aplicando-se a fadiga de baixo ciclo e a fadiga de alto ciclo para que se pudesse fazer uma avaliação do dano combinado dos regimes. Três amostras foram primeiramente submetidas a 6000 ciclos no ensaio de flexão em quatro pontos e posteriormente foram submetidas ao ensaio cíclico de tração até a falha dos tubos.

Os resultados obtidos nestes testes, que estão apresentados no capítulo 4 foram extremamente importantes para se ter uma percepção dos níveis reais de dano em que se estava trabalhando. A Figura 3-5 apresenta o resumo do programa destes testes exploratórios.

Tabela 3-5: Programa de testes exploratórios

Regime de Carregamento	Amostra	Espessura de parede do tubo (mm)	Solda circunferencial	Ciclos de Fadiga Flexão em quatro pontos	Varição de tensão Fadiga Axial mín-máx (MPa)
Fadiga flexão em quatro pontos até a falha	CP-exp-f_1	1,1	Não	Até a falha	-
	CP-exp-f_2			Até a falha	-
	CP-exp-f_3			Até a falha	-
	CP-exp-f_4			Até a falha	-
Fadiga Flexão em quatro pontos + Fadiga Tração até falha	CP-exp-ft_1	1,1	Não	6000	45-450
	CP-exp-ft_2			6000	45-450
	CP-exp-ft_3			6000	45-450

### 3.6.6. Definição de Amostragem para Construção das Curvas SN

Sendo um dos objetivos deste trabalho a comparação das curvas SN construídas com curvas normalmente utilizadas em projeto, é necessário que o programa de amostragem garanta uma adequada representatividade estatística dos resultados. Como base para esta etapa do trabalho adotou-se a norma ASTM E 739 onde são apresentados requisitos mínimos a serem atendidos para classificação da curva obtida como sendo preliminar e exploratório, pesquisa e desenvolvimento, admissível para projeto ou dados de confiabilidade.

Para este trabalho apenas as duas últimas classificações são aceitáveis, admissível para projeto ou dados de confiabilidade, portanto, uma amostragem mínima de testes válidos foi adotada para se ter a representatividade estatística desejada.

Definiu-se então como condição ótima a obtenção de 15 testes válidos para cada espessura de tubo ensaiada e, caso não fosse possível atingir este número, um mínimo de 12 testes válidos.

A Tabela 3-6 abaixo apresenta os detalhes do programa de testes montado para as duas espessuras de tubos ensaiados.

Tabela 3-6: Programa de testes para construção das curvas SN

Amostras	Espessura de parede do tubo (mm)	Solda circunferencial	Número de ciclos de Fadiga Flexão em quatro pontos	Variação de tensão mín-máx (MPa)	Tensão média (MPa)
CP_1 a CP_5	1,1	Não	6000	30-300	165
CP_6 a CP_8	1,3	Sim			
CP_9 a CP_13	1,1	Não		40-400	220
CP_14 a CP_19	1,3	Sim			
CP_20 a CP_24	1,1	Não		50-500	275
CP_25 a CP_29	1,3	Sim			

### 3.7. CARACTERIZAÇÃO DAS SUPERFÍCIES DE FRATURA

Após a execução dos testes de fadiga de alto ciclo foram selecionadas quatro amostras de tubos com espessura de parede de 1,3 mm, CP\_17, CP\_19, CP\_27 e CP\_28, que tiveram a ruptura na solda ou na zona termicamente afetada, para caracterização das superfícies de fratura. A análise das superfícies foi realizada em microscópio eletrônico de varredura (MEV).

### 3.8. CONSTRUÇÃO DAS CURVAS SN

Com objetivo de se comparar as curvas obtidas neste trabalho com as apresentadas na recomendação de prática DNV RP-C203, os dados dos ensaios foram trabalhados para se obter uma equação de reta conforme a construção apresentada pelo modelo de equação 3.2.

$$\text{Log } N = A - Bx(\text{Log} \Delta S) \quad (3.2)$$

onde,

N é o número de ciclos para falha

A e B são coeficientes obtidos por regressão dos resultados dos testes

$\Delta S$  é a variação de tensão

Nota-se que a aplicação direta da equação 3.2 sobre os resultados acarreta na obtenção de uma curva média. Para se construir uma curva de projeto é recomendável deduzir-se o desvio padrão do conjunto e realizar o rebaixamento da curva. Para as curvas de projeto construídas neste trabalho utilizou-se um rebaixamento de dois desvios padrão. Para implementação deste tratamento a equação 3.2 deve ser corrigida para a equação 3.3.

$$\text{Log } N = (A - 2x\sigma) - Bx(\text{Log}\Delta S) \quad (3.3)$$

onde,

N é o número de ciclos para falha

A e B são coeficientes obtidos por regressão dos resultados dos testes

$\Delta S$  é a variação de tensão

$\sigma$  é o desvio padrão do conjunto

A construção das curvas de projeto foi importante porque, conforme já discutido no capítulo 2.4.3, é possível deduzir que a curva apresentada na DNV RP-C203 é também uma curva de projeto, e não uma curva média.

Uma verificação necessária sobre a consistência da construção das curvas é o cálculo de sua replicação, que permite enquadrá-las em quatro diferentes níveis de aplicação. Começando por um objetivo exploratório preliminar até um dado confiável para projeto. Conforme apresentado pela norma ASTM A739 a replicação é definida pela equação 3.4.

$$\% \text{ replicação} = [100 - 1 / (\text{número total de níveis de variação de tensão testados/número total de amostras ensaiadas})] \quad (3.4)$$

As amostras que apresentaram resistência maior que 10 milhões de ciclos foram desconsideradas da análise.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. CURVAS TENSÃO-DEFORMAÇÃO

Os resultados dos ensaios de tração dos tubos apresentaram uma variação no comportamento das curvas na região do limite elástico e início do regime plástico. Baseado em análises prévias, simplificadas, para estimativa da ordem de grandeza das deformações a que os tubos estariam submetidos durante a instalação dos umbilicais, havia a expectativa de que as deformações se concentrassem justamente no início do regime plástico. Portanto, as variações percebidas nas curvas, que para outras análises podem ser consideradas desprezíveis, se mostraram significativas para os estudos deste trabalho. A tentativa de se adotar uma única curva como sendo representativa para todos os resultados mostrou-se frágil e tenderia a carregar razoáveis incertezas aos modelamentos numéricos e, conseqüentemente, aos resultados finais do trabalho. Para contornar esta questão decidiu-se então por realizar as análises numéricas para todas as curvas obtidas nos ensaios de tração e debruçar-se sobre o tratamento dos dados destes resultados.

A Figura 4-1 apresenta as curvas obtidas nos ensaios de tração para as seis amostras testadas. É visualmente possível perceber a dispersão que ocorre principalmente no início do regime plástico.

Cada uma das curvas obtidas nos ensaios foi transposta aos modelamentos numéricos.

A Figura 4-2 apresenta a comparação entre as curvas dos ensaios e as utilizadas na alimentação dos modelos. A Figura 4-3 mostra todas as curvas utilizadas nos modelos numéricos.

A Tabela 4-1 apresenta a correlação entre tensão de escoamento e deformação no escoamento para todas as curvas. Pode-se observar que as amostras sem solda circunferencial apresentaram tensão de escoamento e deformação no escoamento maiores que as amostras contendo solda circunferencial.

A Figura 4-4 apresenta a máquina e o dispositivo utilizados nos ensaios de tração.



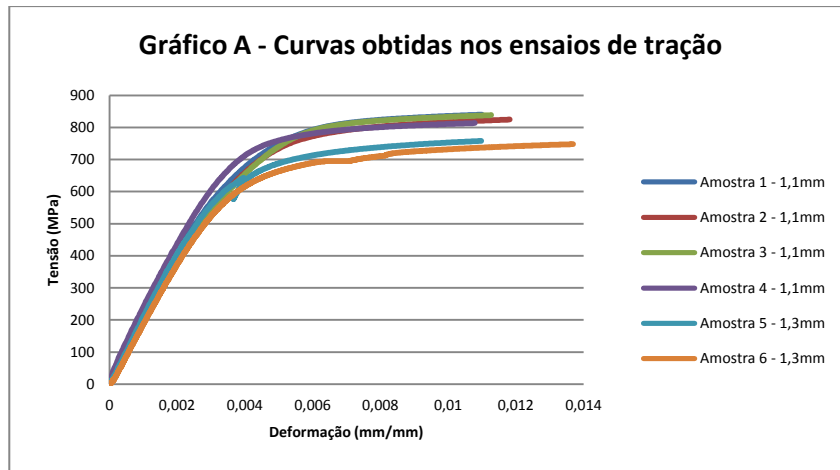


Figura 4-1: Curvas Tensão-Deformação obtidas nos ensaios de tração

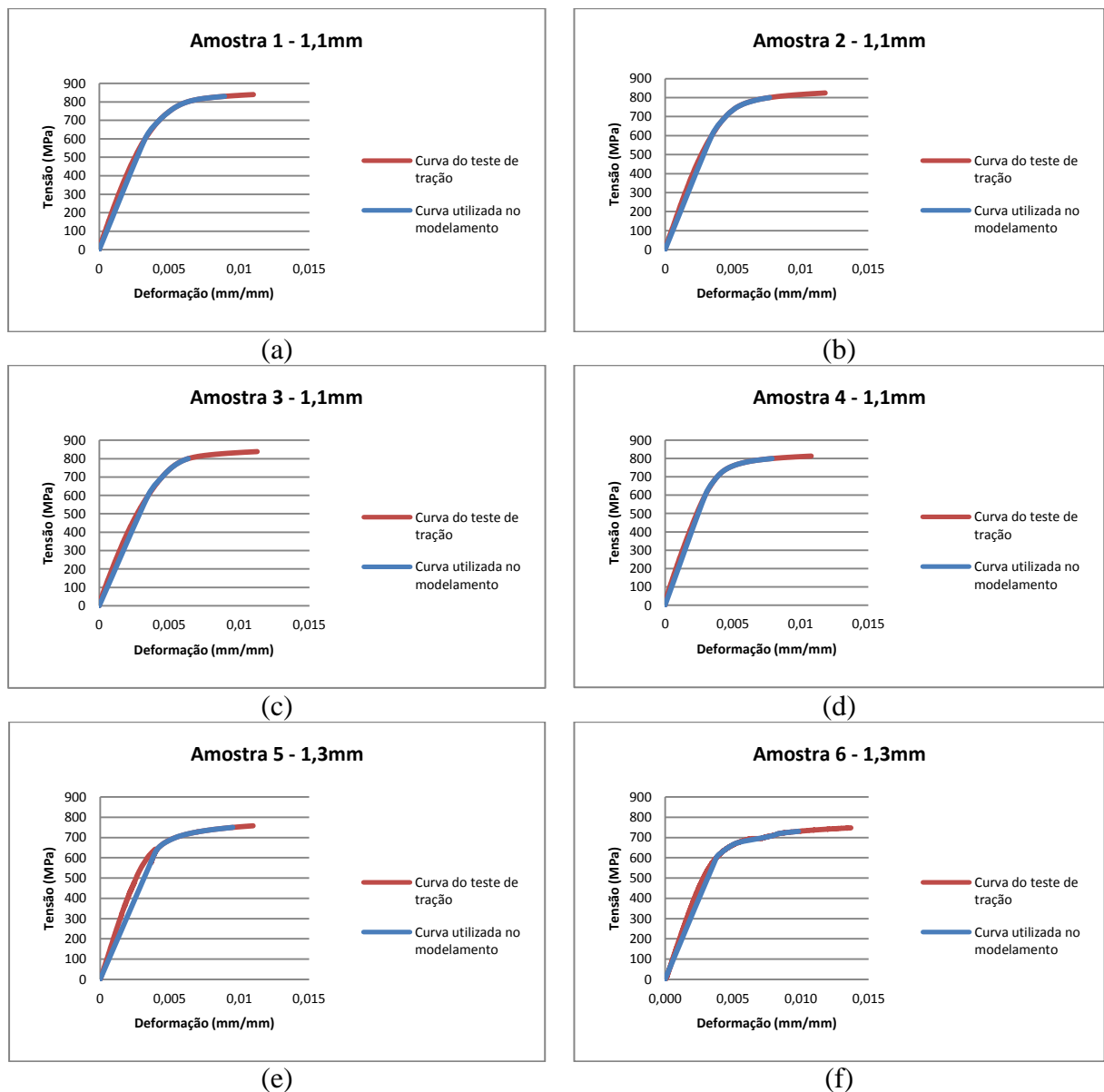


Figura 4-2: Comparação entre as curvas obtidas nos ensaios de tração e as utilizadas nos modelamentos numéricos

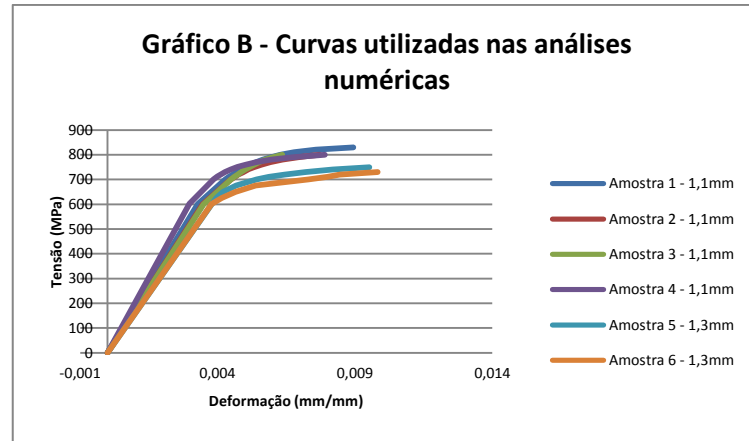


Figura 4-3: Curvas utilizadas nos modelamentos

Tabela 4-1: Correlação Tensão-Deformação no escoamento para as curvas

Curva Tensão-Deformação	Espessura de parede do tubo (mm)	Amostra contendo solda circunferencial	Módulo de elasticidade (GPa)	$\sigma_{esc}$ (MPa)	$\epsilon$ para $\sigma_{esc}$ (%)
CP_tr_1	1,1	Não	192	796	0.613
CP_tr_2	1,1	Não	185	776	0.616
CP_tr_3	1,1	Não	181	801	0.641
CP_tr_4	1,1	Não	215	773	0.558
CP_tr_5	1,3	Sim	191	706	0.568
CP_tr_6	1,3	Sim	176	687	0.594



(a)



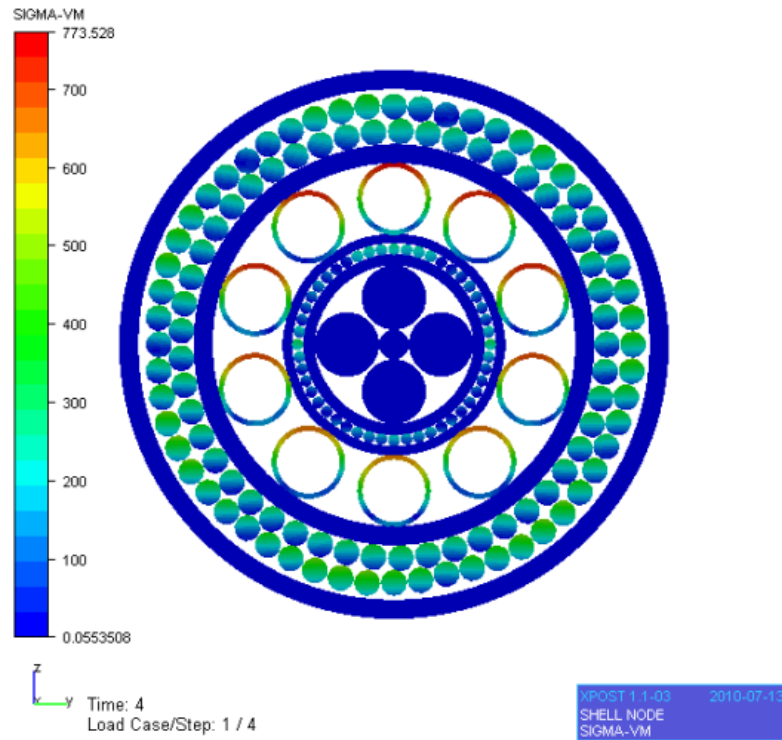
(b)

Figura 4-4: Máquina e dispositivo utilizados nos testes mostrados na imagem (a) e uma amostra de tubos após ensaio mostrado na figura (b). Fontes: Autor

#### 4.2. DETERMINAÇÃO DOS ESFORÇOS LOCAIS NOS TUBOS METÁLICOS DURANTE A INSTALAÇÃO DOS UMBILICAIS

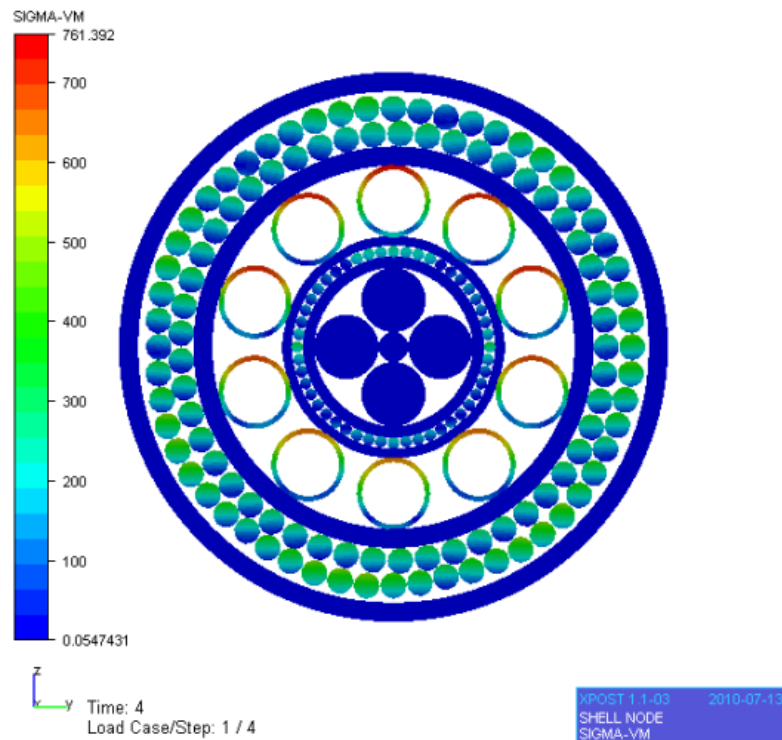
Os modelos numéricos foram trabalhados de forma a se garantir que todas as não linearidades possibilitadas pelo UFlex fossem incorporadas nas análises. A Figura 4-5 apresenta em forma gráfica da interface de pós-processamento do UFlex os resultados para os carregamentos utilizados (**Tabela 3-4**).

Tubos 1/2";t=1,1mm;CURVA LAMEF 1;LDA=2000m



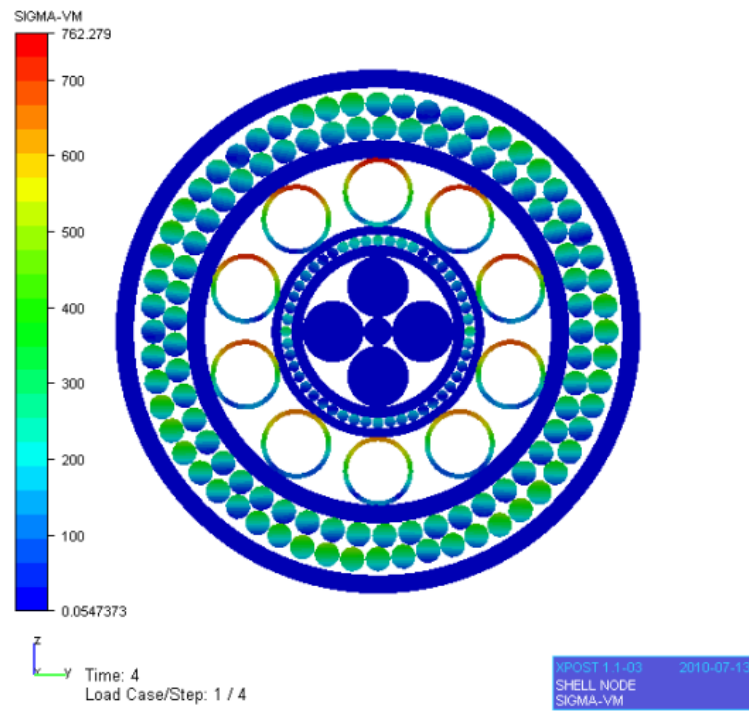
(a) MODELO 1

Tubos 1/2";t=1,1mm;CURVA LAMEF 2;LDA=2000m



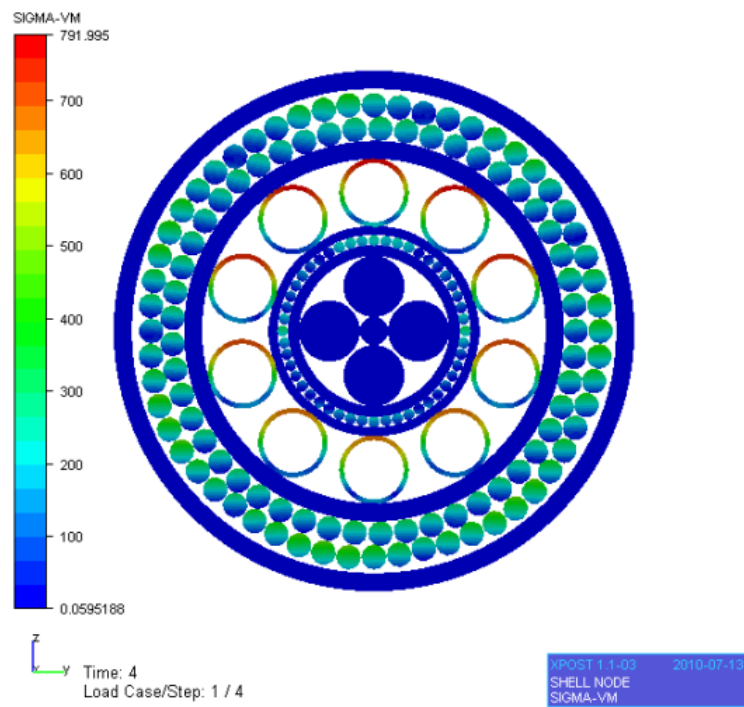
(b) MODELO 2

Tubos 1/2";t=1,1mm;CURVA LAMEF 3;LDA=2000m



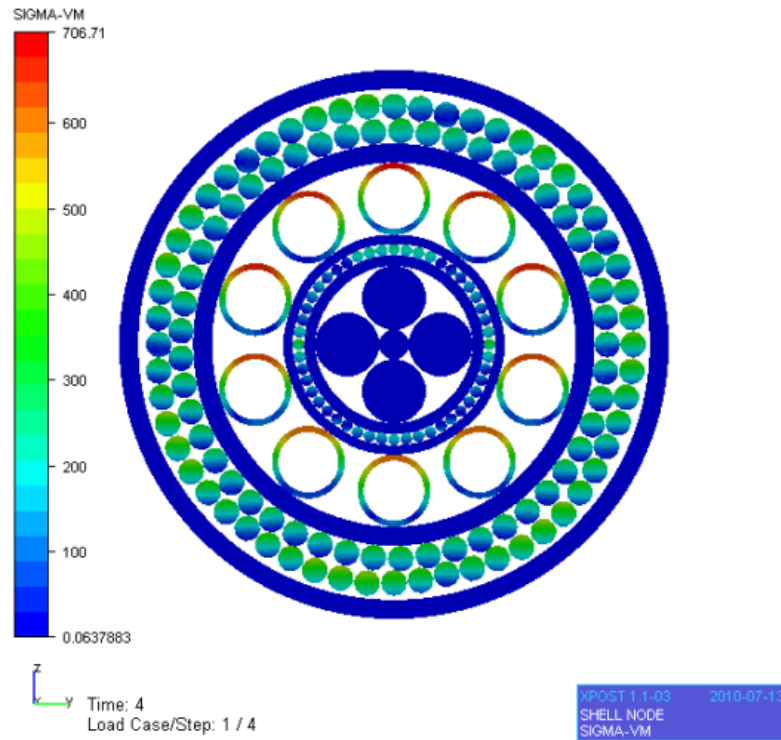
(c) MODELO 3

Tubos 1/2";t=1,1mm;CURVA LAMEF 4;LDA=2000m



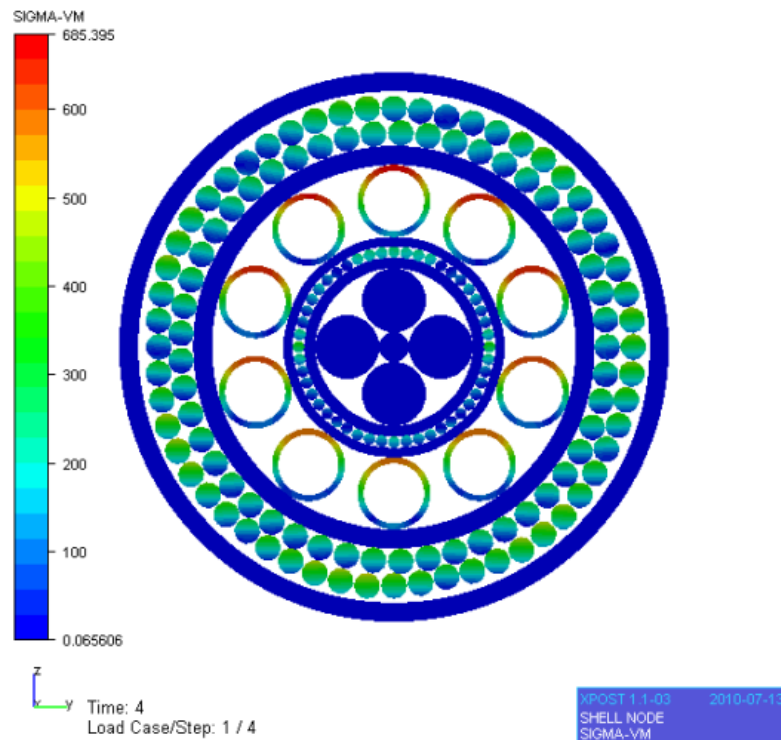
(d) MODELO 4

Tubos 1/2";t=1,3mm;CURVA LAMEF 5;LDA=2000m



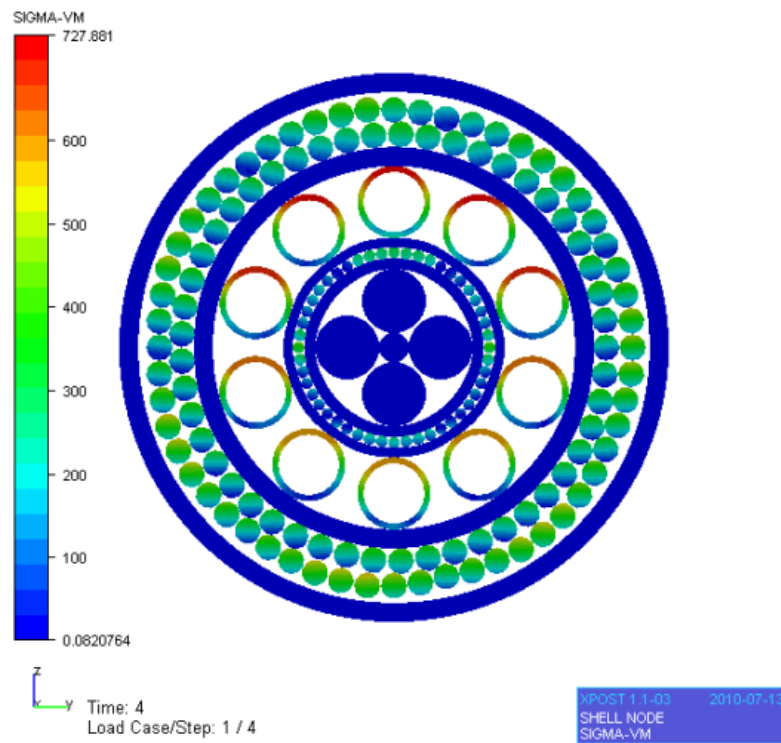
(e) MODELO 5

Tubos 1/2";t=1,3mm;CURVA LAMEF 6;LDA=2000m



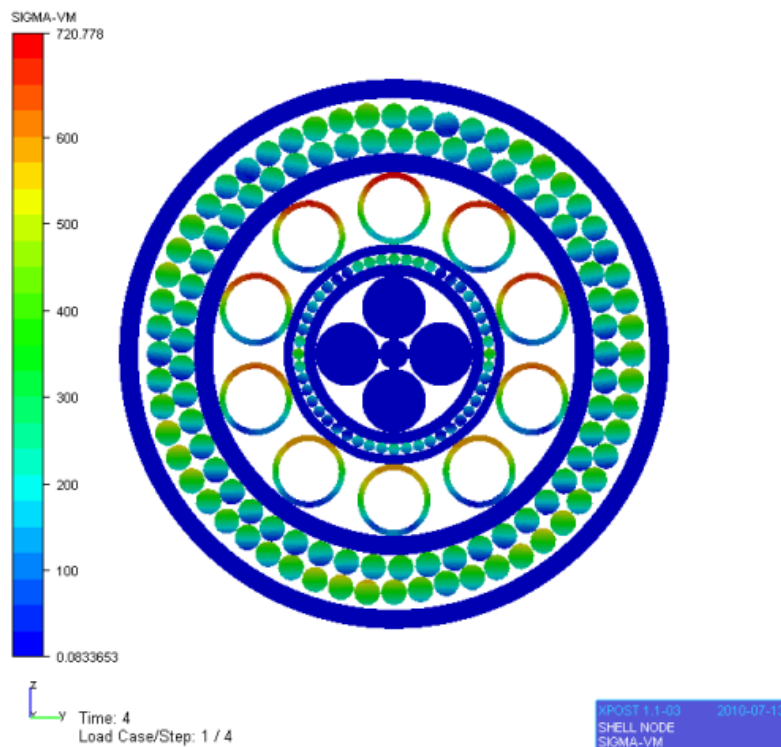
(f) MODELO 6

Tubos 1/2";t=1,3mm;CURVA LAMEF 5;LDA=2500m



(g) MODELO 7

Tubos 1/2";t=1,3mm;CURVA LAMEF 6;LDA=2500m



(h) MODELO 8

Figura 4-5: Resultados de tensão máxima das análises numéricas

Os resultados das análises foram qualitativamente coerentes com os esforços impostos aos umbilicais. O carregamento de tração gerando uma distribuição homogênea de carga pela seção, balanceada entre os diversos componentes em função de sua rigidez e ângulo de assentamento, e o esperado efeito de estrangulamento das armaduras de tração sobre o núcleo do umbilical. A contribuição do carregamento de flexão é mais notável observando-se a variação de tensão presente ao longo da seção dos tubos metálicos.

Em cima dos resultados, o trabalho de interpretação e tratamento dos dados foi realizado com objetivo de se construir uma metodologia abrangente para utilização dos produtos das análises. Tomou-se o cuidado porém para que a metodologia não fosse excessivamente conservadora o que poderia levar a dificuldade de conclusões objetivas para o trabalho.

A Tabela 4-2 condensa os resultados das análises e apresenta as informações das curvas de material de cada modelo. Nas duas colunas intituladas RESULTADOS DAS ANÁLISES tem-se as tensões máximas de von Mises, obtidas para o tubo metálico que sofreu a maior sollicitação, e as respectivas deformações totais máximas, deformação elástica mais deformação plástica, relativas a estas tensões. Nas colunas intituladas PROPRIEDADES DOS MATERIAIS são apresentadas as tensões de escoamento e as respectivas deformações correspondentes para as curvas Tensão-Deformação utilizadas na construção de cada um dos modelos numéricos. Comparando-se os resultados das análises com as propriedades dos materiais vê-se que temos a ocorrência de deformação plástica para os modelos MODELO 4, MODELO 5, MODELO 7 e MODELO 8. Para os demais modelos os carregamentos levaram os tubos ao limiar do limite elástico sem, entretanto, a ocorrência de deformação plástica. Estes resultados foram muito importantes para a determinação das deformações a serem impostas nos testes dos tubos. Cada modelo numérico foi construído considerando-se apenas uma curva de material para todos os tubos do umbilical, homogeneidade que evidentemente não ocorre na realidade. Em um umbilical real feito com diferentes tubos, podendo ser de uma mesma corrida de fabricação ou não e, mesmo sendo, é esperada uma dispersão nas propriedades mecânicas dos tubos dentro de limites especificados em projeto. Esta dispersão natural esperada para um universo de tubos é a observada nas curvas Tensão-Deformação. A abordagem então assumida neste trabalho para se tratar esta variação de propriedades foi a de definir o parâmetro Deformação Máxima Média, sendo este parâmetro a média aritmética das deformações máximas obtidas para todos os modelos.

A Deformação Máxima Média representa neste trabalho a máxima deformação esperada, no tubo mais sollicitado, em um caso real de instalação de umbilical para os cenários



modelados. Portanto, o valor absoluto da Deformação Máxima Média apresentado na Tabela 4-2 foi assumido como o parâmetro básico para realização dos testes de fadiga de baixo ciclo. Apesar de não haver ocorrido deformação plástica para todos os modelos analisados, o conservadorismo imputado pela adoção da deformação média é adequado em razão da alta responsabilidade e do alto custo de manutenção dos umbilicais, mesmo sendo a deformação média relativamente alta quando comparada com alguns dos resultados. Em um umbilical real, a falha de um ou poucos tubos já representa um grande prejuízo para a sua continuidade operacional, e muitas vezes do sistema submarino.

Tomando-se então a Deformação Máxima Média é possível calcular a Deformação Plástica Acumulada (APS) esperada para cada um dos modelos, ou seja, para cada uma das curvas de material. Este cálculo é feito subtraindo-se da Deformação Máxima Média a deformação para escoamento de cada curva e desta forma temos a parcela de deformação plástica esperada. Multiplicando-se esta deformação plástica por um número de ciclos determinado, no caso deste trabalho 6000 ciclos, conforme discutido no capítulo 2.4.3, tem-se a APS. A

Tabela **4-3** apresenta os resultados destes cálculos.

Um fato que chama bastante a atenção sobre os resultados é de que os valores de APS são substancialmente maiores que os normalmente praticados na indústria. Como apresentado no capítulo 2.4.3, os valores tipicamente estudados e considerados em recomendações variam entre 20% e 30% de APS. O MODELO 4 com 428% APS representa ordem de grandeza maior que 10. E mesmo para o modelo que apresentou o menor valor, MODELO 2, com 80% APS, tem-se um resultado em torno de 4 vezes maior que a prática. Como valor médio obteve-se 212% de APS, algo em torno de 10 vezes os limites usuais.

Estes resultados foram interessantes por mostrar que os estudos deste trabalho se propõem a investigar uma condição diferente do que já se havia feito. Além da grande diferença no valor de APS, outro parâmetro específico a este trabalho é a ordem de grandeza das deformações plásticas aplicadas. Tipicamente, como discutido no capítulo 2.4.3, os danos de APS são obtidos com poucos ciclos e grandes deformações, por exemplo, 20 ciclos de 1% de deformação plástica. Conforme apresentado no capítulo 2.4.4, o aço superduplex, por ser bifásico, apresenta um comportamento notavelmente não homogêneo de distribuição de tensões internas sob regime cíclico de deformações plásticas. A depender do valor de

deformação uma fase é mobilizada preferencialmente a outra. Portanto, a exposição do material a 6000 ciclos a 0,63% de deformação plástica pode representar um tipo de dano diferente ao de imputar 20 ciclos a 1% de deformação plástica.

Tabela 4-2: Resultados das análises numéricas

	RESULTADOS DAS ANÁLISES		PROPRIEDADES DO MATERIAL (DADOS DAS CURVAS TENSÃO-DEFORMAÇÃO)		
	$\sigma_{\text{vonMises}}$ Máximas (Mpa)	$\epsilon$ para $\sigma_{\text{vonMises}}$ Máximas (%)	Curva Tensão-Deformação	$\sigma_{\text{esc}}$ (Mpa)	$\epsilon$ para $\sigma_{\text{esc}}$ (%)
MODELO 1	773	0.55	CP_tr_1	796	0.613
MODELO 2	761	0.56	CP_tr_2	776	0.616
MODELO 3	762	0.54	CP_tr_3	801	0.641
MODELO 4	792	0.69	CP_tr_4	773	0.558
MODELO 5	706	0.57	CP_tr_5	706	0.568
MODELO 6	685	0.58	CP_tr_6	687	0.594
MODELO 7	727	0.70	CP_tr_5	706	0.568
MODELO 8	720	0.85	CP_tr_6	687	0.594
Média	741	0.63	-	756.5	0.598
Desvio padrão	37	0.11	-	48	0.031

Tabela 4-3: Cálculo de APS para os modelos analisados

	CÁLCULO DA DEFORMAÇÃO PLÁSTICA ACUMULADA	
	$\epsilon_{\text{plástica}}$ (%)	Deformação Plástica Acumulada para 6000 ciclos (%)
MODELO 1	0.0164	98
MODELO 2	0.0134	80
MODELO 3	-0.0116	-70
MODELO 4	0.0714	428
MODELO 5	0.0614	368
MODELO 6	0.0354	212
MODELO 7	0.0614	368
MODELO 8	0.0354	212
Média	0.0354	212
Desvio padrão	0.028	171

### 4.3. TESTES EXPLORATÓRIOS PARA VERIFICAÇÃO INICIAL DA METODOLOGIA

#### 4.3.1. Testes de Calibração

Precedendo a execução dos testes exploratórios foi realizado um trabalho de calibração dos parâmetros do teste de fadiga por flexão em quatro pontos. Para esta calibração foram utilizados tubos instrumentados com objetivo de garantir a adequada precisão nos controles de deslocamento do dispositivo montado na máquina de teste e da frequência de realização da ciclagem.

Primeiramente foi feita uma calibração estática para determinação do deslocamento a ser aplicado no dispositivo de teste. Após esta etapa foram feitos testes com diferentes frequências de ciclagem para se determinar a frequência que permitisse celeridade na execução nos testes sem comprometer a deformação a ser imposta. A Figura 4-6 mostra a montagem do dispositivo e tubo instrumentado na máquina de teste.

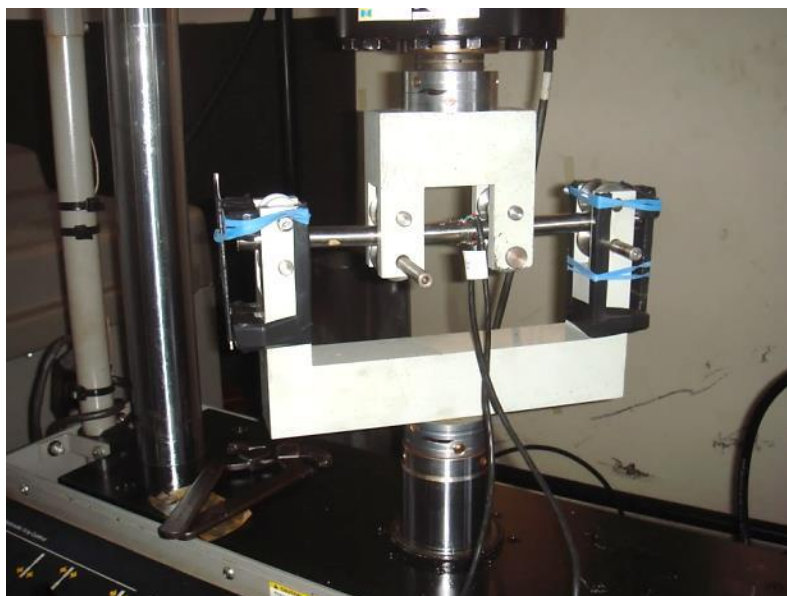


Figura 4-6: Montagem utilizado para o ensaio de flexão em quatro pontos. Fonte: Autor

Durante a execução dos testes de calibração foram identificadas algumas modificações necessárias ao dispositivo de teste. A primeira modificação foi a substituição dos roletes de aço por roletes poliméricos. Nas primeiras rodagens de ciclagem observou-se que os roletes

de aço estavam provocando amassamento nos tubos e favorecendo o início de propagação de trincas naquela região. A Figura 4-7 mostra uma destas trincas que tiveram início no contato do rolete com o tubo. A Figura 4-8 mostra o dispositivo inicialmente com os roletes de aço e depois com os roletes poliméricos.

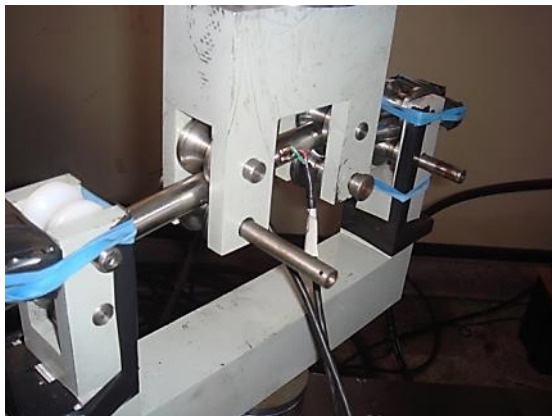


(a)

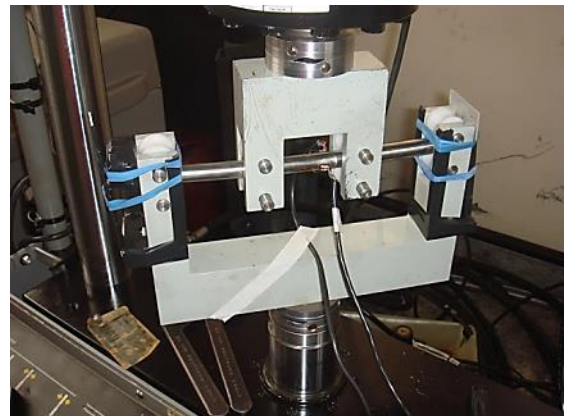


(b)

Figura 4-7: Imagens (a) e (b) mostram trinca observada em ensaios preliminares. Fontes: Autor



(a)



(b)

Figura 4-8: Imagem (a) mostrando dispositivo inicialmente utilizando roletes metálicos e imagem (b) mostrando alteração para os roletes poliméricos. Fontes: Autor

Uma segunda modificação necessária foi a utilização de um sistema de trava para impedir que os tubos girassem durante o ensaio e então garantir que o dano ficasse concentrado sempre na mesma geratriz. Com os tubos instrumentados foi fácil perceber esta tendência de giro. Para o travamento dos tubos foram feitos rasgos em suas extremidades e inseridas chapas em “T” presas ao dispositivo de teste. A Figura 4-9 apresenta em detalhe o sistema de trava utilizado.

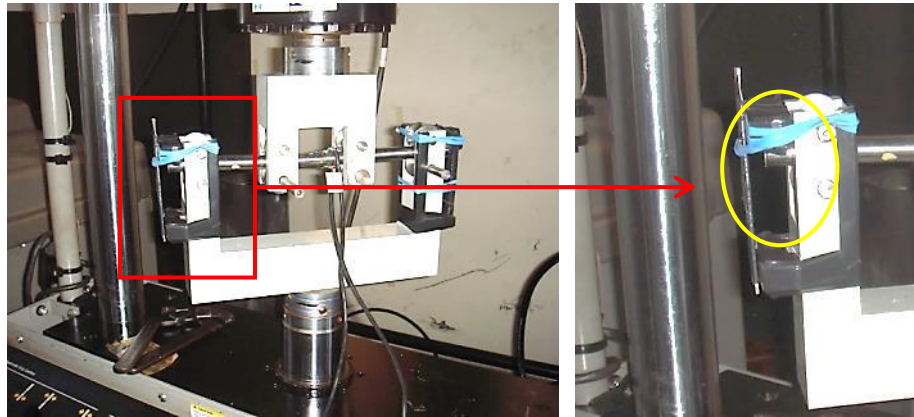


Figura 4-9: Imagens mostrando em detalhe o sistema de travamento de giro dos tubos. Fontes: Autor

#### 4.3.2. Testes exploratórios

A primeira etapa dos testes exploratórios foi a realização dos ensaios de fadiga por flexão em quatro pontos até a falha das amostras. O objetivo foi verificar o quão longe os 6000 ciclos previstos para os testes definitivos estavam da falha dos tubos. A Tabela 4-4 apresenta o resumo dos resultados.

Tabela 4-4: Resultados dos testes de fadiga flexão em quatro pontos exploratórios

Regime de Carregamento	Amostra	Espessura de parede (mm)	Solda circunferencial	Ciclos até a falha
Fadiga flexão em quatro pontos até a falha	CP-exp-f_1	1,1	Não	140000
	CP-exp-f_2	1,1	Não	70000
	CP-exp-f_3	1,1	Não	106000
	CP-exp-f_4	1,1	Não	96000
Média				103000
Desvio padrão				28950

Com base nos resultados, apresentando uma média de 103000 ciclos para falha, conclui-se que os 6000 ciclos previstos implicariam em uma condição de dano ainda pequeno considerando o regime de flexão isoladamente.

Após avaliação qualitativa do dano para o teste de flexão em quatro pontos foi realizada uma rodada piloto do programa de teste completo. Três amostras foram primeiramente submetidas a 6000 ciclos em regime de flexão e depois foram submetidas à fadiga em regime de tração pura. A Tabela 4-5 apresenta o resumo dos resultados.

Tabela 4-5: Resultados dos ensaios completos exploratórios

Regime de Carregamento	Amostra	Espessura de parede (mm)	Solda circunferencial	Ciclos de Fadiga Flexão em quatro pontos	Varição de tensão Fadiga Axial mín-máx (MPa)	Ciclos até a falha
Fadiga Flexão em quatro pontos + Fadiga Tração até falha	CP-exp-ft_1	1,1	Não	6000	45-450	262500
	CP-exp-ft_2	1,1	Não	6000	45-450	180000
	CP-exp-ft_3	1,1	Não	6000	45-450	150700
Média						197700
Desvio Padrão						57900

Comparando os ciclos até a falha com a expectativa de vida apresentada pela DNV RP-C203, na recomendação de prática da DNV a curva SN não considera o regime de fadiga de baixo ciclo, observa-se que existe uma boa coerência entre os resultados. Em uma análise qualitativa preliminar pôde-se inferir que a combinação dos carregamentos não resultou em uma condição de dano muito mais severa. A recomendação DNV RP-C203 não explicita se a curva apresentada é uma curva média ou uma curva de projeto. Porém, como o seu texto trata da curva como sendo “*design of small diameter pipe umbilicals*” e não é apresentado nenhum desvio padrão para se deduzir uma curva de projeto, assumiu-se tratar de uma curva de projeto. Foi feita também uma comparação dos resultados com a transposição da curva DNV para uma curva média, considerando-se o incremento de dois desvios padrão. Como a recomendação DNV não apresenta o desvio padrão a ser utilizado adotou-se o valor de referência de 0,2. Este valor de referência foi obtido de um extenso histórico de construção de curvas de fadiga em arames de aço na Petrobras. Na época da adoção deste valor tinha-se um histórico de 34 curvas SN, com desvio padrão médio desta população de 0,16. Resolveu-se então adotar 0,2 como um valor representativo e conservador. A comparação com esta curva média construída reforçou a ideia de que a curva original da DNV trata-se de uma curva de projeto pela boa similaridade entre os resultados dos testes e a expectativa de vida da curva. A Tabela 4-6 apresenta a comparação dos resultados com as curvas DNV.

Tabela 4-6: Comparação dos resultados dos testes exploratórios com a expectativa de vida apresentada na DNV RP-C203

Amostra	Ciclos até a falha no teste	Expectativa de vida DNV RP-C203 para variação de tensão 405 MPa	
		Curva apresentada na recomendação	Curva média transposta
CP-exp-ft_1	262500	67500	169700
CP-exp-ft_2	180000		
CP-exp-ft_3	150700		

Os resultados dos testes exploratórios foram fundamentais para que se pudesse ter uma primeira impressão dos níveis de dano que estavam sendo propostos no trabalho e para ajustar potenciais problemas de execução nos testes definitivos.

#### 4.4. EXECUÇÃO DO PROGRAMA DE TESTES E RESULTADOS

Na execução dos testes de fadiga de alto ciclo, fadiga axial, ocorreram alguns eventos de quebra dos tubos por propagação de trincas na região das garras da máquina de teste. Este tipo de falha já era um evento potencial considerado, por isso, os testes foram iniciados com uso de calhas de alumínio entre as garras e os tubos e com uso dos mesmos pinos utilizados nos teste de tração, conforme requisito da norma ASTM E8. Para solucionar o problema ajustou-se a geometria da cabeça do pino aliviando o contato com a parede interna dos tubos. Como a região central dos tubos era a região de interesse, onde foi aplicado o dano de baixo ciclo, as amostras que falharam na região das garras não foram descartadas. As amostras foram novamente preparadas e foi dada continuidade ao teste. A Figura 4-10 mostra uma das falhas ocorridas na garra e o tubo novamente colocado para teste.

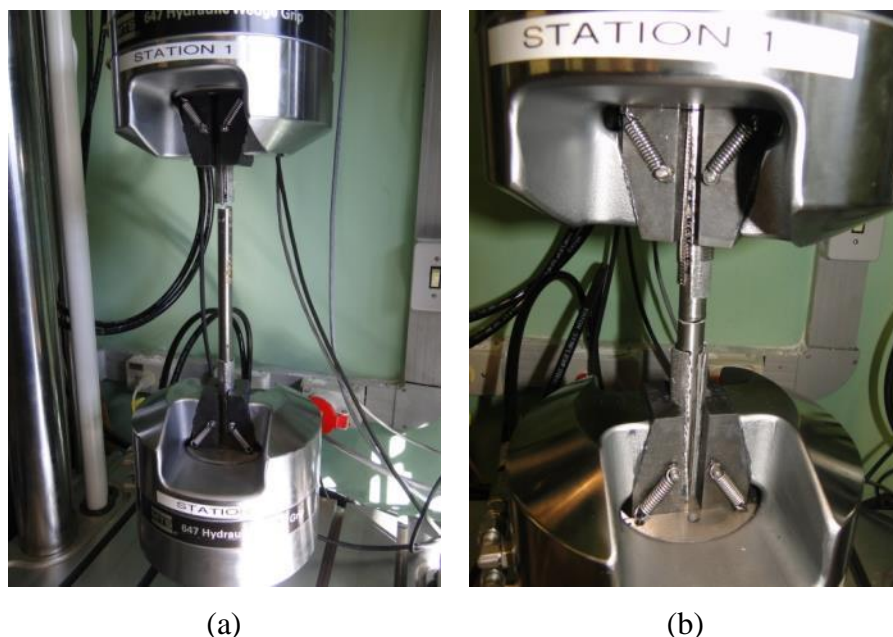


Figura 4-10: Imagem (a) mostrando falha do tubo na região das garras e imagem (b) mostrando a amostra novamente posta em teste. Fontes: Autor

Após implementação dos ajustes no esquema de montagem as rupturas dos tubos passaram a se concentrar na região de interesse, conforme mostra a Figura 4-11.





Figura 4-11: Exemplo de amostra com ruptura na região de interesse após ajustes no dispositivo de teste. Fonte: Autor

A Tabela 4-7 apresenta o resumo dos resultados obtidos nos testes.

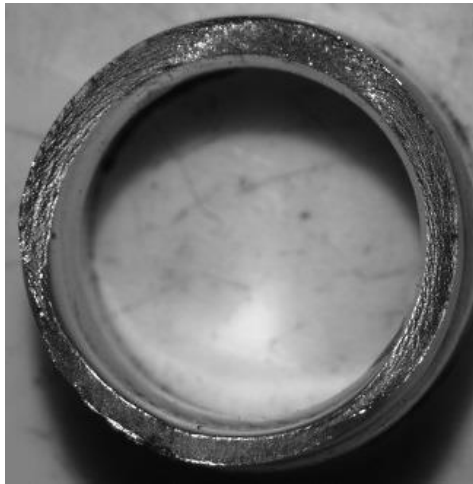
Tabela 4-7: Resultados dos testes de fadiga de alto ciclo

Amostra	Espessura de parede (mm)	Solda circunferencial	Ciclos de Fadiga Flexão em quatro pontos	Varição de tensão Fadiga Axial mín-máx (MPa)	Ciclos até a falha Fadiga Axial
CP_1	1,1	Não	6000	30-300	3186700
CP_2					10000000
CP_3					5251900
CP_4					1290496
CP_5					10000000
CP_6	1,3	Sim			4343679
CP_7					6276745
CP_8					10000000
CP_9	1,1	Não		40-400	397369
CP_10					513198
CP_11					165929
CP_12					177547
CP_13					357191
CP_14	1,3	Sim			674554
CP_15					663890
CP_16					1019923
CP_17					504918
CP_18					1398115
CP_19					711188
CP_20	1,1	Não			50-500
CP_21				218314	
CP_22				243595	
CP_23				167228	
CP_24				252971	
CP_25	1,3	Sim	267336		
CP_26			150940		
CP_27			132262		
CP_28			191729		
CP_29			167208		

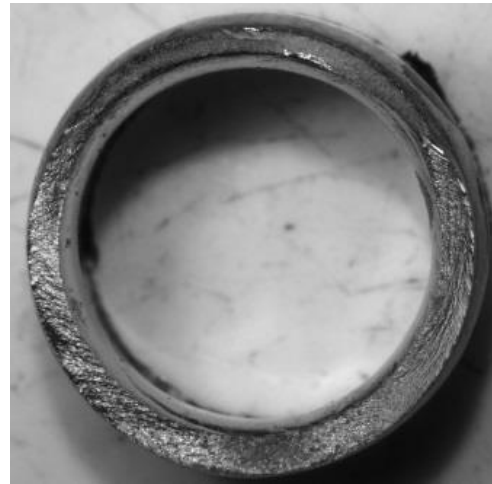


#### 4.5. CARACTERIZAÇÃO DAS SUPERFÍCIES DE FRATURA

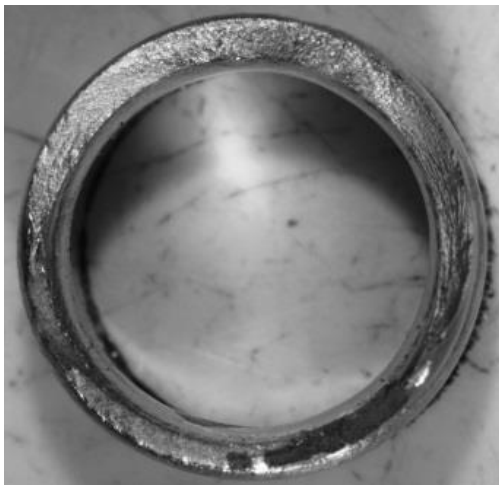
A Figura 4-12 apresenta as superfícies de fratura em lupa de baixo aumento. Esta avaliação preliminar auxiliou na identificação dos prováveis pontos de iniciação de trinca para a análise detalhada em MEV.



(a) CP\_17



(b) CP\_19



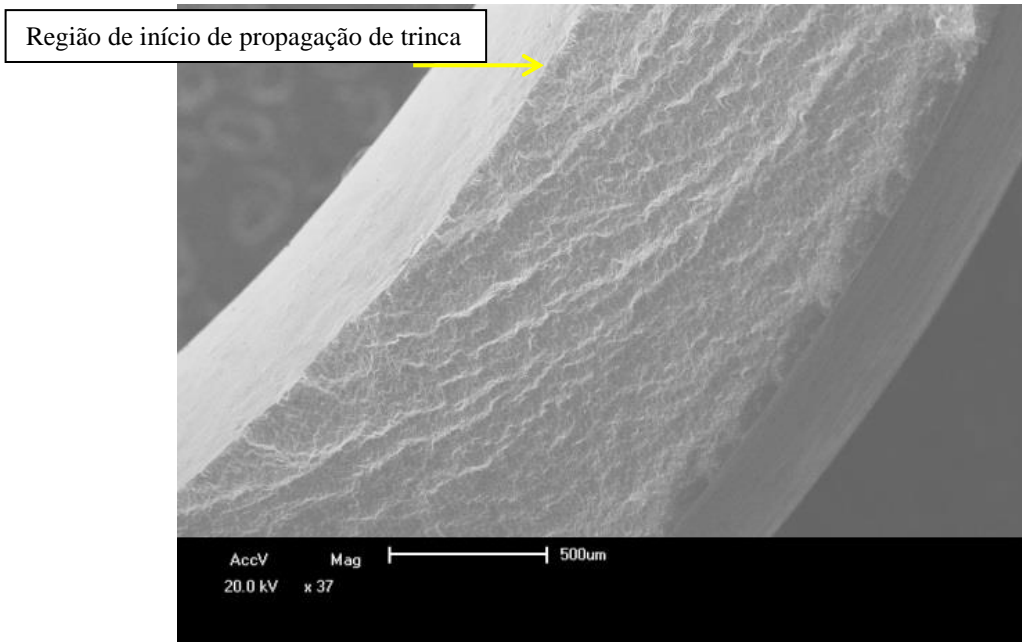
(c) CP\_27



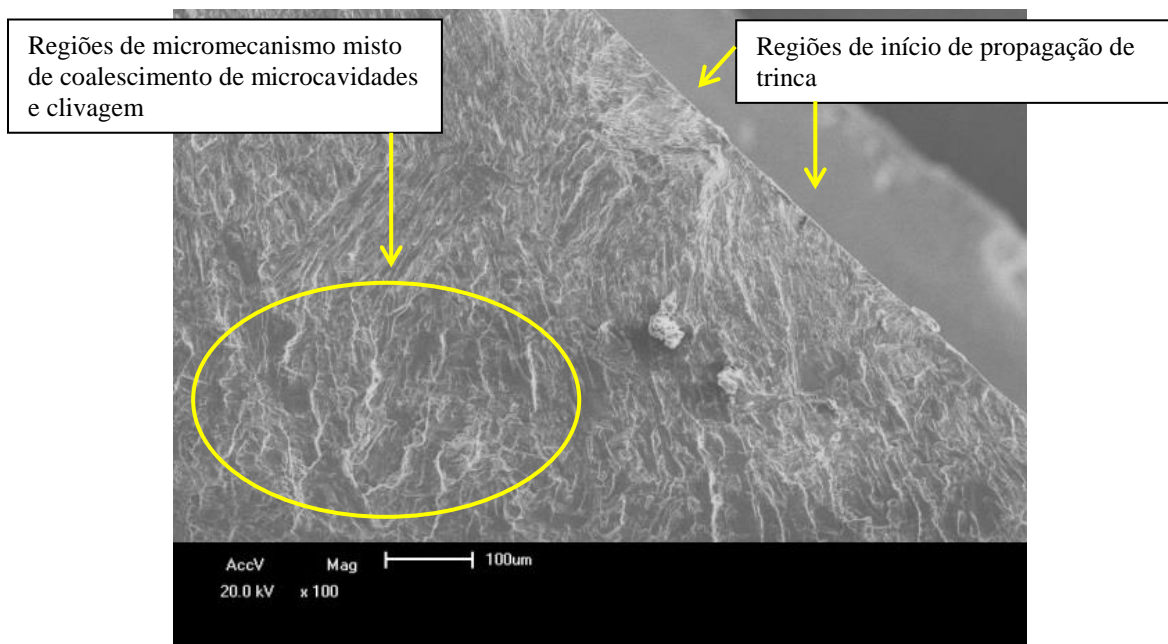
(d) CP\_28

Figura 4-12: Imagens em lupa de baixo aumento das superfícies de fratura. Fonte: Autor

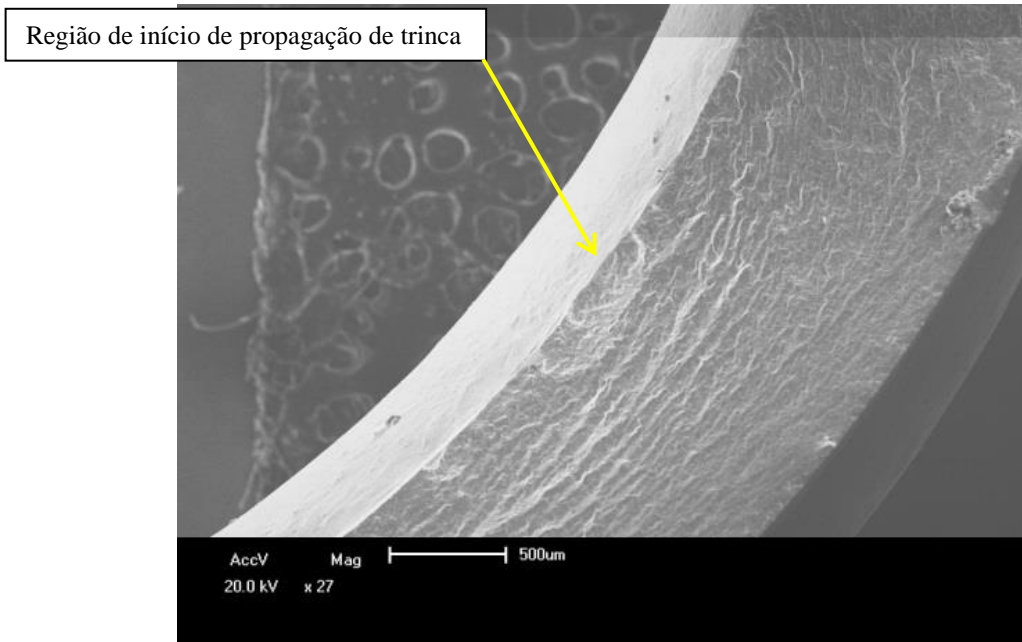
A Figura 4-13 apresenta as superfícies de fratura. Para todas as amostras foi possível identificar a iniciação da trinca ocorrendo na parede interna dos tubos. O coalescimento de microcavidades observado em grande parte das superfícies e presença de clivagem na seção final resistente dos tubos são os micromecanismos esperados para o material.



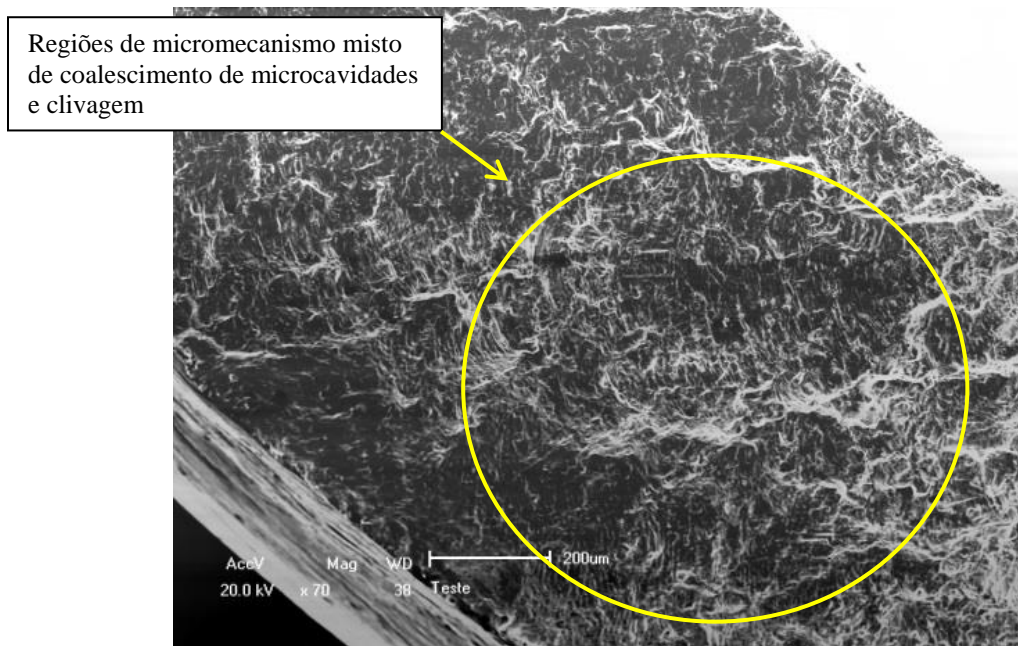
(a) CP\_17



(b) CP\_19



(c) CP\_27



(d) CP\_28

Figura 4-13: Fractografias obtidas em MEV mostrando pontos de iniciação de trinca de fadiga e micromecanismos presentes nas superfícies de fratura. Fonte: Autor

#### 4.6. CONSTRUÇÃO DAS CURVAS SN

Foram construídas seis curvas SN. Duas para as amostras de tubo com espessura de parede de 1,1mm, duas para as amostras com espessura de parede de 1,3mm e duas

combinando-se todas as amostras. A Tabela 4-8 apresenta um resumo dos detalhes de cada curva.

Tabela 4-8: Dados das curvas construídas

Curva construída	Natureza das amostras	% Replicação	Enquadramento conforme ASTM A739
CURVA 1,1 Média	Somente tubos com espessura de parede de 1,1mm	77	Dado de Confiabilidade
CURVA 1,1 Projeto			
CURVA 1,3 Média	Somente tubos com espessura de parede de 1,3mm	77	
CURVA 1,3 Projeto			
CURVA COMBINADA Média	Todos os tubos testados	88	
CURVA COMBINADA Projeto			

As equações 4.4 e 4.5 foram deduzidas para a construção das curvas SN: CURVA 1,1 média e CURVA 1,1 de projeto, respectivamente. As equações 4.6 e 4.7 foram deduzidas para construção das curvas SN: CURVA 1,3 média e CURVA 1,3 de projeto, respectivamente. E as equações 4.8 e 4.9 foram deduzidas para construção das curvas SN: CURVA COMBINADA média e CURVA COMBINADA de projeto, respectivamente.

$$\text{Log } N = 18.416 - 4.9855x(\text{Log}\Delta S) \quad (4.4)$$

$$\text{Log } N = 17.886 - 4.9855x(\text{Log}\Delta S) \quad (4.5)$$

$$\text{Log } N = 22.858 - 6.6373x(\text{Log}\Delta S) \quad (4.6)$$

$$\text{Log } N = 22.594 - 6.6373x(\text{Log}\Delta S) \quad (4.7)$$

$$\text{Log } N = 20.204 - 5.6444x(\text{Log}\Delta S) \quad (4.8)$$

$$\text{Log } N = 19.704 - 5.6444x(\text{Log}\Delta S) \quad (4.9)$$

A recomendação de prática DNV RP-C203 informa que a curva por ela apresentada foi baseada em amostras submetidas a tensões médias de até 450MPa, porém, não explicita as

razões, ou a razão, de carregamento utilizadas. É possível inferir que a curva foi obtida de uma grande quantidade de ensaios que não necessariamente foram baseados nos mesmos parâmetros. Desta forma, para a comparação das curvas assumiu-se desnecessário realizar-se correções de tensão média.

Os gráficos Gráfico 4-1, Gráfico 4-2 e Gráfico 4-3 apresentam as seis curvas construídas.

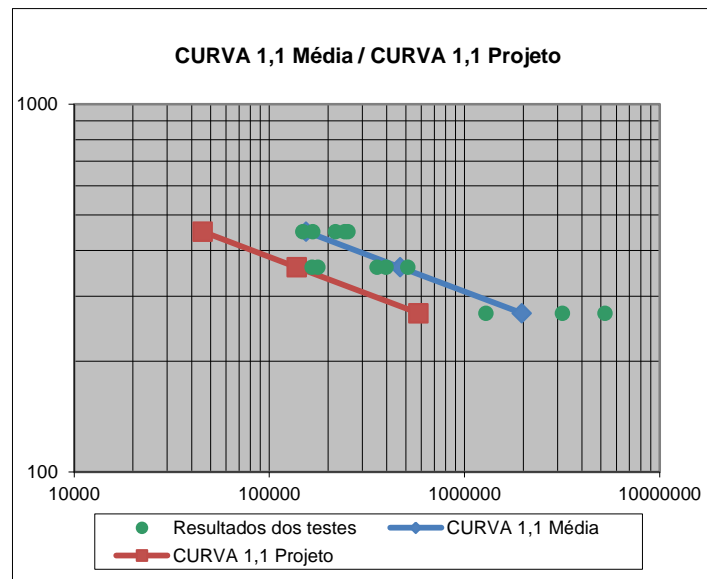


Gráfico 4-1: Curvas SN para tubos com espessura de parede de 1,1mm

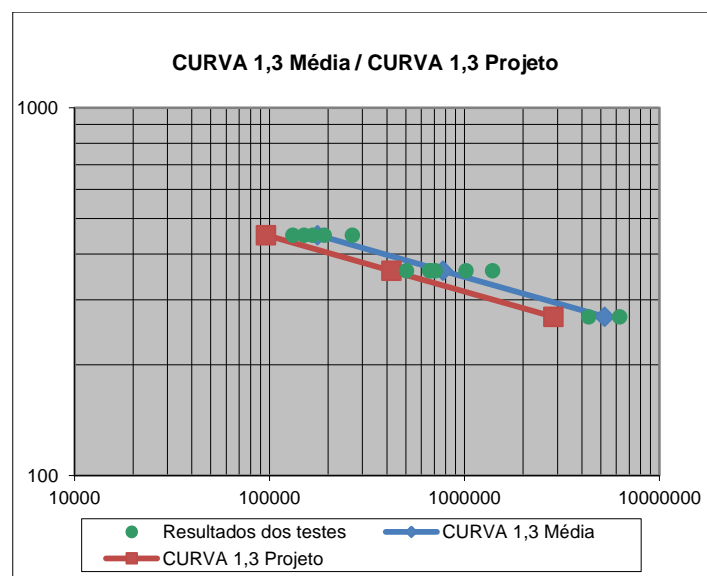


Gráfico 4-2: Curvas SN para tubos com espessura de parede de 1,3mm

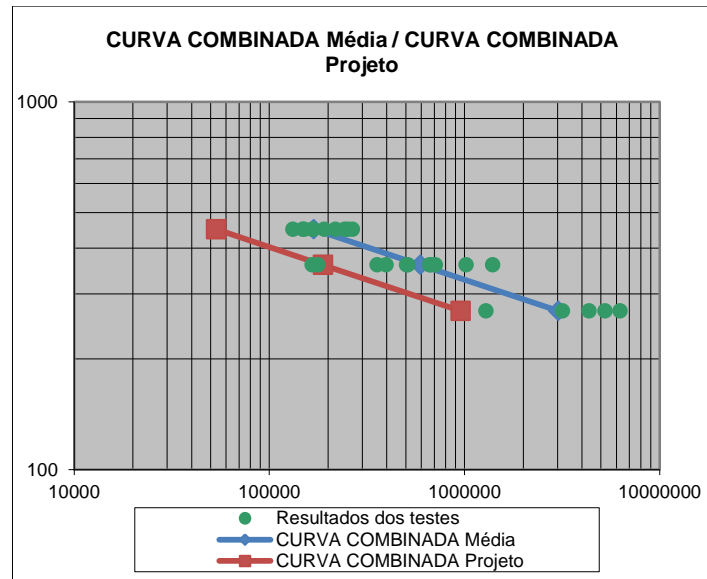


Gráfico 4-3: Curvas SN para as amostras combinadas

O Gráfico 4-4 apresenta todas as curvas construídas e as respectivas curvas da DNV RP-C203 para tubos com espessura de parede de 1,1mm e 1,3mm.

Percebe-se claramente que apesar de as amostras terem sido submetidas a um regime de fadiga de baixo ciclo consideravelmente desenquadrado do envelope considerado pela DNV os resultados de vida à fadiga ainda permaneceram superiores aos das curvas previstas pela recomendação.

Um resultado que chamou a atenção foi a inversão ocorrida em termos de desempenho à fadiga entre as curvas para tubos 1,1mm e 1,3mm construídas e as propostas pela DNV. Na recomendação de prática da DNV existe um fator de correção que penaliza as curvas com o aumento da espessura do tubo. O efeito deste fator pode ser visto comparando-se as curvas DNV 1,1 e DNV 1,3 do Gráfico 4-4 onde a primeira curva apresenta um desempenho à fadiga melhor que a segunda. Analisando-se as curvas construídas tem-se o efeito inverso, as amostras de tubo com espessura 1,1mm apresentaram resultados piores de resistência à fadiga.

Era esperado que os tubos com menor espessura de parede tivessem um desempenho à fadiga melhor que os tubos mais espessos não só pelo efeito dimensional, mas também por não terem solda circunferencial. A hipótese mais provável considerada para explicar estes resultados é de que os tubos com 1,1mm de espessura permaneceram com um maior empenamento residual após os testes de fadiga de baixo ciclo e este empenamento acabou gerando uma componente maior de flexão nos testes de fadiga de tração, asseverando o acúmulo de dano. Apesar da inversão no comportamento dos tubos de 1,1mm, os seus resultados estão bem próximos da curva proposta pela DNV.

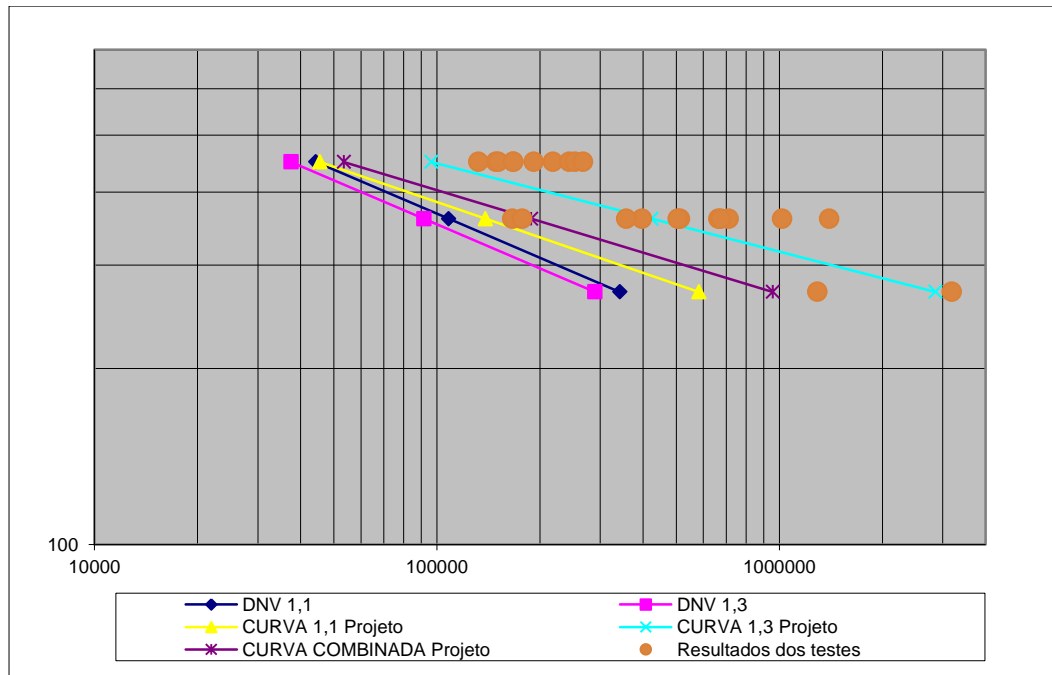


Gráfico 4-4: Curvas SN construídas neste trabalho e curvas SN recomendadas pela DNV RP-C203

O fato das curvas obtidas terem apresentado resultado superior em termos de resistência à fadiga quando comparadas com as curvas propostas pela DNV não significa que o teste de fadiga de baixo ciclo não tenha gerado dano significativo nas amostras. A DNV é uma instituição reconhecida por propor critérios de projeto conservadores. Além do conservadorismo esperado na DNV RP-C203 a curva de fadiga que ela apresenta foi elaborada com base em um extenso conjunto de testes com variados intervalos de diâmetro interno de tubo e espessura de parede. A própria recomendação menciona aplicabilidade da curva para diâmetros externos entre 10mm e 100mm e espessuras de parede de 1mm até 10mm. Portanto, quando entram no universo de dados testes realizados em tubos com diâmetros internos de 25,4mm ou maiores, e espessuras de parede acima de 3mm, é esperado um rebaixamento considerável para a curva geral de fadiga.

Como fechamento das discussões a respeito das curvas de fadiga pode-se concluir que apesar do dano causado pela fadiga de baixo ciclo os tubos ainda apresentaram boa resistência à fadiga de alto ciclo. Olhando-se do ponto de vista do projeto de umbilicais com tubos metálicos os resultados indicam que é adequada a utilização das curvas apresentadas pela DNV RP-C203 para os cenários de instalação estudados neste trabalho.

Evidentemente que outros fatores são imprescindíveis de serem considerados para robustez do projeto. Um deles, relacionado diretamente com o assunto desenvolvido neste trabalho, é o atrito entre os componentes internos do umbilical. A depender da condição de atrito as deformações nos tubos podem ser muito mais elevadas que as aqui consideradas.

## 5. CONCLUSÕES

Com respeito a metodologia experimental empregada as seguintes conclusões puderam ser feitas:

- O método de ensaio de flexão em quatro pontos utilizado para imputar o dano de fadiga de baixo ciclo se mostrou adequado ao objetivo de um trabalho investigativo sobre os limites de dano dentro dos cenários de instalação estudados.

- Com a execução dos ensaios de flexão em quatro pontos, entretanto, foi possível perceber que para se ter um adequado controle das deformações impostas nos tubos é necessário se utilizar frequência de ciclagem bastante baixa, o que evidentemente onera em tempo os testes e a obtenção dos resultados. Conforme mencionado, para um objetivo investigativo inicial este método de teste se mostrou adequado, mas, tendo-se como objetivo uma análise mais extensa, cobrindo-se diferentes diâmetros de tubos com variação nos níveis de deformação, seria mais adequada a busca por outro método que permitisse maior produtividade de resultados.

- Para a correta execução dos ensaios de flexão foi fundamental o trabalho de calibração com a instrumentação dos tubos. Somente desta forma foi possível garantir-se a aplicação adequada das deformações desejadas. Detalhes como folgas no dispositivo, deformação dos roletes e o giro da amostra só puderam ser verificados e corrigidos com a instrumentação dos tubos.

Com respeito aos resultados de fadiga obtidos as seguintes conclusões puderam ser feitas:

- Tanto considerando os resultados isoladamente para os tubos com espessura de parede de 1,1mm e 1,3mm como considerando os resultados combinados o desempenho a fadiga das amostras não apresentou queda quando comparado com os trabalhos disponíveis na literatura, em que as amostras foram testadas para regimes de fadiga de baixo ciclo bastante diferentes.

- Não foi observada diferença significativa entre o desempenho à fadiga das amostras contendo solda e o desempenho das amostras sem solda. Estes resultados mostram que sendo o processo de soldagem realizado com adequado controle não se tem grande prejuízo na resistência à fadiga dos tubos.



- As comparações entre as curvas SN construídas e as curvas atualmente difundidas para projeto, recomendadas pela DNV em sua recomendação de prática DNV RP-C203, mostram que apesar do dano de baixo ciclo imputado o desempenho a fadiga das amostras foi superior ao previsto pela DNV. Com base nestas comparações concluiu-se que é adequada a utilização das curvas apresentadas pela DNV RP-C203 para os cenários de instalação estudados neste trabalho.

## **6. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS**

Como possibilidade de trabalhos futuros os seguintes assuntos são sugeridos:

- Estender o range de diâmetro interno e espessura de tubos a serem testados
- Estender o limite de dano aplicado uma vez que os resultados obtidos não indicaram grande perda de resistência à fadiga para as amostras testadas
- Discutir aspectos de projeto comparando a metodologia de deformação plástica acumulada com metodologia baseada no comportamento cíclico do aço UNS 32750

## REFERÊNCIAS

Almeida, F. B., Umbilicais - Curso Básico. Sem nº de edição. Rio de Janeiro, Edição Petrobras, Dezembro de 2003.

Alvarez-Armas, I.; Marinelli, M.C.; Malarría, J.A.; Degallaix, S.; Armas, A.F. Microstructure associated with crack initiation during low-cycle fatigue in a low nitrogen duplex stainless steel, *International Journal of Fatigue* 29 ,2007, 758–764

Alvarez-Armas, I. Duplex Stainless Steels: Brief History and Some Recent Alloys. *Recent Patents on Mechanical Engineering*, 2008, 1, 51-57

API, American Petroleum Institute, API 17E Second Edition - Specification for Subsea Production Control Umbilicals, 1998.

ASTM, American Society for Testing and Materials. ASTM A370-07: Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products, 2007.

ASTM, American Society for Testing and Materials. ASTM A789/789M-05: Standard Specification for Seamless and Welded Ferritic/Austenitic Stainless Steel Tubing for General Service, 2005.

ASTM, American Society for Testing and Materials. ASTM A790/790M-07: Standard Specification for Seamless and Welded Ferritic/Austenitic Stainless Steel Pipe, 2007.

ASTM, American Society for Testing and Materials. ASTM E739-10: Standard Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life (S-N) and Strain-Life ( $\epsilon$ -N) Fatigue Data1, 2010.

ASTM, American Society for Testing and Materials. ASTM E8/E8M-11: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials, 2011.

Balbi, M.; Avalos, M.; El Bartali, A.; Alvarez-Armas, I. Microcrack growth and fatigue behavior of a duplex stainless steel, *Int J Fatigue* (2009), doi:10.1016/j.ijfatigue.2008.12.007

Balena, R.; Santos, M. C.; Paula, F.; Smith, M. Accumulated plastic strain evaluation of steel tube for umbilical cables. 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. Junho 2008.

Bartali AE et al., Surface observation and measurement techniques to study the fatigue damage micromechanisms in a duplex stainless steel, *Int J Fatigue* (2009), doi:10.1016/j.ijfatigue.2008.11.003

British Standard BS 7608: 1993, "Fatigue design and assessment of steel structures," Code of Practice.

Buitrago, J.; Doynov, K.; Fox, A. Effect of reeling on welded umbilical tubing fatigue. 25th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. Junho 2006

Callister, W. D. JR. *Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução*. 2000, 5ª edição,

Chai, G. Fatigue behaviour of duplex stainless steels in the very high cycle regime, *International Journal of Fatigue* 28, 2006, 1611–1617

Chai, G.; Kivisäkk, U.; Novak, P.; Finzetto, L.; Tokaruk, J.; A Hyper Duplex Stainless Steel Developed For Oil And Gas Industry, IBP2850\_08, Rio Oil and Gas Expo and Conference, 2008

Chai, G.; Sundqvist, M.; Fatigue Strengths and Behaviours of Duplex Stainless Steels, *Mechanical Metallurgy, SLTM/H, AB Sandvik Steel*, 811 81 Sandviken, Sweden

Chiu, P.K.; Weng, K.L.; Wang, S.H.; Yang, J.R.; Huang, Y.S.; Fang, J. Low-cycle fatigue-induced martensitic transformation in SAF 2205 duplex stainless steel, *Materials Science and Engineering A* 398, 2005, 349–359

Dakhlaoui, R.; Baczman´ ski, A.; Braham, C.; Wron´ ski, S.; Wierzbowski, K.; Oliver, E.C. Effect of residual stresses on individual phase mechanical properties of austeno-ferritic duplex stainless steel, *Acta Materialia* 54, 2006, 5027–5039

DNV, Det Norske Veritas, Recommended Practice DNV-RP-C203, Fatigue Strength Analysis of Offshore Steel Structures, 2012.

DNV, Det Norske Veritas, Offshore Standard DNV-OS-F101, Submarine Pipeline Systems, 2012.

Dobson, A. Effect of strain history on steel tube umbilical. 26th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. Junho 2007

Dobson, A.; Fogg, D.; fatigue testing and analysis of a deep water steel tube umbilical. 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. Junho 2008

Ekeberg, K.I.; Ottesen T.; Aarstein, J.; Saevik S.; Ye N.; Igland R.; Predicting, Measuring and Implementing Friction and Bending Stresses in Dynamic Umbilical Design, Offshore Technology Conference, 2006

Girones, A.; Llanes, L.; M; Anglada,; Mateo, A. Influence of artificial seawater on the cyclic response of super duplex stainless steels, *International Journal of Fatigue* 27, 2005, 197–202

ISO, International Organization for Standardization, ISO 13628-5 Second Edition: Petroleum and natural gas industries — Design and operation of subsea production systems — Part 5: Subsea umbilicals, 2009.

Jencus, P.; Polakb, J.; Lukas, P.; Muransky, O. In situ neutron diffraction study of the low cycle fatigue of the  $\alpha$ - $\gamma$  duplex stainless steel, *Physica B* 385–386 , 2006, 597–599

Kivisakk U, SAF 2507 in seawater, 10 years of experience, Proc. Stainless Steel World, The Hague, Netherlands, (1999), 519-528

Kristoffersen, S.; Haagensen, P. J. Fatigue design criteria for small super duplex steel pipes. 23rd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. Junho 2004

Lillbacka, R.; Chai, G.; Ekh, M.; Liu, P.; Johnson, E.; Runesson, K. Cyclic stress–strain behavior and load sharing in duplex stainless steels: Aspects of modeling and experiments, Acta Materialia 55, 2007, 5359–5368

LIN PENG, R., CHAI, G.; JIA, N.; WANG, Y. D.; JOHANSSON, S. Micromechanical interactions in a super duplex stainless steel subjected to low cycle fatigue loading, Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, doi:10.1111/j.1460-2695.2008.01277.x

Magnin, T.; Lardon, J. M. Cyclic Deformation Mechanisms of a Two-phase Stainless Steel in Various Environmental Conditions. Materials Science and Engineering, A 104, 1988, 21-28

Mateo, A.; Girones , A.; Keichel, J.; Llanes, L.; Akdut, N.; Anglada, M. Cyclic deformation behaviour of super duplex stainless steels, Materials Science and Engineering A314, 2001, 176–185

Mateo, L.; Lanes, L.; Iturgoyen, L.; Anglada, M.; Cyclic Stress-Strain Response and Dislocation Substructure Evolution of a Ferrite-Austenite Stainless Steel, Acta Mater. 44 , 1996, 1143

Shigley, J.E. Elementos de Máquinas, vol. 1 e 2. Rio de Janeiro: LTC Editora. 1984.

Wallén, B. Corrosion of Duplex Stainless Steels in Seawater, Avesta Sheffield AB, Research & Development, SE-774 80 Avesta, Sweden, 1998