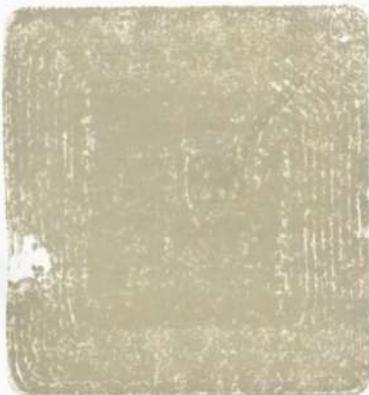


**FACULDADE REDENTOR**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

CAROLINE DE SOUZA LIMA CASTILHO  
RAFAELA PINTO FERREIRA

**QUALIFICAÇÃO DO PROCESSO DE SOLDAGEM DA LANÇA DE UM  
GUINDASTE OFFSHORE**



Itaperuna  
2011

Sociedade Universitária Redentor

**BIBLIOTECA**

Reg. 8493101

Data: 04/03/2011

Nº de Chamada: \_\_\_\_\_



CAROLINE DE SOUZA LIMA CASTILHO  
RAFAELA PINTO FERREIRA

**QUALIFICAÇÃO DO PROCESSO DE SOLDAGEM DA LANÇA DE UM  
GUINDASTE OFFSHORE**

Projeto apresentado a Faculdade  
Redentor como parte dos requisitos para  
a obtenção do título de bacharel em  
Engenharia Mecânica

**Orientador:** Valtency Ferreira Guimarães

Itaperuna  
2011

Autor: CAROLINE DE SOUZA LIMA CASTILHO E RAFAELA PINTO FERREIRA

Título: **QUALIFICAÇÃO DO PROCESSO DE SOLDAGEM DA LANÇA DE UM  
GUINDASTE OFFSHORE**

Natureza: Projeto

Objetivo: Título de Bacharel em Engenharia Mecânica

Instituição: Faculdade Redentor

Área de Concentração: Engenharia Mecânica com ênfase em Projetos Mecânicos

Aprovado em: 31/01/2011

Banca Examinadora

---

Orientador: Valtency Ferreira Guimarães  
Mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais  
Instituição: UENF

---

Profª Dsc Amanda Carmerini Lima  
Doutora em Engenharia e Ciência dos Materiais  
Instituição: UENF

---

Prof. Sérgio de Souza Dias  
Engenheiro Mecânico  
Instituição: UFF

## DEDICATÓRIA

Dedico este TCC especialmente à minha mãe Deise, minha irmã Rafaela, minha avó Célia, meu namorado Cláudio e minha família.

**Caroline de Souza Lima Castilho**

## DEDICATÓRIA

Dedico às pessoas que começaram a fazer parte da minha vida durante estes anos de faculdade, que são meu marido Igor e minha filha Bárbara. Estes trouxeram luz e alegria para minha vida.

**Rafaela Pinto Ferreira**

## AGRADECIMENTO

Seria impossível listar o nome de todas as pessoas que de uma forma ou outra contribuíram para a realização deste trabalho, entretanto, algumas se destacaram e não posso deixar de registrar e agradecer.

Agradeço a Deus por concluir essa grande jornada, e pela força que me deu para continuar em cada obstáculo que surgia.

A minha Mãe, Deise Cristina e minha avó Célia, pelo sacrifício e por me dar o incentivo que eu tanto precisava para iniciar essa jornada.

A minha irmã Rafaela por me aturar nos momentos difíceis e pelo incentivo.

A meu namorado Cláudio pela paciência, carinho, atenção, dedicação, por me aturar nas horas de lamentações entre outras coisas, o meu muito obrigada.

Aos meus irmãos de coração Fernando, Vagner e Francyne pelo carinho, e a minha tia Maria pela força.

Ao Coordenador Glênio e ao Técnico Mecânico Jarilson pela receptividade, pelo apoio técnico e administrativo nos momentos cruciais;

Ao orientador Valtency pela ajuda no desenvolvimento deste trabalho;

Ao professor Sérgio Dias pelas sugestões;

Ao Adevaldo pela cooperação;

A Rosângela bibliotecária que sempre me aturou na biblioteca com paciência, boa vontade e alegria;

Aos colegas e amigos que surgiram nessa trajetória, em especial Bruno, Rafaela, Carolina.

Ao Alessandro Rolin por disponibilizar seu TCC.

Agradeço também a Faculdade Redentor pelo importante incentivo no fim do curso;

Enfim, aos meus familiares, pelo sacrifício, por terem me incentivado na vida acadêmica, enaltecendo-me e reabastecendo-me de amor nos momentos difíceis, dando-me todo o apoio e suporte necessário.

**Caroline de Souza Lima Castilho**

## AGRADECIMENTO

Agradeço primeiramente a Deus, à minha família que sempre esteve ao meu lado em todos os momentos em que precisei de apoio, compreensão e incentivo.

Sou profundamente grata aos colaboradores desse trabalho, por terem nos momentos mais difíceis, nos guiado para o caminho certo. São eles: Jarilson, Glênio, Adevaldo e Valtency.

Por fim, não posso deixar de mencionar os grandes amigos que conheci na faculdade e que contribuíram muito por eu ter chegado até aqui, são eles: Marianna, Bruno, Carol e Carolina.

**Rafaela Pinto Ferreira**

## EPÍGRAFE

“Não se pode ensinar alguma coisa a alguém, pode-se apenas auxiliar a descobrir por si mesmo”

Galileu Galilei

## RESUMO

Este trabalho aborda um processo de soldagem selecionado para soldar a lança do guindaste offshore do tipo E, dimensionado por Alessandro Rolin em seu trabalho de conclusão de curso, no ano de 2009. A seleção do processo de soldagem foi realizada em um ambiente produtivo com base nas necessidades e exigências do mercado na atualidade, com utilização de amostragem de custos relativos ao processo de soldagem, seguindo exigências técnicas de qualidade, através da realização de ensaios não-destrutivos e destrutivos que comprovam a qualificação do processo escolhido. São apresentadas também as características composicionais e mecânicas do aço ASTM A 500 grau B empregado na construção da estrutura escolhida.

**Palavras-chave:** Soldagem, Qualificação, Custos de Soldagem, Ensaios

## ABSTRACT

This work approaches a selected welding process to weld the boom offshore type E, designed by Alessandro Rolin in his conclusion course's work, in 2009. The selection of the welding process was conducted in a productive environment based on the needs and demands of the market today, with the use of sampling costs for the welding process, following technical requirements for quality, by performing non-destructive testing and destructive to prove the qualifications of the chosen process. It also presents the compositional and mechanical characteristics of steel used in construction of the structure.

**Keywords:** Welding, Qualification, Welding Costs, Testing

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	XIII
LISTA DE TABELAS.....	XV
LISTA DE QUADROS.....	XVI
LISTA DE SÍMBOLOS.....	XVII
LISTA DE ABREVIATURAS.....	XVII
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>19</b>
1.1 OBJETIVO GERAL .....	19
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	19
1.3 JUSTIFICATIVA.....	20
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>21</b>
2.1 O GUINDASTE OFFSHORE.....	21
2.1.1 Definição de Guindaste Offshore.....	22
2.1.2 Tipos de Guindaste Offshore.....	22
2.1.3 Componentes do Guindaste.....	22
2.2 O GUINDASTE OFFSHORE ESTUDADO.....	24
2.3 SOLDAGEM.....	26
2.3.1 Introdução à Soldagem.....	26
2.3.2 Definição de Soldagem.....	26
2.3.3 Terminologia da Soldagem.....	26
2.3.4 A Junta e o Chanfro na Soldagem.....	27
2.3.4.1 Elementos de um Chanfro.....	28
2.3.5 Face e Raiz da Solda.....	28
2.3.6 Simbologia da Soldagem.....	28
2.3.7 Comparação da Soldagem com outros Métodos de união de Metals.....	30
2.3.8 Limitações da Soldagem.....	30
2.3.9 Processos de Soldagem.....	30
2.3.9.1 Eletrodo Revestido.....	31
2.3.9.1.1 Vantagens do Processo.....	32
2.3.9.1.2 Desvantagens do Processo.....	32
2.3.10 Soldabilidade dos Aços Estruturais.....	32
2.4 COMPONENTE DO GUINDASTE OFFSHORE ANALISADO.....	33
2.4.1 A lança.....	33

2.4.1.1	Características do Material da Lança.....	33
2.4.1.2	Aços de Baixa Liga.....	34
2.4.1.3	Efeitos dos Elementos de Liga.....	34
2.5	ENSAIOS PARA QUALIFICAÇÃO EM CORPOS DE PROVA SOLDADOS.....	35
2.5.1	Ensaio de Líquido Penetrante.....	35
2.5.2	Ensaio de Tração.....	36
2.5.3	Ensaio de Dobramento.....	39
2.5.3.1	Ensaio de Dobramento em Peças Soldadas.....	39
2.6	ESTIMATIVA DOS CUSTOS DA SOLDAGEM.....	41
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	42
3.1	MATERIAL UTILIZADO NOS ENSAIOS.....	42
3.2	O ELETRODO UTILIZADO NO PROCESSO DE SOLDAGEM.....	42
3.3	CORPO DE PROVA.....	44
3.3.1	Corpos de Prova para Ensaios Mecânicos.....	47
3.4	ENSAIO DE LÍQUIDO PENETRANTE.....	48
3.5	QUANTIDADE DE ENSAIOS E CORPOS DE PROVA PARA TESTES.....	49
3.6	ENSAIO DE TRAÇÃO.....	50
3.7	ENSAIO DE DOBRAMENTO.....	51
3.8	CÁLCULO DE CUSTOS EM SOLDAGEM.....	51
3.8.1	Cálculo da Massa do Metal Depositado ( $m_s$ ).....	51
3.8.2	Cálculo do Custo do Eletrodo Utilizado.....	52
4	RESULTADOS.....	54
4.1	ANÁLISE ESTRUTURAL POR LÍQUIDO PENETRANTE.....	54
4.2	ENSAIOS DE TRAÇÃO.....	54
4.3	ENSAIOS DE DOBRAMENTO.....	57
4.4	CUSTOS.....	58
5	CONCLUSÃO.....	59
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	61

## LISTA DE FIGURAS

**Figura 1:** Tipos de guindaste relacionados pela norma API 2C

**Figura 2:** Pedestal/Flange

**Figura 3:** Flange

**Figura 4:** Chassi

**Figura 5:** Cavalete

**Figura 6:** Cadernal

**Figura 7:** Pé da lança, lança e cabeça da lança

**Figura 8:** Composição básica de uma peça soldada

**Figura 9:** Tipos de junta

**Figura 10:** Tipos de chanfro

**Figura 11:** Características dimensionais de chanfros usados em soldagem

**Figura 12:** Dimensões e regiões de soldas de topo

**Figura 13:** Localização dos elementos de um símbolo de soldagem

**Figura 14:** Exemplo de um símbolo para uma solda em chanfro de  $\frac{1}{2}$  V com dimensões

**Figura 15:** Esquema de Soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido

**Figura 16:** Lança do guindaste offshore

**Figura 17:** Gráfico tensão x deformação de um metal ou liga metálica

**Figura 18:** Corpo de prova soldado e linhas de medição

**Figura 19:** Posições para o ensaio de dobramento em peças soldadas

**Figura 20:** Classificação de eletrodos revestidos para aços de baixa liga

**Figura 21:** Eletrodo E 7018 OK 48.04

**Figura 22:** Chanfro na chapa

**Figura 23:** Simbologia da Soldagem

**Figura 24:** Confecção do chanfro de  $60^\circ$  e do nariz de 3 mm

**Figura 25:** Preparação da folga

**Figura 26:** Gabarito preparado para soldagem com as medidas pré-estabelecidas

**Figura 27:** Processo de soldagem por eletrodo revestido

**Figura 28:** Chapa soldada

**Figura 29:** Corpo de prova para ensaio de tração

**Figura 30:** Corpo de prova para ensaio de tração

**Figura 31:** Corpo de prova para ensaio de dobramento

**Figura 32:** Corpo de prova para ensaio de dobramento

**Figura 33:** Aplicação do penetrante vermelho

**Figura 34:** Aplicação do revelador

**Figura 35:** Ensaio de tração

**Figura 36:** Ensaio de dobramento

**Figura 37:** Referência para cálculo de massa do metal depositado

**Figura 38:** Corpo de prova 1 após ensaio

**Figura 39:** Corpo de Prova 1

**Figura 40:** Corpo de Prova 2

**Figura 41:** Aspecto do corpo de prova

## LISTA DE TABELAS

- Tabela 1:** Características do ASTM A500 grau B
- Tabela 2:** Composição química do aço ASTM A 572 grau 50
- Tabela 3:** características mecânicas do aço ASTM A 572 grau 50
- Tabela 4:** Medidas do corpo de prova (AWS D1.1/D1.1M, 2004)
- Tabela 5:** Dimensões para corpos de prova para ensaio de tração
- Tabela 6:** Dimensão para corpos de prova para ensaio de dobramento
- Tabela 7:** Número de corpos de prova para cada ensaio
- Tabela 8:** Resultados obtidos do corpo de prova 1
- Tabela 9:** Resultados obtidos do corpo de prova 2
- Tabela 10:** Comparação de resultados
- Tabela 11:** Largura dos corpos de prova para ensaio de dobramento
- Tabela 12:** Valores de referência para cálculo de  $C_e$ , com resultado real e teórico

## LISTA DE QUADROS

**Quadro 1:** Componentes de um guindaste

**Quadro 2:** Propriedades mecânicas

**Quadro 3:** Parâmetros de soldagem

**Quadro 4:** Valores típicos de  $\phi$  para diferentes processos

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\sigma_e$	Tensão de escoamento
$Q_e$	Carga de escoamento
$S_0$	Seção inicial transversal
$S$	Seção final transversal
$\sigma_r$	Tensão de resistência
$Q_r$	Carga máxima atingida durante ensaio
$A$	Alongamento
$L$	Distância final após a ruptura do corpo de prova
$L_0$	Distância inicial marcada no corpo de prova antes do ensaio
$\Phi$	Estricção
$m_s$	Massa de metal depositado
$A_s$	Área transversal do cordão
$t$	Espessura do material soldado
$e$	Altura do nariz do chanfro
$w$	Largura do cordão de solda
$r$	Altura do reforço da solda
$C_e$	Custo do eletrodo
$C_{eu}$	Preço do eletrodo
$\phi$	Eficiência do processo

**LISTA DE ABREVIATURAS**

API SPEC 2C	Especificação para Guindastes Offshore
AWS	American Welding Society
ASTM	Sociedade Americana Para Ensaios De Material

# 1 INTRODUÇÃO

As máquinas de levantamento se destinam à movimentação horizontal e vertical na indústria e nos canteiros de obra, de equipamentos e materiais. Numa plataforma offshore, de exploração e/ou produção de petróleo, o guindaste é o principal mecanismo de movimentação de cargas. O mesmo é responsável por todas as cargas que excedem a capacidade humana numa plataforma que vai desde uma simples organização do convés, movimentações com a sonda, passando por retirar cargas de um rebocador até o transporte de passageiros em operações de "transbordo" de pessoal de uma unidade para outra (ROLIN, 2009).

Guindastes são grandes estruturas que necessitam de soldagem de seus componentes, sendo este o assunto abordado neste estudo.

A soldagem é o mais importante processo de união de metais utilizado industrialmente, ela é utilizada na fabricação de estruturas simples, como grades e portões assim como em componentes encontrados em aplicações com elevado grau de responsabilidade, como nas indústrias química, petrolífera e nuclear, e também na criação de peças de artesanato, jóias e de outros objetos de arte (MARQUES et al, 2009).

## 1.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo principal qualificar o processo de soldagem de um componente do guindaste offshore, sendo esta a lança, projetada no Trabalho de Conclusão de Curso em 2009.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

O presente trabalho tem como objetivos específicos realizar os seguintes ensaios:

- Ensaio de líquido penetrante;
- Ensaio de tração;
- Ensaio de dobramento da face e da raiz solda.

### 1.3 JUSTIFICATIVA

A principal justificativa para este projeto é a qualificação da solda para a lança de um guindaste offshore e análise do processo de soldagem escolhido. Esta análise visa verificar que o processo escolhido, além de oferecer baixo custo, atende perfeitamente às necessidades requeridas pelo guindaste e não intervém nas propriedades químicas e mecânicas do mesmo.

Guindastes offshore são amplamente utilizados no setor petrolífero e com a descoberta do pré-sal se intensifica a procura por tecnologias mais avançadas que atendam as novas necessidades. O setor petrolífero no Brasil tem destaque internacional, sendo este uma das principais fontes de desenvolvimento do país.

A soldagem está presente em todos os setores da indústria, visando atender perfeitamente as necessidades do projeto, com qualidade e baixo custo, sendo os últimos citados, os principais parâmetros para movimentação da economia mundial.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 O GUINDASTE OFFSHORE

O guindaste é provavelmente uma invenção grega ou romana, da qual não existem registros anteriores ao século I a.C.. Acredita-se que os grandes monumentos de pedra construídos anteriormente a esta época – como as Pirâmides do Egito, por exemplo - foram construídos sem auxílio de nenhum destes mecanismos de suspensão. Muito do que se conhece sobre a história do uso dos guindastes advém dos escritos de dois arquitetos, o romano Vitruvius do século I a.C. e de Héron de Alexandria do século I d.C. Destes, o mais simples dos guindastes descritos era composto de apenas de uma única estaca enterrada ao chão, que era erguida e assim sustentada por um simples par de cabos devidamente amarrados em sua extremidade superior. Para compor o mecanismo de suspensão, no topo do seu corpo prendia-se a roldana por onde corria a corda utilizada para içar os materiais. O funcionamento do sistema tinha por base esta corda que era operada com o auxílio de um molinete afixado em um dos lados da estaca, junto à base por onde fazia-se o rolo encurtando a extensão da corda e desta forma, erguendo o objeto a ser levantado. Com sistemas demasiadamente simples, estes guindastes romanos apresentavam sérias limitações. Embora a carga pudesse ser elevada verticalmente, objetivo principal do mecanismo, o ângulo de movimentação lateral em que ela poderia girar, para qualquer que fosse os lados sem desestabilizar o mecanismo, era muito restrito. Além disso, o sistema somente levantava as cargas no máximo até a altura próxima ao limite superior das estacas do próprio mecanismo, limitando também seu poder de alcance. Outro dos problemas deste sistema arcaico era a imobilidade do equipamento, que como descrito, era fixado ao solo e assim precisava ser desmontado a cada etapa da construção, mas de forma aguerrida os construtores medievais geralmente conseguiram superar a maioria das limitações e problemas do equipamento. A força humana utilizada para fazer funcionar o molinete permaneceu insubstituível até o advento das máquinas a vapor (MUNDO FÍSICO, on-line).

### 2.1.1 DEFINIÇÃO DE GUINDASTE OFFSHORE

Segundo a norma API SPEC 2C (2004), guindastes offshore são definidos como pedestais de elevação montados e dispositivos de elevação rotativos para a transferência de materiais, de pessoas ou de navios e estruturas. Guindastes offshore são normalmente montados em um fundo suportado fixo ou estrutura de plataforma flutuante usados em operações de perfuração e produção de petróleo.

### 2.1.2 TIPOS DE GUINDASTE OFFSHORE

A norma API SPEC 2C apresenta 5 tipos de guindastes offshore, que são apresentados na figura 1.

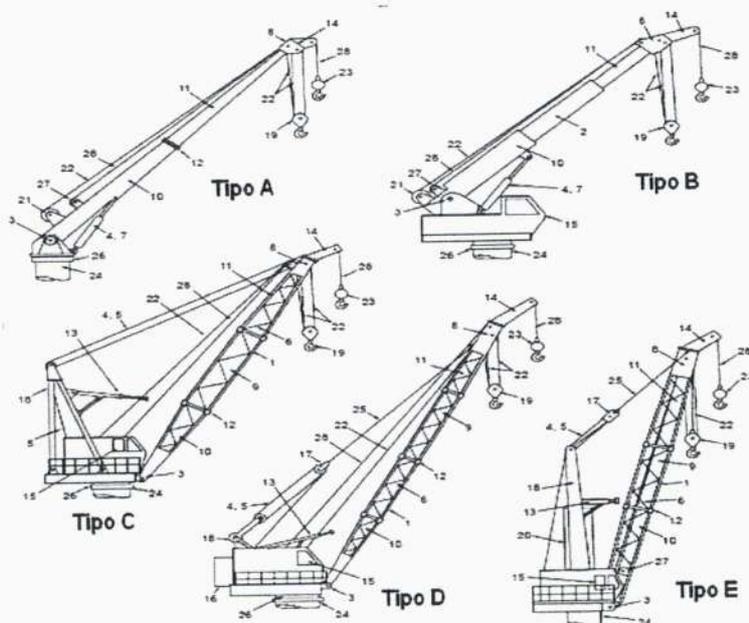


Figura 1: Tipos de guindaste relacionados pela norma API SPEC 2C (API SPEC 2C, 2004)

### 2.1.3 COMPONENTES DO GUINDASTE

Os tipos de guindastes relacionados pela norma API SPEC 2C são caracterizados por certos componentes que configuram o tipo e compõem o guindaste utilizado como referência. O quadro 1 apresenta as definições dos componentes de cada tipo de guindaste.

**Quadro 1:** Componentes de um guindaste (Fonte: API SPEC 2C, 2004)

Número	Componentes	Tipo				
		A	B	C	D	E
1	Corda da Lança	-	-	x	x	x
2	Extensão da lança	-	x	-	-	-
3	Pino do pé de lança	x	x	x	x	X
4	Mecanismo de içamento de lança	x	x	x	x	X
5	Cabo de içamento da lança	-	-	x	x	X
6	Treliça da lança	-	-	x	x	X
7	Cilindro de içamento da lança	x	x	-	-	-
8	Roldana da ponta da lança	x	x	x	x	X
9	Seção intermediária da lança	-	-	x	x	X
10	Seção base da lança	x	x	x	x	X
11	Seção ponta da lança	x	x	x	x	X
12	Olhal da lança	x	-	x	x	X
13	Batente da lança	-	-	x	x	X
14	Extensão da ponta da lança	x	x	x	x	X
15	Cabine	-	x	x	x	X
16	Contra-peso	-	-	-	x	-
17	Cadernal ou sela flutuante	-	-	-	x	X
18	Cavalete	-	-	x	x	X
19	Moitão	x	x	x	x	X
20	Poste Rei ou King Post	-	-	-	-	X
21	Tambor de içamento Principal	x	x	-	-	-
22	Cabo Principal de içamento	x	x	x	x	X
23	Bola peso	x	x	x	x	X
24	Pedestal	x	x	x	x	X
25	Pendente	-	-	-	x	X
26	Círculo de giro	x	x	x	x	-
27	Tambor de içamento Auxiliar	x	x	-	x	X
28	Cabo de içamento Auxiliar	x	x	x	x	x

## 2.2 O GUINDASTE OFFSHORE ESTUDADO

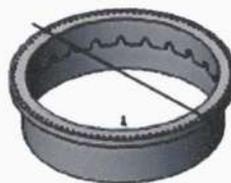
O guindaste estudado neste projeto é o guindaste tipo E, dimensionado anteriormente por Alessandro Rolin em seu Trabalho de Conclusão de Curso. Abaixo seguem relacionadas as partes que compõem o guindaste e suas funções específicas de forma simplificada.

O pedestal suporta todos os componentes do guindaste, como chassi, cavalete, lança, etc.



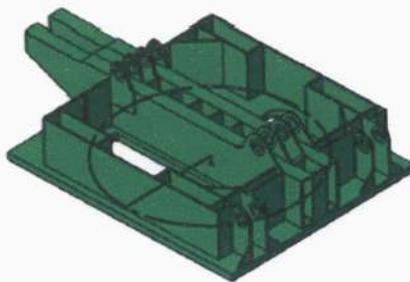
**Figura 2:** Pedestal/Flange (Fonte: ROLIN, 2009)

O flange une o pedestal e o chassi.



**Figura 3:** Flange (Fonte: ROLIN, 2009)

O chassi sustenta e acopla elementos que são o cavalete e o pé da lança.



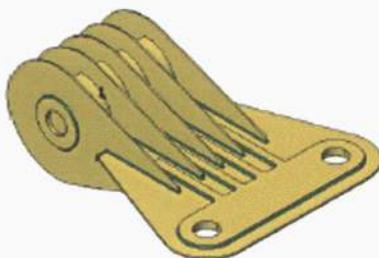
**Figura 4:** Chassi (Fonte: ROLIN, 2009)

O Cavalete tem a função de suportar o esforço cortante atuante no sistema.



**Figura 5:** Cavalete (Fonte: ROLIN, 2009)

O cadernal nada mais é do que uma combinação de roldanas.



**Figura 6:** Cadernal (Fonte: ROLIN, 2009)

O pé da lança, a lança e a cabeça da lança são componentes acoplados, unidos por meio de solda; sendo a lança nosso objeto de estudo.



**Figura 7:** Pé da lança, lança e cabeça da lança (Fonte: ROLIN, 2009)

## 2.3 SOLDAGEM

### 2.3.1 INTRODUÇÃO À SOLDAGEM

A história da soldagem mostra que desde as mais remotas épocas, muitos artefatos já eram confeccionados utilizando recursos de brasagem, tendo sido descobertos alguns com mais de 4000 anos; a soldagem por forjamento também tem sido utilizada há mais de 3000 anos.

A técnica da moderna soldagem começou a ser moldada a partir da descoberta do arco elétrico, bem como também a sintetização do gás Acetileno no século passado, o que permitiu que se iniciassem alguns processos de fabricação de peças, utilizando estes novos recursos.

Com o advento da Primeira Guerra Mundial, a técnica da soldagem começou a ser mais utilizada nos processos de fabricação; a Segunda Guerra Mundial imprimiu grande impulso na tecnologia de soldagem, desenvolvendo novos processos e aperfeiçoando os já existentes (BLOG DA MECÂNICA, on-line).

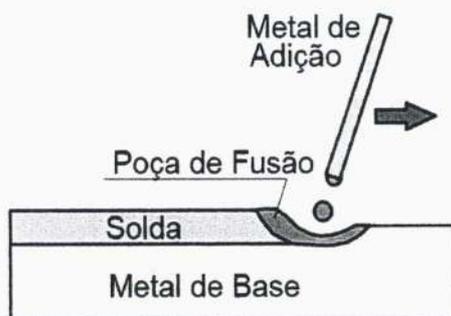
Na atualidade a soldagem tem grande importância e aplicação em todos os setores da indústria.

### 2.3.2 DEFINIÇÃO DE SOLDAGEM

Soldagem é um processo mecânico ou metalúrgico que tem por objetivo unir duas ou mais peças, ou ainda depositar uma camada de revestimento metálico na superfície de uma peça, mediante a aplicação de calor assistido ou não de pressão, onde as superfícies unidas podem fundir ou simplesmente escoar (CUNHA, 2005). Além de unir peças a soldagem também tem por objetivo manter as propriedades químicas e mecânicas da peça.

### 2.3.3 TERMINOLOGIA DA SOLDAGEM

O material da peça, ou peças, que está sendo soldada é o **metal base**. Frequentemente, na soldagem por fusão, um material adicional é fornecido para a formação da solda, este é o **metal de adição**. Durante a soldagem, o metal de adição é fundido pela fonte de calor e misturado com uma quantidade de metal de base também fundido para formar a **poça de fusão**. A figura 8 ilustra estes conceitos (MARQUES *et al*, 2009).

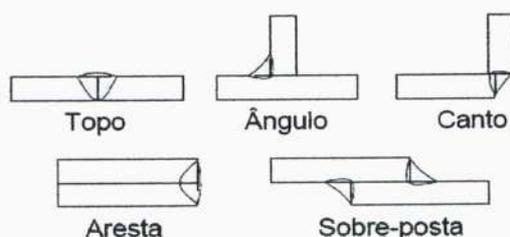


**Figura 8:** Composição básica de uma peça soldada (MARQUES *et al*, 2009)

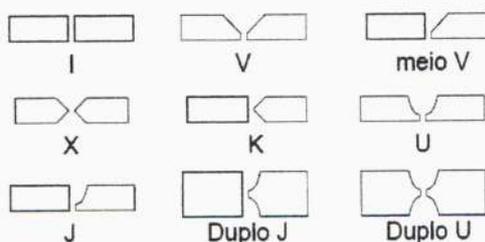
### 2.3.4 A JUNTA E O CHANFRO NA SOLDAGEM

Chama-se junta a região onde as peças serão unidas por soldagem.

O posicionamento das peças para união determina os vários tipos de junta. Entretanto, muitas vezes, as dimensões das peças, a facilidade de se movê-las e as necessidades do projeto exigem uma preparação das peças para soldagem, na forma de cortes ou de uma conformação especial da junta. Estas aberturas ou sulcos na superfície da peça ou peças a serem unidas e que determinam o espaço para conter a solda recebem o nome de chanfro (MARQUES *et al*, 2009). As figuras 9 e 10 ilustram respectivamente os tipos de junta e chanfro mais utilizados.



**Figura 9:** Tipos de junta (Fonte: MARQUES, 2009)



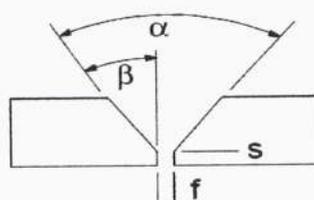
**Figura 10:** Tipos de chanfro (Fonte: MARQUES *et al*, 2009)

### 2.3.4.1 Elementos de Um Chanfro

Segundo Marques *et al* (2009), um chanfro é definido por seus elementos ou características dimensionais. Os principais elementos de um chanfro são:

- *Face da raiz ou nariz (s)*: Parte não chanfrada de um componente da junta;
- *Abertura da raiz, folga ou fresta (f)*: Menor distância entre as peças a soldar;
- *Ângulo de abertura da junta ou ângulo de bisel ( $\beta$ )*: Ângulo da parte chanfrada de um dos elementos da junta;
- *Ângulo de chanfro ( $\alpha$ )*: Soma dos ângulos de bisel dos componentes da junta.

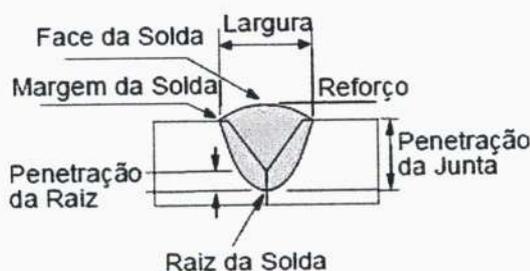
A figura 11 mostra as características de um chanfro.



**Figura 11:** Características dimensionais de chanfros usados em soldagem  
(Fonte: MARQUES, 2009)

### 2.3.5 FACE E RAIZ DA SOLDA

Algumas definições de um cordão de solda são importantes em nosso trabalho, sendo elas a face (parte superior da solda) e a raiz da solda (parte inferior da solda). A figura 12 ilustra essas definições numa peça soldada.



**Figura 12:** Dimensões e regiões de soldas de topo (Fonte: MARQUES *et al*, 2009)

### 2.3.6 SIMBOLOGIA DA SOLDAGEM

Símbolos padronizados são usados para indicar a localização, detalhes do chanfro e outras informações de operações de soldagem em desenhos de engenharia. Existem sistemas de símbolos de soldagem desenvolvidos em normas

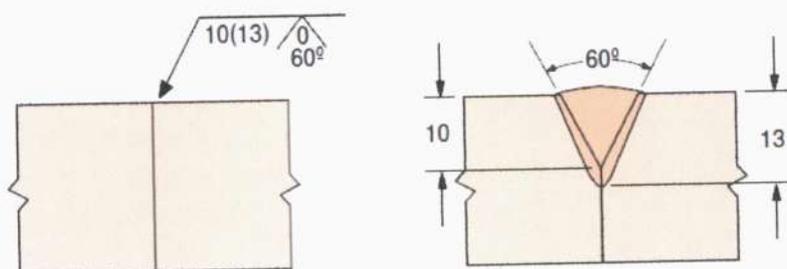
de diferentes países. No Brasil, o sistema mais usado é o da American Welding Society, através de sua norma AWS A 2.4, *Symbols for Welding and Nondestructive Testing*. Um símbolo completo de soldagem consiste dos seguintes elementos: (MODENESI, 2008)

- Linha horizontal de referência
- Seta
- Símbolo básico da solda
- Dimensões e outros dados
- Símbolos suplementares
- Cauda – Especificação do processo de soldagem ou outra referência



**Figura 13:** Localização dos elementos de um símbolo de soldagem (Fonte: MODENESI, 2009)

O símbolo básico da solda indica o tipo de solda e o chanfro que serão usados. O chanfro em V será utilizado nos corpos de prova soldados. A figura 14 mostra um exemplo do símbolo básico comum para chanfro em  $1/2$  V, o símbolo demonstra que a solda será feita do mesmo lado da seta, onde 10 mm é a altura do chanfro e 13 mm é a altura do chanfro mais a solda da raiz.



**Figura 14:** Exemplo de um símbolo para uma solda em chanfro de  $1/2$  V com dimensões (Fonte: MODENESI, 2008)

### **2.3.7 COMPARAÇÃO DA SOLDAGEM COM OUTROS MÉTODOS DE UNIÃO DE METAIS**

Principal processo usado na união permanente de peças metálicas, a soldagem permite a montagem de conjuntos com rapidez, segurança e economia de material. Segundo Marques *et al* (2009) existem inúmeras vantagens na comparação com outros processos de união de metais, como a fundição, destacando-se as seguintes:

- Possibilidade de se terem grandes variações de espessura na mesma peça;
- Inexistência de uma espessura mínima para adequado preenchimento do molde com o metal fundido;
- Possibilidade de se usarem diferentes materiais numa mesma peça;
- Maior flexibilidade em termos de alterações no projeto da peça a ser fabricada;
- Menor investimento inicial.

### **2.3.8 LIMITAÇÕES DA SOLDAGEM**

Todo processo de união de peças tem suas limitações e com a soldagem não é diferente, essas limitações são fatores importantes na escolha do processo de união a ser adotado e na escolha de qual processo de soldagem é mais conveniente. Segundo Modenesi (2000) tais limitações são:

- A solda é uma união permanente e não deve ser utilizada em juntas que precisam ser desmontadas;
- É baseada na aplicação de energia térmica e/ou mecânica, o que tende a causar o aparecimento de distorções, tensões residuais, mudanças de microestrutura e alteração de propriedades;

Estes efeitos, juntamente com a formação de discontinuidades como poros e trincas na solda, podem prejudicar o desempenho dos componentes soldados e causar sua falha prematura. (MARQUES *et al*, 2009)

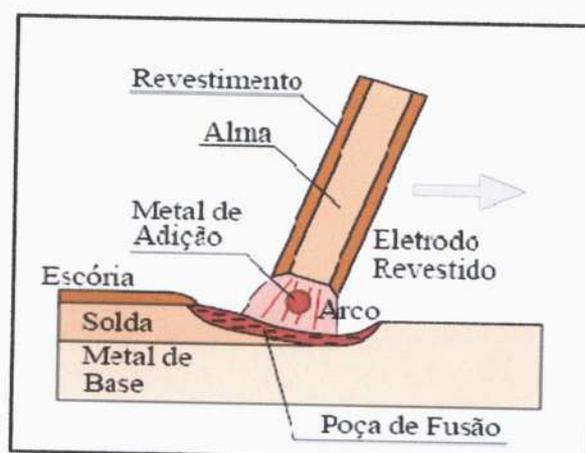
### **2.3.9 PROCESSOS DE SOLDAGEM**

Existe uma grande variedade de processos de soldagem, a seleção de um ou mais processos, deve considerar cada aplicação. É necessária a escolha adequada

do processo, o critério para a escolha de um procedimento de soldagem deve incluir a necessidade de estabelecer o balanço ótimo entre o custo de realização, a qualidade do depósito e a segurança dos operadores (WAINER *et al*, 1992). Neste trabalho sobre a qualificação da solda da lança de um guindaste offshore, o processo escolhido para soldar a estrutura do guindaste é o eletrodo revestido.

### 2.3.9.1 Eletrodo Revestido

A soldagem a arco com eletrodos revestidos é um processo que produz a coalescência entre metais pelo aquecimento destes com um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo metálico revestido e a peça que está sendo soldada. A figura 15 ilustra o processo de soldagem por eletrodo revestido.



**Figura 15:** Esquema de Soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido  
(Fonte: MODENESI& MARQUES, 2000)

Segundo Marques *et al* (2009) o eletrodo revestido consiste de uma vareta metálica, chamada "alma", trefilada ou fundida, que conduz a corrente elétrica e fornece metal de adição para enchimento da junta. A alma é recoberta por uma mistura de diferentes materiais, numa camada que forma o "revestimento" do eletrodo. Este revestimento tem diversas funções na soldagem, principalmente:

- Estabilizar o arco elétrico;
- Ajustar a composição química do cordão, pela adição de elementos de liga e eliminação de impurezas;
- Proteger a poça de fusão e o metal de solda contra contaminação pela atmosfera, através da geração de gases e de uma camada de escória;

- Conferir características operacionais, mecânicas e metalúrgicas ao eletrodo e à solda.

#### **2.3.9.1.1 Vantagens do Processo**

São várias as vantagens do processo de soldagem por eletrodos revestidos. É o processo de soldagem mais simples disponível. Tudo o que se necessita é de uma fonte de energia de corrente constante, dois cabos elétricos e o eletrodo. É o processo de soldagem mais flexível no sentido que pode ser empregado em qualquer posição de soldagem para quase todas as espessuras dos aços carbono (FORTES, 2005).

#### **2.3.9.1.2 Desvantagens do Processo**

Os eletrodos revestidos apresentam taxas de deposição mais baixas que os outros processos, tornando-o menos eficiente. Além disso, o uso de eletrodos revestidos para aços carbono requer mais treinamento dos soldadores novos que os processos de soldagem semi-automáticos e automáticos (FORTES, 2005).

### **2.3.10 SOLDABILIDADE DOS AÇOS ESTRUTURAIS**

A soldabilidade dos aços reflete a maior ou menor facilidade de se obter uma solda resistente e sem trincas. Dada a enorme importância assumida pela solda nos últimos decênios, as formulações químicas dos aços visam sempre a obter produtos soldáveis.

Os aços-carbono até 0,25% C e 0,80% Mn são soldáveis sem cuidados especiais. Para teores de carbono superiores a 0,30% é, em geral, necessário um preaquecimento e um resfriamento lento, pois as soldas sem esse tratamento apresentam ductilidade muito pequena. Os aços de baixa liga, no qual se enquadra o ASTM A 500 grau B, sem e com tratamento térmico são geralmente soldáveis, devendo-se adotar eletrodos adequados e eventualmente preaquecimento do metal base (PFEIL & PFEIL, 2000).

## 2.4 COMPONENTE DO GUINDASTE OFFSHORE ANALISADO

### 2.4.1 A LANÇA

A lança é um dos componentes do guindaste offshore e foi escolhida para a qualificação devido às tensões atuantes, sendo este o componente que suporta os esforços mais importantes entre os componentes do guindaste.

A estrutura foi idealizada em perfis quadrados, normalizados. As vigas principais (cordas) possuem 220x220x10 mm de seção, conforme padrão ISO. As treliças seguiram a mesma linha de perfil, evidentemente com seção menor (ROLIN, 2009).

O material comumente utilizado na lança é um tubo quadrado estrutural (cordas e treliças) no aço ASTM A500 grau B. A figura 16 mostra a lança em estudo.



Figura 16: Lança do guindaste offshore (Fonte: ROLIN, 2009)

#### 2.4.1.1 Características do Material da Lança

Segundo a composição química, os aços utilizados em estruturas são divididos em dois grupos: aços-carbono e aços de baixa liga (PFEIL& PFEIL, 2000);

sendo que o material da lança é classificado como aço de baixa liga. A tabela 1 apresenta as características químicas e mecânicas do aço estrutural ASTM A500 grau B.

**Tabela 1:** Características do ASTM A500 grau B (Fonte: adaptada de TUBOS DE AÇO: ESTRUTURAIS E MECÂNICOS)

<b>ASTM A500 Grau B</b>	<b>C(%) max</b>	<b>Mn(%) max</b>	<b>P(%) max</b>	<b>S(%) max</b>	<b>Cu(%) min</b>	<b>LE MPa</b>	<b>LR MPa</b>	<b>Alongamento (%)</b>
	0,3	1,4	0,045	0,045	0,18	317 min	400 min	23

#### 2.4.1.2 Aços de Baixa Liga

Os aços liga são os aços que contêm além do ferro e do carbono outros elementos. Estes estão presentes com o objetivo de promover mudanças físicas e mecânicas do produto, conferindo-lhes características específicas, como: aumento da dureza e resistência mecânica; aumento da resistência ao calor; ao desgaste; ao corte, melhoramento das propriedades magnéticas e elétricas etc. São classificados de acordo com a porcentagem total de elementos de liga (TELLES, 2003). O aço ASTM A500 grau B é considerado aço de baixa liga, pois contém até 5 % de elementos de liga.

#### 2.4.1.3 Efeitos dos elementos de liga

Os elementos de liga produzem aumento da resistência do aço através da modificação da microestrutura para grãos finos. Graças a este fato, pode obter resistência elevada com teor de carbono de ordem de 0,20%, o que permite a soldagem dos aços sem preocupações especiais. (PFEIL& PFEIL, 2000).

Abaixo estão definidas as propriedades conferidas pelos elementos de liga adicionados ao aço ASTM A 500 grau B segundo Zattoni (2008) e Chiaverini (1986).  
*Carbono:* A quantidade de carbono influi na dureza, no limite de resistência e na soldabilidade.

*Manganês:* O manganês, quando adicionado em quantidade conveniente, aumenta a resistência do aço ao desgaste e aos choques, mantendo-o dúctil.

*Fósforo:* Em teores elevados torna o aço frágil e quebradiço, motivo pelo qual deve-se reduzir ao mínimo possível sua quantidade, já que não se pode eliminá-lo integralmente. Considerado como uma impureza.

*Enxofre:* É um elemento prejudicial ao aço. Torna-o granuloso e áspero, devido aos gases que produz na massa metálica. Enfraquece a resistência do aço. Considerado como uma impureza.

*Cobre:* Melhora a resistência à corrosão atmosférica.

## **2.5 ENSAIOS PARA QUALIFICAÇÃO EM CORPOS DE PROVA SOLDADOS**

Este capítulo trata de alguns ensaios que normalmente são realizados em corpos de prova soldados, e que se enquadram na gama de ensaios destrutivos e não-destrutivos. Destaca-se que nos ensaios destrutivos inutiliza-se a peça na qual foi realizado o ensaio, e no ensaio não-destrutivo a peça não sofre alteração em suas características mecânicas e composicionais.

Os ensaios mecânicos são utilizados para determinação das propriedades mecânicas do material, para determinar a resistência à tração do material e a resistência ao dobramento. A escolha do ensaio adequado é feita de acordo com sua utilização, dos tipos de esforços que o material sofrerá e das propriedades mecânicas que se deseja medir.

Os ensaios que serão realizados são indicados pela norma AWS D1.1/D1.1M que é um código de soldagem estrutural para aços carbono e de baixa liga.

### **2.5.1 ENSAIO DE LÍQUIDO PENETRANTE**

O ensaio de líquido penetrante é classificado como ensaio não-destrutivo, ele permite detectar defeitos de rupturas nas superfícies dos materiais, tais como fendas, que não poderiam ser detectadas a olho nu.

Ele é realizado após a soldagem, onde é aplicado um líquido de cor vermelha, que penetra no defeito, e depois de um certo tempo, é aplicado um revelador, no qual permite a visualização de possíveis defeitos.

## 2.5.2 ENSAIO DE TRAÇÃO

O ensaio de tração é um dos ensaios mais utilizados na determinação das propriedades mecânicas da maioria dos materiais. No ensaio de tração o corpo de prova com formas e dimensões padronizadas é submetido a uma força de tração uniaxial que tende a esticá-lo ou alongá-lo.

A cabeça do corpo de prova é fixada nas garras de uma máquina de ensaio que aplica esforços crescentes na sua direção axial. Durante o ensaio, são medidas a força e deformação correspondente. Em geral o ensaio é realizado até a ruptura do corpo de prova. (PADILHA, 1997)

Quando um corpo de prova metálico é submetido a um ensaio de tração, pode-se construir um gráfico tensão-deformação como apresentado na figura 17, pelas medidas diretas da carga (ou tensão) e da deformação que crescem continuamente até quase o fim do ensaio que corresponde à lei de Hooke.

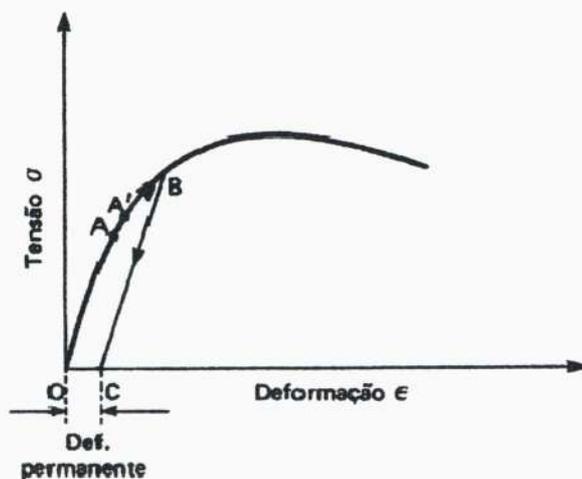


Figura 17: Gráfico tensão x deformação de um metal ou liga metálica (Souza, 1982)

A linearidade do diagrama termina num ponto A, denominado limite elástico, definido como a maior tensão que o metal pode suportar, sem deixar qualquer deformação permanente quando o material é descarregado (SOUZA, 1982).

Verifica-se então que, na parte OA da curva (figura 17), o material está dentro de sua zona elástica, isto é, além de obedecer à lei de Hooke, se, em qualquer ponto dentro da linha OA, a carga for aliviada, o descarregamento seguirá também a mesma reta OA e, para um descarregamento total, o metal volta à origem (ponto O), sem apresentar qualquer deformação residual ou permanente. A estrutura de um

metal no estado sólido é constituída de átomos dispostos segundo um arranjo cristalino uniforme nas três dimensões. Quando o metal é solicitado com um esforço de intensidade tal que a deformação fique no intervalo da linha  $OA$ , os átomos são deslocados de sua posição inicial de uma distância muito pequena e, assim que o esforço é retirado, os átomos voltam à sua posição inicial, devido às forças de ligação entre os mesmos, desaparecendo a deformação (SOUZA, 1982).

Ao ser atingida uma tensão em que o material já não mais obedece à lei de Hooke, ou seja, a deformação não é proporcional à tensão, chega-se ao ponto  $A'$  (figura 17) denominado limite de proporcionalidade. A posição relativa entre  $A$  e  $A'$  é muito discutível e alguns autores colocam  $A'$  abaixo de  $A$ . Na verdade, esses dois pontos muitas vezes se confundem e torna-se muito difícil determiná-los com precisão, devido ao fato de que o desvio da linearidade é sempre gradual e não há precisamente um ponto bem determinado para cada um desses limites mencionados. O limite elástico pode mesmo estar na parte curva do gráfico. O metal pode ter o ponto  $A$  fora da zona onde o material obedece à lei de Hooke e então o limite elástico é definido, nesse caso, como a tensão máxima que permite ainda ao material possuir, para todos os fins práticos, sua total elasticidade. Admite-se que uma deformação residual de 0,001% seja o limite da zona elástica. Essas considerações são mais aplicáveis aos metais dúcteis ou moles. Metais extremamente duros podem romper dentro da zona elástica e daí, esses conceitos deixam de ser importantes (SOUZA, 1982).

Terminada a zona elástica, atinge-se a zona plástica, onde a tensão e a deformação não são mais relacionadas por uma simples constante de proporcionalidade e em qualquer ponto do diagrama, havendo descarregamento do material até tensão igual a zero, o metal fica com uma deformação permanente ou residual. A figura 17 mostra um descarregamento do ponto  $B$  na zona plástica até a linha das abscissas. Nota-se que a linha  $BC$  é paralela à linha  $OA$ , pois o que se perde é a deformação causada na zona plástica, restando à deformação ocorrida na zona elástica (SOUZA, 1982).

O início da plasticidade é verificado em vários metais e ligas dúcteis, principalmente no caso dos aços de baixo carbono, pelo fenômeno do escoamento. O escoamento é um tipo de transição heterogênea e localizada, caracterizado por um aumento relativamente grande da deformação com variação pequena de tensão

durante a sua maior parte. Denomina-se limite de escoamento, à tensão atingida durante o escoamento e é dado pela expressão

$$\sigma_e = \frac{Q_e}{S_0},$$

Onde  $Q_e$  é a carga de escoamento. O limite de escoamento é dado em  $\text{kgf/mm}^2$ .

Terminado o escoamento, o metal entra na fase plástica e o ensaio prossegue até ser atingida uma tensão máxima suportada pelo metal, que caracteriza o final da zona plástica. O limite de resistência,  $\sigma_r$  do metal (dado em  $\text{kgf/mm}^2$ ) é determinado pela expressão:

$$\sigma_r = \frac{Q_r}{S_0},$$

Onde  $Q_r$  é a carga máxima atingida durante o ensaio.

Após ser atingida a carga,  $Q_r$ , entra-se na fase de ruptura do material, caracterizada pelo fenômeno da estrição, que é uma diminuição muitas vezes sensível da secção transversal do corpo de prova, numa certa região do mesmo. Quanto mais mole é o material, mais estrita se torna a secção nessa fase. É nessa região que se dá a ruptura do corpo de prova, finalizando o ensaio. Durante essa fase, a deformação torna-se não-uniforme e a força deixa de agir unicamente na direção normal à secção transversal do corpo de prova.

Mais duas outras propriedades mecânicas podem ser facilmente determinadas pelo ensaio de tração, que são o alongamento total do corpo e a estrição. O alongamento  $A$  é calculado pela expressão (SOUZA, 1982):

$$A = \frac{L-L_0}{L_0} \cdot 100,$$

Onde  $L_0$  é uma distância inicial marcada no corpo de prova antes do ensaio, geralmente especificada pelas normas técnicas e  $L$  é uma distância final após a ruptura do corpo de prova. O alongamento é expresso em %.

A estrição é medida, também em porcentagem, pela diminuição da secção transversal do corpo de prova após a ruptura. A expressão que calcula a estrição,  $\varphi$ , é

$$\varphi = \frac{S_0 - S}{S_0} \cdot 100,$$

Onde  $S$  é a secção final estrita.

Estas propriedades constituem as propriedades mecânicas geralmente fornecidas por um ensaio de tração, sendo também as mais simples para se determinar. Entretanto, outras propriedades podem ser calculadas pelo ensaio de tração, como por exemplo o limite elástico, o limite de escoamento e limite de resistência (SOUZA, 1982).

### 2.5.3 ENSAIO DE DOBRAMENTO

O ensaio de dobramento fornece uma indicação qualitativa da ductilidade do material. Por ser um ensaio de realização muito simples, ele é largamente utilizado nas indústrias e laboratórios, constando mesmo nas especificações de todos os países, onde são exigidos requisitos de ductilidade para um certo material.

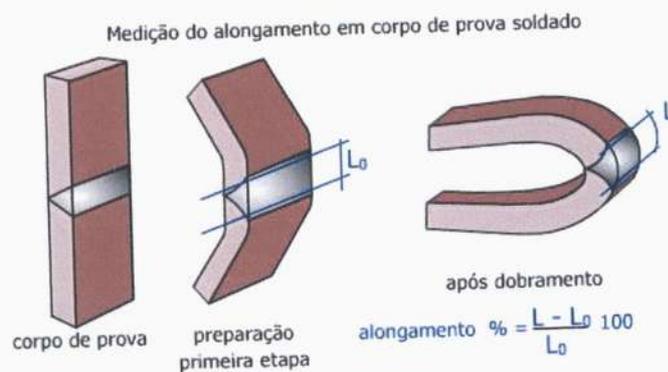
O ensaio, de um modo geral, consiste em dobrar um corpo de prova de eixo retilíneo e secção circular, tubular, retangular ou quadrada, assentado em dois apoios afastados a uma distância especificada. De acordo com o tamanho do corpo de prova, por intermédio de um cutelo, aplica-se um esforço de flexão no centro do corpo de prova até que seja atingido um ângulo de dobramento  $\alpha$  especificado. A carga na maioria das vezes, não importa no ensaio e não precisa ser medida. O cutelo tem um diâmetro que varia conforme a severidade do ensaio, sendo também indicado nas especificações, geralmente em função do diâmetro ou espessura do corpo de prova (SOUZA, 1982).

#### 2.5.3.1- Ensaio de Dobramento em Peças Soldadas

O ensaio de dobramento de peças soldadas tem o objetivo de qualificar a solda, o soldador e o processo de soldagem. O dobramento pode ser livre ou guiado dependendo dos objetivos do ensaio. Para a verificação da qualidade da solda o dobramento é em geral guiado.

Os corpos de prova são extraídos de tubos ou chapas soldadas e devem obedecer as dimensões estabelecidas por normas. Em geral a largura do corpo de prova é uma vez e meia a sua espessura. O ângulo de dobramento é de 180° para todos os testes.

O alongamento das superfícies externas é medido sobre a largura da solda antes do teste,  $L_0$ . No final do teste a largura atinge um valor  $L$ , resultando pra o alongamento o valor indicado na figura 18.

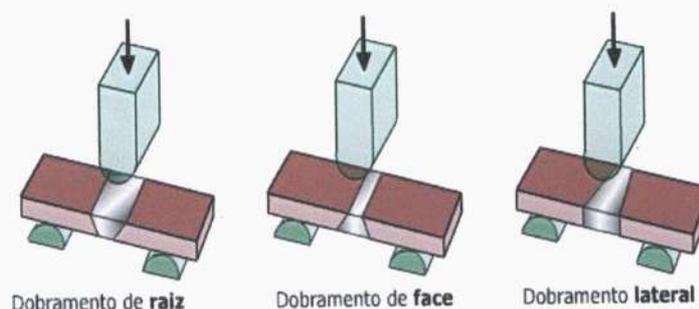


**Figura 18:** Corpo de prova soldado e linhas de medição  
(Fonte: PRINCIPAIS APLICAÇÕES, on-line)

O resultado do teste é novamente feito pela observação da existência ou não de fissuras e fendas na região tracionada do corpo de prova. Defeitos com dimensões acima de 3 mm de comprimento são causa para rejeição. Fissuras que ocorram nas arestas não são consideradas para rejeitar a peça, exceto se provenientes de inclusões ou outros defeitos internos.

A solda deve ser testada em diferentes posições para efeitos de qualificação. Para soldas de topo e teste de qualificação de soldadores, o eixo do corpo de prova pode ser orientado transversamente ou paralelamente à direção do cordão de solda.

Para espessuras do material abaixo de 12 mm, os corpos de prova são testados nas duas posições, com a face e com a raiz da solda em tração. Materiais com mais de 12 mm de espessura normalmente são testados por flexão lateral (ver figura 19).



**Figura 19:** Posições para o ensaio de dobramento em peças soldadas  
(Fonte: PRINCIPAIS APLICAÇÕES, on-line)

A maioria das especificações de solda requer a execução de pelo menos dois testes de raiz e dois testes de face, ou quatro testes laterais para cada peça com solda de topo (PRINCIPAIS APLICAÇÕES, on-line).

## 2.6 ESTIMATIVA DOS CUSTOS DA SOLDAGEM

A análise dos custos de soldagem pode ser solicitada antes de se realizar a soldagem, constituindo uma estimativa de custos (por exemplo, para participar de uma concorrência), ou pode ser feita para uma operação já existente para compor o custo de um produto, avaliar lucratividade ou comparar o custo orçado com custo real. Uma avaliação incorreta dos custos de soldagem pode levar a empresa a oferecer preços muito baixos e gerar perdas econômicas, ou preços muito altos que inviabilizarão a empresa na captação de obras (MARQUES, 2009).

A operação de soldagem envolve um grande número de aspectos que podem ter algum impacto como o uso de consumíveis (metal de adição, gás, fluxo e outros), o custo de pessoal e outros custos fixos, o gasto de energia elétrica, os custos de manutenção e a depreciação dos equipamentos e materiais de proteção, de peças, ferramentas e outros materiais (MODENESI, 2001).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 MATERIAL UTILIZADO NOS ENSAIOS

O material da lança do guindaste offshore é o ASTM A500 grau B, selecionado com base nas normas de fabricação norte-americanas. Devido à difícil aquisição desse material foi selecionado para a realização dos ensaios deste trabalho o aço ASTM A572 grau 50 que apresenta características semelhantes ao empregado no guindaste. Tomando como base que as características cruciais para nosso estudo de qualificação da solda são a **resistência a tração** e o **limite de escoamento**. A tabela 2 apresenta a composição química do material em estudo e a tabela 3 mostra as características mecânicas desse mesmo material.

**Tabela 2:** Composição química do aço ASTM A 572 grau 50  
(Fonte: adaptada USIMINAS, 2008)

ASTM A572 Grau 50	C (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Cu (%)
	0,19	0,81	0,035	0,006	0,10

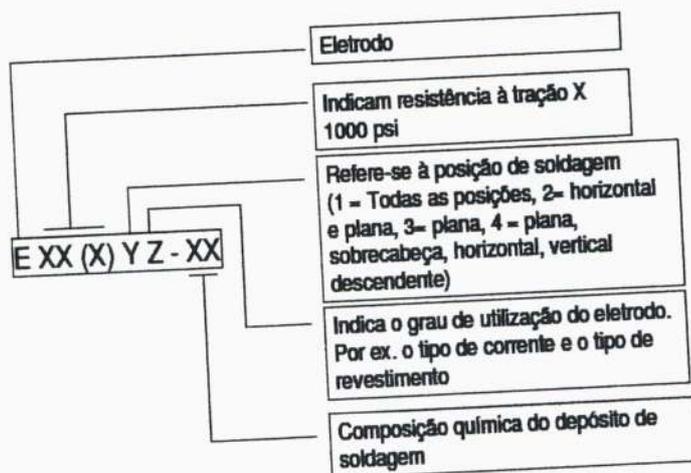
**Tabela 3:** características mecânicas do aço ASTM A 572 grau 50 (Fonte: ZATTONI, 2008)

ASTM A572 Grau 50	LE (Mpa)	LR (Mpa)
	345	450

#### 3.2 O ELETRODO UTILIZADO NO PROCESSO DE SOLDAGEM

Os eletrodos para aços de baixa liga são classificados pelos fabricantes de consumíveis, em conformidade com a especificação da *American Welding Society* A5.5 (AWS A5.5), com base nas propriedades mecânicas (também conhecidas como propriedades físicas) do metal de solda, no tipo de revestimento, na posição de soldagem, e no tipo de corrente (CA ou CC). O sistema de classificação é elaborado para fornecer certas informações sobre o eletrodo e o metal de solda

depositado (ESAB, 2000). O significado das designações da AWSé mostrado na Figura20.



**Figura 20:** Classificação de eletrodos revestidos para aços de baixa liga (Fonte: ESAB, 2000)

Eletrodos de baixa liga são frequentemente selecionados levando mais em consideração as propriedades físicas do aço a ser soldado do que sua composição química. Essas propriedades físicas — resistência, tenacidade, resistência à fluência e à corrosão — refletem o tipo de serviço para o qual o aço é designado.

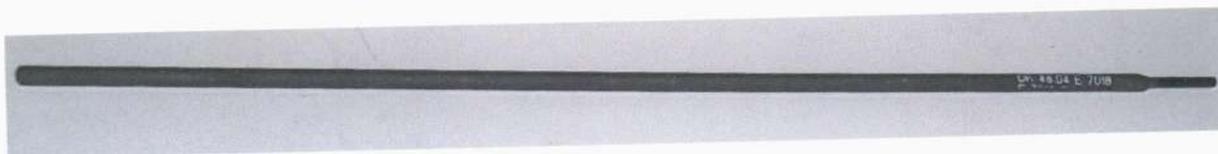
Uma versão moderna do eletrodo de baixo hidrogênio são os eletrodos E7018. Neste eletrodo, a adição de quantidades consideráveis de pó de ferro ao revestimento resulta num arco mais suave e com menos respingos. Esse moderno balanço de ingredientes do revestimento resulta numa grande melhoria na estabilidade do arco, na direção do arco e na facilidade de manuseio em todas as posições. O quadro 2 apresenta as características mecânicas do eletrodo E 7018.

**Quadro 2:** Propriedades mecânicas (Fonte: ESAB, 2000)

Classe	LE (MPa)	LR (MPa)	AI (%)	Ch V média (J)	Ch V indiv. (J)
E7018	≥399	≥482	≥22	≥27	≥20

Por todas essas características, o eletrodo utilizado neste trabalho para soldar o corpo de prova pelo processo de soldagem por eletrodo revestido foi o E 7018 OK 48 04, devido às propriedades que este apresenta em relação ao material ASTM A

572 grau 50. A figura 21 mostra a fotografia do eletrodo utilizado na soldagem das chapas.



**Figura 21:** Eletrodo E 7018 OK 48.04 (Fonte: Acervo pessoal)

O quadro 3 apresenta os parâmetros de soldagem indicados para a soldagem com eletrodos revestidos OK<sup>®</sup>, no caso o OK 48 04. (ESAB, 2000).

**Quadro 3:** Parâmetros de soldagem (Fonte: ESAB, 2000)

Eletrodo	AWS	Diâmetro (mm)	Corrente (A)	Valor ótimo (A)	Tx. dep. (kg/h)	Ef. dep. (%)
OK 48.04	E7018	2,5	65 – 105	90	0,8	66

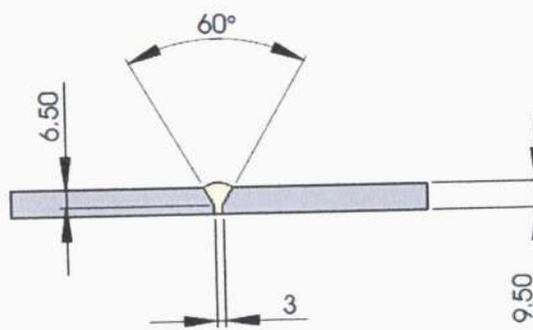
### 3.3 CORPO DE PROVA

O corpo de prova foi confeccionado com base na norma AWS D1.1/D1.1M. A tabela 4 indica as medidas normalizadas utilizadas como referência para confecção dos corpos de prova.

**Tabela 4:** Medidas do corpo de prova (Fonte: AWS D1.1/D1.1M, 2004)

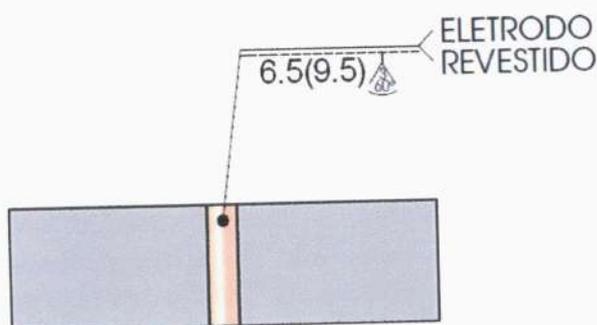
Processo de Soldagem	Espessura (mm)	Preparação do Chanfro em V		
		Abertura da Raiz (mm)	Nariz do Chanfro (mm)	Ângulo de Chanfro (mm)
Eletrodo Revestido	e = 9,50	R = 0 à 3	f = 0 à 3	$\alpha = 60^\circ$

A figura 22 mostra o chanfro utilizado na chapa para deposição do consumível.



**Figura 22:** Chanfro na chapa (Fonte: Acervo pessoal)

A figura 23 ilustra a Simbologia da soldagem utilizada no presente trabalho.



**Figura 23:** Simbologia da Soldagem (Fonte: Acervo pessoal)

Na preparação do corpo de prova foi feito um chanfro em V com ângulo de  $60^\circ$ , um nariz de 3 mm e uma folga de 3 mm na fresadeira de marca Pinnacle da empresa Boechat na chapa do aço ASTM A 572 Grau 50 com dimensões  $420 \times 180 \times 9,50$  mm. A chapa foi soldada no seu centro, em todo seu comprimento, também na empresa Boechat. As figuras, 24, 25, 26, 27 e 28 mostram o processo de fresagem e soldagem da chapa.



**Figura 24:** Confeção do chanfro de  $60^\circ$  e do nariz de 3 mm (Fonte: Acervo pessoal)



**Figura 25:** Preparação da folga (Fonte: Acervo pessoal)



**Figura 26:** Gabarito preparado para soldagem com as medidas pré-estabelecidas (Fonte: Acervo pessoal)



**Figura 27:** Processo de soldagem por eletrodo revestido (Fonte: Acervo pessoal)



**Figura 28:** Chapa soldada (Fonte: Acervo pessoal)

### 3.3.1 CORPOS DE PROVA PARA ENSAIOS MECÂNICOS

A confecção dos corpos de prova para os ensaios mecânicos de tração e dobramento devem seguiras medidas padronizadas presentes na norma AWS D1.1/D1.1M.

A figura 29 e a tabela 5 relacionam a elaboração dos corpos de prova para ensaio de tração e as medidas indicadas para o ensaio de tração em chapas adotadas neste trabalho, atendendo à norma AWS.

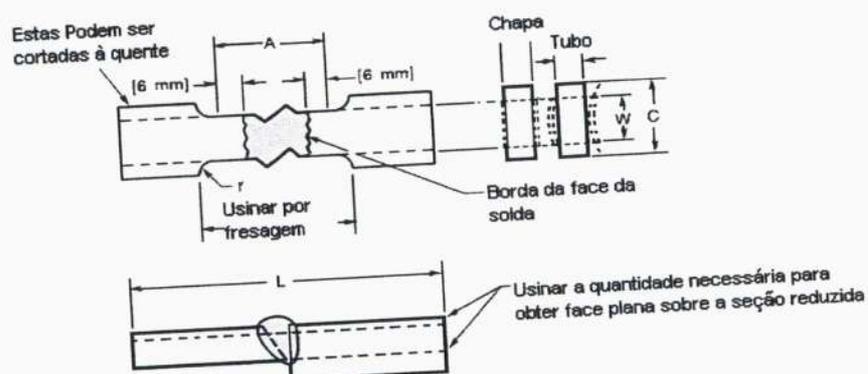


Figura 29: Corpo de prova para ensaio de tração (Fonte: AWS D1.1/D1.1M, 2004)

Tabela 5: Dimensões para corpos de prova para ensaio de tração (Fonte: adaptado AWS D1.1/D1.1M, 2004)

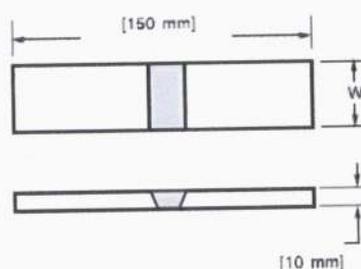
Dimensões (mm)	
espessura $\leq 25$	
L	150
A	60
W	20
C	W + 12
r	12

A figura 30 ilustra o corpo de prova já pronto, com as medidas padronizadas indicadas na tabela 7.



**Figura 30:** Corpo de prova para ensaio de tração (Fonte: Acervo pessoal)

A figura 31 mostra as medidas utilizadas nos corpos de prova para ensaio de dobramento e a tabela 6 indica a largura dos corpos de prova para o referido ensaio.



**Figura 31:** Corpo de prova para ensaio de dobramento (Fonte: AWS D1.1/D1.1M, 2004)

**Tabela 6:** Dimensão para corpos de prova para ensaio de dobramento (Fonte: Adaptado AWS D1.1/D1.1M, 2004)

Dimensão (mm)	
Largura W	
Chapa	40

A figura 32 apresenta o corpo de prova para ensaio de dobramento finalizado.



**Figura 32:** Corpo de prova para ensaio de dobramento (Fonte: Acervo pessoal)

### 3.4 ENSAIO DE LÍQUIDO PENETRANTE

O ensaio de líquido penetrante foi realizado após o processo de soldagem da chapa com eletrodo selecionado (E 7018 Ok 48.04) em parceria com a empresa Boechat, pelo Técnico Mecânico Jarilson.

Foi aplicado na superfície da face e raiz da solda o penetrante vermelho removível a solvente SKL-SP da marca Magnaflux. Após algum tempo foi aplicado o revelador não aquoso Metal Check da marca D70 sobre o penetrante, e observado os resultados.

As figuras 33 e 34 ilustram o processo de ensaio de líquido penetrante.



**Figura 33:** Aplicação do penetrante vermelho (Fonte: Acervo pessoal)



**Figura 34:** Aplicação do revelador (Fonte: Acervo pessoal)

### 3.5 QUANTIDADE DE ENSAIOS E CORPOS DE PROVA PARA TESTES

A norma AWS D1.1/D1.1M especifica, para cada perfil, a quantidade de corpos de prova para cada tipo de ensaio e para cada faixa de espessura. A tabela 7 apresenta os valores correspondentes ao material em estudo (chapa).

1940

1941

1942



THE UNIVERSITY OF CHICAGO  
LIBRARY  
540 EAST 57TH STREET  
CHICAGO, ILL. 60637

**Tabela7: Número de corpos de prova para cada ensaio**  
(Fonte: adaptada AWS D1.1/D1.1M, 2004)

<b>Número de corpos de prova</b>			
<b>Espessura (e) da chapa (mm)</b>	<b>Ensaio de tração</b>	<b>Dobramento de raiz</b>	<b>Dobramento de face</b>
<b><math>3.2 \leq e \leq 9,5</math></b>	2	2	2

### 3.6 ENSAIO DE TRAÇÃO

O ensaio de tração foi realizado em parceria com a Universidade Estadual do Norte Fluminense – UENF, no Centro de Ciência e Tecnologia (CCT), pelo Engenheiro Mecânico e PHD Eduardo Atem de Carvalho. Para realização dos ensaios, foi dividido em 5 partes o pescoço de cada corpo de prova, ou melhor, na sua seção mais estreita, lugar onde foram extraídas as propriedades relevantes em estudo, visando também demarcar cada região para saber o local onde ocorreu a ruptura da peça ensaiada.

O ensaio foi feito em máquina para ensaios mecânicos da marca Instron 5582, com uma taxa de carregamento de 1 mm/min.

A figura 35 mostra o corpo de prova marcado para verificação do local de rompimento.



**Figura 35: Ensaio de tração** (Fonte: Acervo pessoal)

### 3.7 ENSAIO DE DOBRAMENTO

O ensaio de dobramento foi realizado também na UENF, pelo Engenheiro Mecânico e PHD Eduardo Atem de Carvalho. Foram feitos 4 ensaios de dobramento, 2 para dobramento da face da solda e 2 para dobramento da raiz da solda. Foram retiradas as medidas da largura do cordão de solda antes dos dobramentos. A figura 36 ilustra o método de ensaio de dobramento da face e de dobramento da raiz da solda, sendo ilustrado na figura o dobramento da raiz.

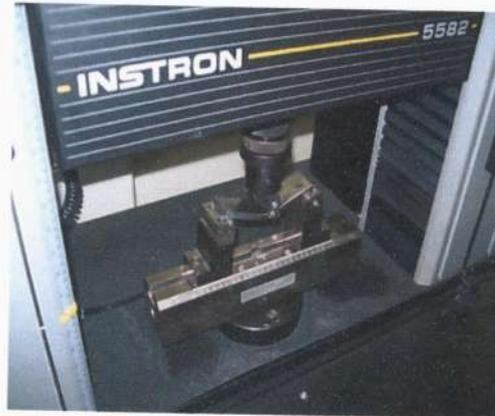


Figura 36: Ensaio de dobramento (Fonte: Acervo pessoal)

Após o dobramento da face e da raiz da solda foram medidas novamente a largura do cordão de solda para verificação do alongamento.

### 3.8 CÁLCULO DE CUSTOS EM SOLDAGEM

Este trabalho apresenta uma estimativa da influência do custo do eletrodo no processo de soldagem de toda a chapa soldada pelo processo de eletrodo revestido, destacando o cálculo da massa do metal depositado  $m_s$ . Destaca-se que segundo (2009), cerca de 93% do custo da operação está na mão de obra e nos consumíveis, e, em muitos casos, apenas calculando estas duas parcelas consegue-se uma boa aproximação dos custos da soldagem.

#### 3.8.1 CÁLCULO DA MASSA DO METAL DEPOSITADO ( $m_s$ )

Segundo Modenesi (2001), a expressão relacionada abaixo demonstra a forma de se calcular a massa de metal depositado na etapa de soldagem.

$$m_s = A_s \cdot L \cdot \rho$$

sendo:

$\rho$  a densidade da solda, ou seja, a densidade do material aço carbono = 7,8 g/cm<sup>3</sup>;

$A_s$  a área transversal do cordão de solda associada com o metal depositado;  
 $L$  o comprimento do cordão.

O cálculo da área transversal do cordão de solda associada com o metal depositado  $A_s$  pode ser calculado segundo a expressão:

$$A_s = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 \text{ e } A_1 = A_1^1 + A_1^2$$

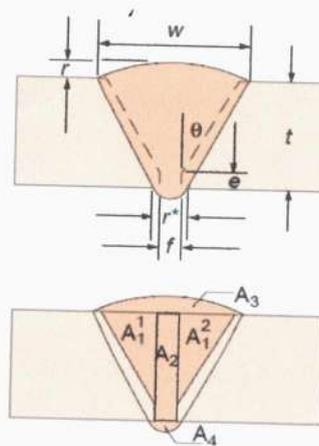
em que as dimensões  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  e  $A_4$  são demonstradas na figura 37, e podem ser calculadas segundo as expressões:

$$A_1^1 = A_1^2 = \frac{(t - e)^2}{2} \tan \theta$$

$$A_2 = t f$$

$$A_3 = \frac{\pi w r}{4}$$

$$A_4 = \frac{\pi}{2} f^2$$



**Figura 37:** Referência para cálculo de massa do metal depositado  
 (Fonte: MODENESI, 2001)

### 3.8.2 CÁLCULO DO CUSTO DO ELETRODO UTILIZADO

Como o custo do material utilizado no processo de soldagem por eletrodo revestido é a principal referência no cálculo do custo total, foi mensurado o custo do

depende do processo utilizado. A expressão para o cálculo do custo do eletrodo utilizado no processo é relacionada:

$$C_e = (m_s / \varphi) C_{eU},$$

Onde  $\varphi$  é a eficiência prática de deposição do processo e  $C_{eU}$  o preço por peso do eletrodo (por exemplo, R\$/Kg). Valores para  $\varphi$  estão relacionados no quadro 4.

**Quadro 4:** Valores para  $\varphi$  (Fonte: MODENESI, 2000)

Processo	$\varphi$ (%)
<b>Eletrodos Revestidos:</b>	
Comprimento: 350mm	55-65
450mm	60-70
<b>Arames:</b>	
SAW	95-100
ESW	95-100
GMAW	90-95
<b>Arames tubulares:</b> FCAW	80-85

## 4 RESULTADOS

### 4.1 ANÁLISE ESTRUTURAL POR LÍQUIDO PENETRANTE

Após a aplicação do líquido penetrante vermelho removível e do revelador não aquoso sobre o penetrante foram detectadas pequenas fissuras na superfície da solda. Com a constatação de tais fissuras, a chapa foi lavada para retirada dos produtos e em seguida esmerilhados os locais que apresentaram os defeitos que novamente foram preenchidos com solda.

Após o preenchimento desses locais, foi feita a verificação da solda pelo processo de líquido penetrante, certificando-se que não haviam mais fissuras nas superfícies.

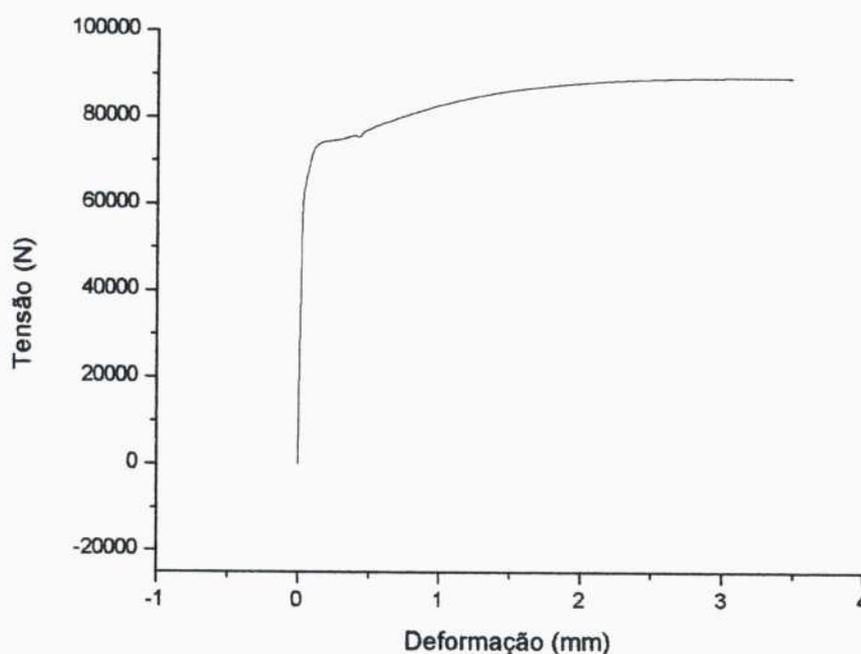
### 4.2 ENSAIOS DE TRAÇÃO

O ensaio de tração realizado permitiu verificar que o rompimento da peça ocorreu no material base, aço ASTM A572 grau 50, e não no cordão de solda. A figura 38 ilustra o aspecto do corpo de prova 1 após o ensaio.



**Figura 38:** Corpo de prova 1 após ensaio (Fonte: Acervo pessoal)

O gráfico mostrado na figura 39 representa a curva Tensão x Deformação do corpo de prova de 1 com a deformação plástica ocorrida, nele pode-se observar o limite de escoamento e resistência do material .



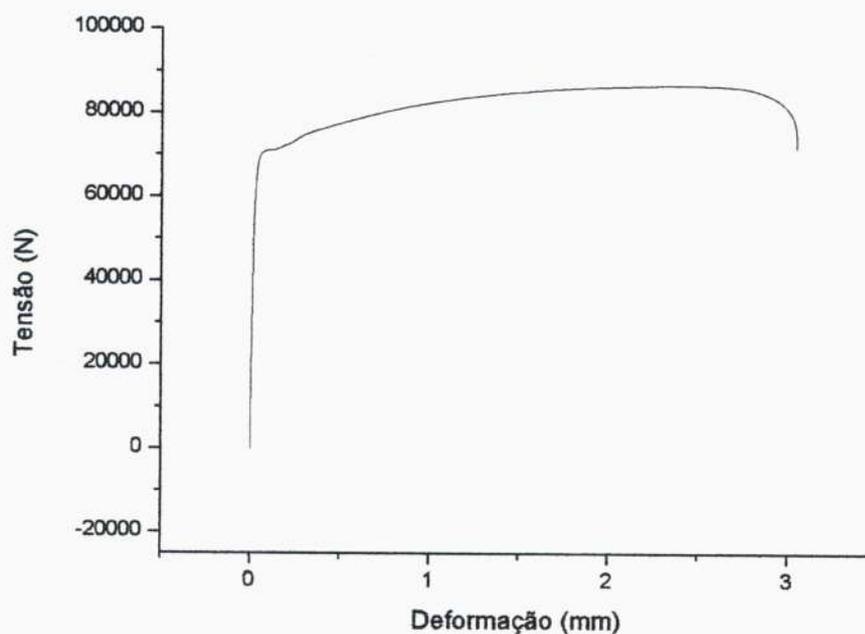
**Figura 39:** Corpo de Prova 1 (Fonte: Acervo pessoal)

Com referência nas expressões do capítulo 2 para ensaio de tração, na tabela 8 estão os resultados obtidos no ensaio de tração, bem como o limite de escoamento, limite de resistência, alongamento e estricção do corpo de prova 1.

**Tabela 8:** Resultados obtidos do corpo de prova 1 (Fonte: Acervo pessoal)

	<b>Resultados obtidos do Corpo de Prova 1</b>
$\sigma_e$	368,42 MPa
$\sigma_r$	456,46 MPa
A	3,99%
$\varphi$	56,65%

O gráfico mostrado na figura 40 representa a curva Tensão x Deformação do corpo de prova de 2.



**Figura 40:** Corpo de Prova 2 (Fonte: Acervo pessoal)

A tabela 9 mostra os valores obtidos após o ensaio do corpo de prova 2

**Tabela 9:** Resultados obtidos do corpo de prova 2 (Fonte: Acervo pessoal)

	<b>Resultados obtidos do Corpo de Prova 2</b>
$\sigma_e$	373,68 MPa
$\sigma_r$	472,52 MPa
A	5,45%
$\varphi$	62,67%

Os valores do limite de escoamento e resistência, que são os resultados relevantes para o estudo, encontrados através do ensaio revelam que os valores obtidos condizem com os dados apresentados pela literatura. A tabela 10 mostra essa comparação.

**Tabela 10:** Comparação de resultados (Fonte: Acervo pessoal)

	Ensaio		
	Literatura	Corpo de prova 1	Corpo de prova 2
$\sigma_e$	345 Mpa	368,42 MPa	373,68 MPa
$\sigma_r$	450 Mpa	456,46 MPa	472,52 MPa

### 4.3 ENSAIOS DE DOBRAMENTO

No ensaio de dobramento pode-se observar o alongamento dos 4 corpos de prova, nenhum destes corpos de prova submetidos ao ensaio de dobramento de face e raiz apresentaram fissuras e fendas com espessuras maiores que 1 mm em suas superfícies. A figura 41 apresenta o corpo de prova raiz 1 após o dobramento realizado na raiz.

**Figura 41:** Aspecto do corpo de prova (Fonte: Acervo pessoal)

Pode-se comprovar a ductilidade dos corpos de prova na região soldada. A tabela 11 apresenta as medidas da largura dos cordões de solda antes e após o dobramento para cálculo do alongamento (AL) conforme a figura 18 do capítulo 2.

*[Faint, illegible text, possibly bleed-through from the reverse side of the page]*

**Tabela 11:** Largura dos corpos de prova para ensaio de dobramento (Fonte: Acervo pessoal)

	<b>L<sub>o</sub></b> <b>(mm)</b>	<b>L (mm)</b>	<b>AL (%)</b>
<b>Face 1</b>	14	22,5	60,71
<b>Face 2</b>	15	23	53,33
<b>Raiz 1</b>	9,3	16,2	74,19
<b>Raiz 2</b>	9,5	16,4	72,63

#### 4.4 CUSTOS

Com base nas expressões do capítulo 3, para o cálculo do custo de soldagem, estão representados na tabela 12 os valores utilizados como base para o cálculo do custo do eletrodo ( $C_e$ ) teórico e real.

**Tabela 12:** Valores de referência para cálculo de  $C_e$ , com resultado real e teórico (Fonte: Acervo pessoal)

<b>Massa do metal depositado (ms)</b>	308,1 g
<b>Eficiência prática de deposição (<math>\varphi</math>)</b>	60%
<b>Preço por peso do eletrodo (<math>C_{eU}</math>)</b>	R\$ 12,86
<b>Custo do eletrodo (<math>C_e</math>) teórico</b>	R\$ 6,60
<b>Custo real</b>	R\$ 4,20

## 5 CONCLUSÃO

### **Eletrodo**

- O eletrodo escolhido normalizado pela ESAB, atendeu perfeitamente as expectativas fundindo-se de maneira uniforme com o metal base.

### **Líquido Penetrante**

- O ensaio de líquido penetrante foi de suprema importância para a realização dos ensaios de tração e dobramento, pois devido a ele, obteve-se a certeza de um excelente cordão de solda, sem fendas, fissuras e concentrações de tensões.

### **Ensaio de Tração**

- Devido à confecção correta dos corpos de prova e escolha certa do eletrodo, pode – se observar que o limite de escoamento e resistência ficaram próximos aos da literatura.
- Comprovado o rompimento dos corpos de prova fora da região soldada, ou seja, no material base (aço ASTM A 572 grau 50).

### **Ensaio de Dobramento**

- A boa ductilidade do consumível evitou o aparecimento de fendas e fissuras maiores que 3 mm na região tracionada.

### **Estimativa do custo**

- O processo por eletrodo revestido por ser um processo mais usual de prática rotineira pelo soldador, o resultado prático se aproximou do resultado teórico do custo de eletrodo.

### **Qualificação do processo de soldagem**

- De posse de todos os resultados obtidos nos ensaios requeridos para qualificação do processo de soldagem, conclui-se que o processo por

eletrodo revestido se qualifica e atende as necessidades mecânicas requeridas pelo projeto.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

API 2C – **Specification for Offshore Pedestal Mounted Cranes**. American Petroleum Institute. EUA, sixth edition, 2004.

AWS D1.1/D1.1M. **Structural Welding Code – Steel**. 19 ed. Miami: AWS, 2004.

Blog da Mecânica, disponível em: Blog da Mecânica. Classificação e utilização de processos de soldagem, disponível em:

<http://www.blogdamecanica.com.br/2010/05/classificacao-e-utilizacao-de-processos.html>

CUNHA, L. M. **Elementos de máquinas**. 1 ed. Rio de Janeiro: LTC. 2005.

ESAB. Minas Gerais. Indústria e Comércio. **Eletrodos revestidos OK**. Contagem, 2005.

FORTES, C. **Soldagem: eletrodo revestido**. 1 ed. Belo Horizonte: ESAB, 2005.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J. ; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem fundamentos e tecnologia**. 3 ed. Belo Horizonte: UFMG, 2009.

MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V. Universidade Federal de Minas Gerais. Departamento de Engenharia Metalúrgica. **Soldagem I: Introdução aos processos de soldagem**, Belo Horizonte, 2000.

MODENESI, P. J. Universidade Federal de Minas Gerais. Departamento de Engenharia Metalúrgica. **Soldagem I: Estimativa de custos em soldagem**. Belo Horizonte, 2001.

MODENESI, P. J. Universidade Federal de Minas Gerais. Departamento de Engenharia Metalúrgica. **Terminologia Usual de Soldagem e Símbolos de Soldagem**. Belo Horizonte, 2008.



O Guindaste, disponível em: Mundo Físico. O guindaste, disponível em: <http://www.mundofisico.joinville.udesc.br/index.php?idSecao=3&idSubSecao=&idTexto=112>

PADILHA, A. F. **Materiais de engenharia: microestrutura e propriedades**. 1 ed. São Paulo: Hemus, 1997.

Principais aplicações, disponível em principais aplicações. Ensaio de dobramento em peças soldadas, disponível em:

[http://java.cimm.com.br/cimm/construtordepaginas/htm/3\\_24\\_8727.htm](http://java.cimm.com.br/cimm/construtordepaginas/htm/3_24_8727.htm)

ROLIN, A. S. **Projeto de guindaste offshore, para uma plataforma fixa, conforme a norma API SPEC 2C, 2009**. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade Redentor, Itaperuna.

SOUZA, S. A. **Ensaio mecânicos de materiais metálicos**. 2 ed. São Paulo:Edgard Blücher, 1982.

TELLES, P. C. S. **Materiais para equipamentos de processo**. 6 ed. Rio de Janeiro: Interciência , 2003.

TUBOS DE AÇO: ESTRUTURAIIS/MECÂNICOS (Porto Alegre-RS). **Tubos de aço: estruturais e mecânicos** – Porto Alegre: catálogo. Rio Grande do Sul, 2007.

WAINER, E. ; BRANDI, S. D.; MELLO, F. D. H. **Soldagem processos e metalúrgia**. 2 ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1992.

ZATTONI, C. C. São Paulo. Faculdade de Tecnologia de São Paulo. Departamento: Hidráulica e saneamento. **Perfis metálicos e laminados planos**. São Paulo: 2008.