



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

MATEUS GONÇALVES BORGES

**Análise mecânica e microestrutural da junta soldada de aço lhr355
usado em guindaste de plataforma *offshore*.**

Guaratinguetá - SP
2017

Mateus Gonçalves Borges

**Análise mecânica e microestrutural da junta soldada de aço lhr355
usado em guindaste de plataforma *offshore*.**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia de Materiais da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia de Materiais.

Orientador (a): Prof. Dr. Marcelino Pereira do Nascimento.

Borges, Mateus Gonçalves
B732a Análise mecânica e microestrutural da junta soldada de aço LHR355
 usado em guindaste de plataforma Offshore / Mateus Gonçalves Borges –
 Guaratinguetá, 2017.
 62 f. : il.
 Bibliografia: f. 61-62

 Trabalho de Graduação em Engenharia de Materiais – Universidade
 Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2017.
 Orientador: Prof. Dr. Marcelino Pereira do Nascimento

 1. Soldagem. 2. Guindastes, etc. 3. Fadiga. I.Título.

CDU 621.791


Luciana Máximo

Bibliotecária/CRB-8 3595

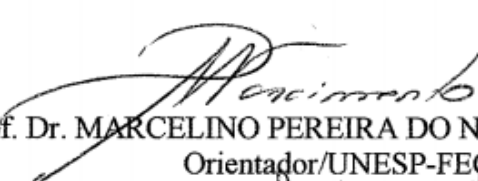
MATEUS GONÇALVES BORGES

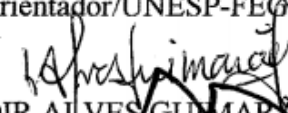
**ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
“GRADUADO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS”**

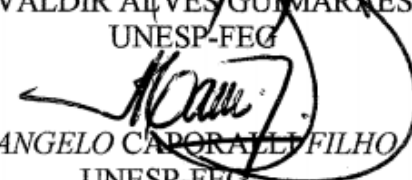
**APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS**


Prof. Dr. Miguel Ramrez Gil
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. MARCELINO PEREIRA DO NASCIMENTO
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. VALDIR ALVES GUIMARÃES
UNESP-FEG


Prof. Dr. ANGELO CAPORALI FILHO
UNESP-FEG

Dezembro de 2017

DADOS CURRICULARES

MATEUS GONÇALVES BORGES

NASCIMENTO	07.04.1995 – São Paulo / SP
FILIAÇÃO	Francisco Wiranley Isidoro Borges Antonia Josineide Gonçalves Borges
2013/2018	Graduação em Engenharia de Materiais. Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”.

Dedico este trabalho
de modo especial, à minha família.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, fonte da vida e da graça. Agradeço por sempre se mostrar presente, nos momentos bons e principalmente durante as dificuldades.

Ao meu orientador, *Prof. Dr. Marcelino Pereira do Nascimento* que jamais deixou de me incentivar e acreditou no meu potencial. Sem a sua orientação, dedicação, auxílio e amizade o estudo aqui apresentado não seria possível.

Aos meus pais *Francisco e Antonia*, minhas irmãs *Thais e Denise* por todo amor, dedicação e principalmente por me mostrarem o caminho correto na vida.

Aos meus irmãos da *República Taj Mahal*, por todos os ensinamentos e por todo o suporte durante essa caminhada. De forma especial ao meu irmão *Ian Guiné de Souza*, que me auxiliou de forma essencial na realização deste projeto.

A minha namorada *Larissa Martins*, por todo amor, carinho, paciência e por ser o meu “braço direito” na vida.

Às funcionárias da Biblioteca do Campus de Guaratinguetá pela dedicação, presteza e principalmente pela vontade de ajudar.

Aos funcionários da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá pela dedicação e alegria no atendimento, de forma especial para os Funcionários e Técnicos do Departamento de Materiais e Tecnologia.

“Tudo posso Naquele que me Fortalece”

Filipenses 4:13

RESUMO

Com o avanço da tecnologia e aumento constante da população mundial, a sociedade atual necessita de construções cada vez maiores e mais sofisticadas, isso tem levado os engenheiros, projetistas e construtores a empregar materiais cada vez mais resistentes e trabalhados, tendo como um dos objetivos principais a diminuição de peso do produto final. Essas considerações não se aplicam somente ao caso de estruturas fixas, mas principalmente em estruturas móveis, e no caso deste trabalho nos equipamentos *offshore*. Levando em consideração essas aplicações, se faz necessário materiais cada vez mais processados, de tal forma que ofereçam características mecânicas satisfatórias (como resistência e ductilidade) além da resistência ao processo de soldagem. O principal objetivo deste trabalho foi realizar um estudo sobre as propriedades mecânicas do material-base e da junta soldada pelo processo MIG/MAG de um tubo de aço LHR355 utilizado em Guindastes *Offshore* de plataformas de prospecção de petróleo e gás. Após a realização de metalografia e ensaios como microdureza, tração e fadiga, foi possível concluir que o material atende os requisitos necessários para ser aplicado neste segmento.

PALAVRAS-CHAVE: Soldagem. Fadiga. LHR355. Guindastes *OffShore*.

ABSTRACT

With the advancement of technology and a steady increase in the world's population, today's society needs ever larger and more sophisticated constructions, thus leading engineers, designers and builders to employ ever more resilient and hard-working materials, having as one of the main objectives a decrease in weight of the final product. These considerations are not applied in the case of fixed structures, but mainly in mobile installations, and in the case of this work in offshore equipment. Taking into consideration the applications, complex materials are made more and more processed, so that it offers satisfactory mechanical characteristics (such as strength and ductility) besides the production in the welding process. The main objective of this work was to carry out a study on how a mechanical property of the material-base and the joint welded by the MIG / MAG process of a LHR355 steel tube used in Offshore Cranes for oil and gas exploration platforms. After a metallography and tests such as microhardness, traction and fatigue, it was possible to conclude that the material meets the requirements necessary to be applied in this segment.

KEYWORDS: Welding. Fatigue. LHR355. Offshore Cranes.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Guindaste <i>Offshore</i>	15
Figura 2 – Ranger I.....	17
Figura 3 – Semissubmersível Alexander L. Kielland.....	18
Figura 4 – Detalhes da semissubmersível Alexander L. Kielland.....	18
Figura 5 – Navio Liberty partido em dois	19
Figura 6 – Equipamento esquemático, com detalhes da tocha	20
Figura 7 – Gases utilizados para soldagem MIG/MAG	21
Figura 8 – Escala versus estrutura	23
Figura 9 – a) mini-lingote experimental de aço, atacado com Nital 10%, rechupe de solidificação b) idem, acalmado com alumínio c) filete de solda em aço carbono, atacado com Nital 10% d) camada cimentada em engrenagem, ataque iodo-iodeto.....	24
Figura 10 – Microscópio Óptico.....	25
Figura 11 – Resposta tensão-deformação de material dúctil carregado depois de escoamento e descarregado	26
Figura 12 – Comportamento tensão-deformação esquemático apresentado por alguns aços ..	28
Figura 13 – Comportamento da curva tensão-deformação de engenharia até a fratura do Material	29
Figura 14 – Representação esquemática do comportamento tensão-deformação em tração para materiais dúcteis e frágil	30
Figura 15 – Gráfico Tensão – Deformação em diferentes temperaturas para o ferro	31
Figura 16 – Curvas tensão - deformação para materiais (área sombreada sob a curva no regime elástico) frágeis e materiais dúcteis	33
Figura 17 – Ciclo de tensões alternadas	34
Figura 18 – Ciclo de tensões repetidas	34
Figura 19 – Ciclo de tensões aleatórias	34
Figura 20 – Amplitude da tensão (S) em função do logaritmo de ciclos até a falha por fadiga (N) para (a) um material que exhibe um limite de resistência à fadiga e (b) material que não exhibe um limite de resistência à fadiga.....	36
Figura 21 – Gráfico de transição dúctil – frágil.....	37
Figura 22 – Notícia do acidente do Titanic	38
Figura 23 – Esquema de impressão do endentador Vickers	39
Figura 24 – Corpos de Prova para ensaio de Tração	42

Figura 25 – Ilustração gráfica das regiões de fadiga	44
Figura 26 – “Marcas de Praia”	44
Figura 27 – “Marcas de Catraca”	44
Figura 28 – Porcentagem de cada elemento na estrutura do Aço LHR355.....	46
Figura 29 – Fluxograma das principais etapas realizadas na análise do aço.....	47
Figura 30 – Serra transversal.....	47
Figura 31 – Especificações da Serra.....	47
Figura 32 – Corpo de prova para análises metalográficas.....	48
Figura 33 – Microscópio EPIPHOT 200	49
Figura 34 – Microdurâmetro BUEHLER	49
Figura 35 – Processo de Oxicorte.....	50
Figura 36 – Corpos de Prova para ensaio de Fadiga	50
Figura 37 – Corpo de prova para ensaio de Tração.....	51
Figura 38 – Equipamento SHIMADZU	51
Figura 39 – Antes da ruptura	52
Figura 40 – Depois da ruptura	52
Figura 41 – Material-base.....	53
Figura 42 – Transição material-base e junta soldada	53
Figura 43 – Junta Soldada	53
Figura 44 – Micrografia do Metal Base.....	54
Figura 45 – Micrografia da Junta Soldada.....	55
Figura 46 – Esquema do cdp e locais de ensaio de microdureza Vickers.....	56
Figura 47 – Microdureza Vickers.....	56
Figura 48 – Valores obtidos através do ensaio de microdureza Vickers.....	56
Figura 49 – Tensão-Deformação para três corpos de prova do aço LHR355	57
Figura 50 – Ensaio de Fadiga axial do aço LHR355.....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação IIW dos Gases para soldagem por MIG/MAG.....	21
Tabela 2 – Normas para eletrodos de soldagem	22
Tabela 3 – Composição Química do Aço LHR355	46
Tabela 4 – Valores obtidos após ensaio de microdureza Vickers	56
Tabela 5 – Valores obtidos após a realização do Ensaio de tração	58
Tabela 6 – Valores obtidos no ensaio de fadiga axial do aço LHR355.....	58

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
AWS	<i>American Welding Society</i>
CCC	Cúbica de Corpo Centrado
CDP	Corpo de Prova
CFC	Cúbica de Face Centrada
DMT	Departamento de Materiais e Tecnologia
FEG	Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá
HC	Hexagonal Compacta
IIW	<i>International Institute of Welding</i>
LE	Limite de Escoamento
LRF	Limite de Resistencia a Fadiga
MAG	<i>Metal Active Gas</i>
MB	Material-base
MIG	<i>Metal Inert Gas</i>
MS	Metal de Solda
RGF	Região de Grãos Finos
RGG	Região de Grãos Grosseiros
S.A	Sociedade Anônima
UNESP	Universidade Estadual Paulista
ZAC	Zona Afetada pelo Calor

LISTA DE SÍMBOLOS

A0	Área de secção reta antes do ensaio
Af	Área de secção reta após a fratura
C°	Graus Celsius
E	Módulo de Elasticidade
F°	Graus Fahrenheit
HV	Vickers
J	Joule
kgf	Quilograma Força
kN	quilo Newton
l0	Comprimento Útil
lf	Comprimento após ruptura
mm	milímetro
MPa	Mega Pascal
N	Newton
nm	nano metro
R	Razão de Tensões
RA	Redução de área percentual
U	Módulo de Resiliência
σ_m	Tensão Média
σ_r	Intervalo de Tensões
σ_a	Amplitude de Tensões
ϵ_l	Deformação no momento do escoamento
ΔL	Alongamento percentual
μm	micrometro

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	FALHAS E FRATURAS EM PLATAFORMA E GUINDASTES <i>OFFSHORE</i>	17
2.1.1	Ranger I	17
2.1.2	Alexander L. Kielland	18
2.1.3	Navios Liberty	19
2.2	PROCESSO DE SOLDAGEM MIG/MAG	19
2.2.1	Gases de proteção	21
2.2.2	Seleção do eletrodo	22
2.3	METALOGRAFIA	22
2.3.1	Macroscopia	23
2.3.2	Microscopia Óptica	24
2.4	INTRODUÇÃO AS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS MATERIAIS	25
2.4.1	Comportamento mecânico dos materiais sólidos	26
2.4.1.1	Comportamento elástico	26
2.4.1.2	Comportamento plástico	27
2.4.2	Propriedades mecânicas dos materiais	27
2.4.2.1	Escoamento e Limite de escoamento	28
2.4.2.2	Limite de resistência à tração	29
2.4.2.3	Ductilidade	30
2.4.2.4	Resiliência	32
2.4.2.5	Tenacidade	32
2.4.2.6	Fadiga	33
2.4.2.7	Transição Dútil- Frágil	36
2.5	DUREZA VICKERS	38
2.5.1	Ensaio de dureza Vickers convencional	38
2.5.2	Ensaio de microdureza Vickers	40
2.6	ENSAIO DE TRAÇÃO	41
2.7	ENSAIO DE FADIGA	42
3	MATERIAIS E MÉTODOS	42
3.1	OPERAÇÃO DE CORTE POR SERRA HIDRÁULICA E DE FITA	46

3.2	PREPARAÇÃO METALOGRÁFICA.....	47
3.3	ANÁLISES MACRO/MICROSCÓPICAS.....	48
3.4	ENSAIO DE MICRODUREZA VICKERS.....	48
3.5	USINAGEM DOS CORPOS DE PROVA DE TRAÇÃO/FADIGA AXIAL	49
3.6	ENSAIO DE TRAÇÃO.....	50
3.7	ENSAIO DE FADIGA	51
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	52
4.1	METALOGRAFIA.....	53
4.2	ENSAIO DE MICRODUREZA VICKERS.....	53
4.3	ENSAIO DE TRAÇÃO.....	55
4.4	ENSAIO DE FADIGA	57
5	CONCLUSÃO.....	58
	REFERÊNCIAS.....	61

1 INTRODUÇÃO

Atualmente os guindastes *offshore* são os “braços” das sondas, plataformas e navios, pois todos os equipamentos, inclusive alimentos, embarcados e desembarcados se dão por meio dos guindastes, além de serem as principais ferramentas no auxílio da extração do petróleo e fazerem parte da faina de emergência em caso de incêndio a bordo.

Figura 1 – Guindaste *Offshore*.



Fonte: Liebherr S.A.

Quando há paralização do guindaste, seja por defeito ou avaria, isto representa a interrupção em diversas operações na plataforma ou nas sondas e, inclusive, pode afetar a permanência dos trabalhadores a bordo, devido à perda da alternativa de abandono da unidade em caso de incêndio quando não é possível pousar com helicóptero na plataforma.

Em virtude da representatividade desse segmento *offshore* e da sua importância tecnológica existe a necessidade de aprimorar e desenvolver os processos na fabricação de guindastes e soluções, visando principalmente a reduzir e prevenir falhas.

O desenvolvimento deste trabalho envolve assuntos amplamente relacionados ao contexto da engenharia, principalmente da relação existente entre processamento de materiais e as características que se espera após esse processamento. O material em questão (aço empregado especificamente no braço de guindastes de plataformas *offshore*) que nos foi gentilmente fornecido pela Liebherr S.A. está exposto a inúmeros esforços mecânicos, em consequência, a necessidade de realizar-se análises tanto macro, quanto microestruturais. E especificamente o estudo do processo de soldagem (MIG/MAG) que é basicamente um processo por arco elétrico entre a peça e o consumível em forma de arame, eletrodo não

revestido, fornecido por um alimentador contínuo, realizando união de materiais metálicos pelo aquecimento e fusão.

A relação existente entre o estudo teórico e prático envolvido neste trabalho, como ensaios de fadiga, tração, microdureza e observação microscópica do material, promoveram o amadurecimento com relação ao entendimento dos métodos de pesquisa, exaltando a importância da contribuição para a tecnologia.

As etapas da pesquisa tiveram como combustível as preocupações que um engenheiro deve ter ao projetar uma estrutura de braços de guindaste *Offshore*, focando nos esforços que o material estará exposto, deste modo tornando possível o dimensionamento adequado, visando à precaução de acidentes, que acarretariam prejuízo financeiro e humano. Além da contribuição tecnológica, os assuntos abordados e metodologias utilizadas também forneceram grande contribuição pessoal, desenvolvendo habilidades e uma possível área para atuação futura.

1.1 OBJETIVOS

Este projeto foca primeiramente um estudo sobre as características micro estrutural do material-base e da junta soldada pelo processo MAG de um tubo de aço LHR355 utilizado em “Guindastes *Offshore*” de plataformas de prospecção de petróleo e gás. As análises foram complementadas por ensaios mecânicos de tração e fadiga (conforme as normas *ASTM E8M* e *ASTM E466*, respectivamente) do material-base e de microdureza das várias regiões da junta soldada (zona afetada pelo calor/ZAC e metal de solda/MS). As análises obedeceram as recomendações das normas DNV-RP-C102 (*Structural Design of Offshore Ships*), DNV-OS-C101 (*Design of Offshore Steel Structures, General (LRFD Method)*), DNV-RP-C206 (*Fatigue Methodology of Offshore Ships*).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 FALHAS E FRATURAS EM PLATAFORMA E GUINDASTES *OFFSHORE*

É comum aprender-se mais com falhas do que com sucesso (ALMAR NAESS, 1985). O fenômeno de ruptura por fadiga foi percebido antes de 1850 através da observação de eixos ferroviários que falhavam sem uma explicação lógica. Deve-se aos estudos de Wöhler (1850) a percepção do fenômeno, mesmo após um aprofundamento no assunto, diversos acidentes ocorreram no século XX devido à fadiga (MARIANA BARROS, 2013).

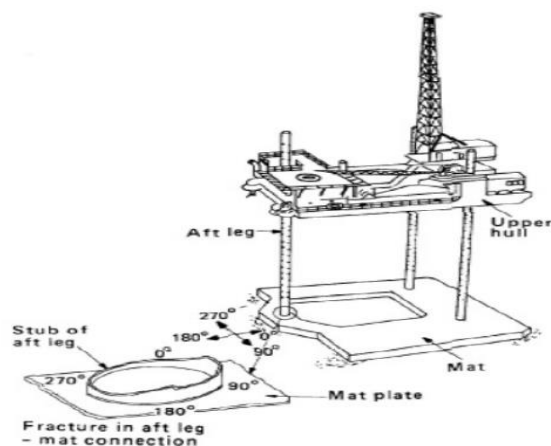
A seguir estão alguns desses acidentes.

2.1.1 Ranger I

O acidente na plataforma de perfuração auto elevatória Ranger I (Golfo do México) aconteceu em 1979 segundo ALMAR NAESS.

A tragédia ocorreu entre a perna da popa e placa do fundo onde se iniciou e propagou uma trinca de aproximadamente 500 mm de comprimento que se iniciou na posição de 270° e propagou para 90° ao longo da vida da estrutura. Esta falha resultou no colapso da perna seguido do colapso do convés da popa e flexão e separação das pernas da proa. Estudos mostraram a presença de trincas próximas a mesma posição nas duas pernas da proa (MARIANA BARROS, 2013).

Figura 2 - Ranger I.



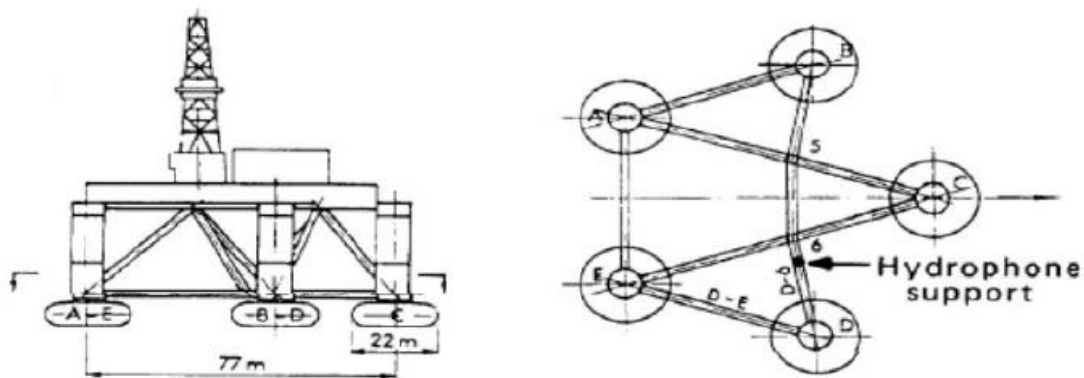
Fonte: Naess (1985).

2.1.2 Alexander L. Kielland

De acordo com o estudo de ALMAR NAESS, o acidente com a submersível Alexander L. Kielland (1980, Mar do Norte) deixou 123 vítimas.

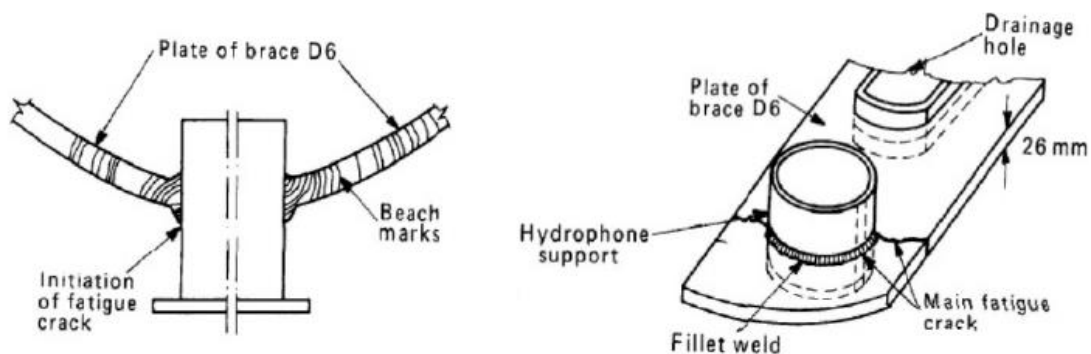
A perícia mostrou que o que ocasionou o acidente foi uma fratura de fadiga que teve seu início na solda mal executada entre um suporte de hidrofone com a barra de contraventamento D6, logo na sequencia houve uma rápida e instável ruptura na barra. Na Figura 3 ilustra-se a posição das cinco colunas, barra de contraventamento D6 e do suporte do hidrofone. A Figura 4 mostra onde ocorreu a ruptura e a posição da trinca. (MARIANA BARROS, 2013).

Figura 3 - Semissubmersível Alexander L. Kielland.



Fonte: Naess (1985).

Figura 4 - Detalhes da semissubmersível Alexander L. Kielland.



Fonte: Naess (1985).

2.1.3 Navios Liberty

No início da Segunda Guerra Mundial foram construídos 2700 navios do tipo Liberty pelos Norte Americanos. Segundo ANDERSON (1995) os navios eram construídos por meio de soldagem entre as seções pré-fabricadas do casco.

Do total de navios, 400 apresentaram fraturas, sendo 90 consideradas sérias, em 20 destes navios ocorreu perda da embarcação. Fraturas frágeis ocorreram ao longo da junta soldada em alguns navios, fazendo com que o navio se partisse em dois, como ilustrado na Figura 5. As causas podem ser diversas, como falha humana do operador de solda, má qualidade da solda, concentração de tensão nas escotilhas do convés e materiais de construção inapropriados. Essas falhas impulsionaram os estudos da mecânica da fratura (MARIANA BARROS, 2013).

Figura 5 - Navio Liberty partido em dois.



Fonte: Okumoto (2009).

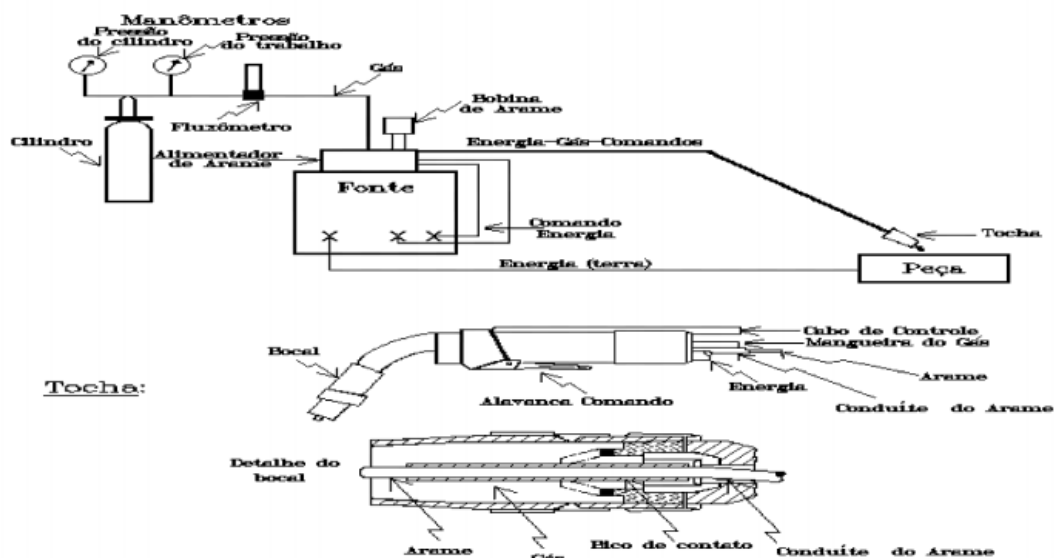
2.2 PROCESSO DE SOLDAGEM MIG/MAG

Este processo de soldagem tem como princípio a formação de um arco elétrico entre a peça e um eletrodo nu consumível, que é alimentado de forma contínua. Logo, há formação

de uma poça de fusão, que neste caso é protegida por um ou mais gases. Esses gases podem ser Inertes ou Ativos, daí a diferença entre os procedimentos de soldagem. O “MIG – *Metal Inert Gas*” utiliza os gases inertes, já o “MAG – *Metal Active Gas*” os gases ativos (MACHADO, 1996).

Mesmo sendo um procedimento tradicional e conhecido desde 1926, somente começou a ser realmente desenvolvido a partir de 1948, utilizando o argônio (gás inerte) para a soldagem de alumínio. Três anos mais tarde, a aplicação em materiais metálicos foi possível graças à adição de oxigênio ao argônio, já em 1953 houve a introdução de dióxido de carbono puro ou em mistura (MACHADO, 1996).

Figura 6 – Equipamento esquemático, com detalhes da tocha.



Fonte: Machado (1996).

Para MACHADO a soldagem pode ser feita de forma semiautomática ou automática, apresentando excelente tendência à robotização, graças as suas características como a ótima estabilidade do arco, baixa produção de escória e possibilidade de soldar em diversas posições.

As aplicações da soldagem MIG/MAG vão de pequenas indústrias até as responsáveis por produção em massa, isto se deve a algumas características do processo como:

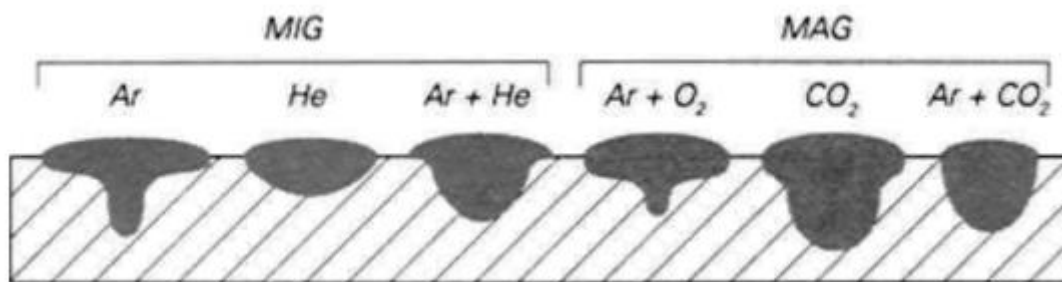
- Facilidade de operação;
- Conveniência para robotização;

- Maior fator de operação e taxa de deposição que Eletrodo revestido;
- Menor tendência a produção de trincas por hidrogênio.

2.2.1 Gases de Proteção

Com relação aos gases mais comumente utilizados, estes são o argônio, nitrogênio, hidrogênio, hélio, oxigênio e dióxido de carbono, tanto em sua forma pura como em misturas.

Figura 7 – Gases utilizados para soldagem MIG/MAG.



Fonte: Coleção Tecnológica SENAI (1997).

O *International Institute of Welding* (IIW) tem uma classificação específica para os gases utilizados em soldagem MIG/MAG, são sete tipos diferentes e estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Classificação IIW dos Gases para soldagem por MIG/MAG.

Grupo	Índice	Nº de Gases	Gases (%)					Tipo	Conteúdo Típico de gás em metal de solda (%)
			CO ₂	O ₂	Ar	He	H ₂		
II	1	1	-	-	-	-	100	Redutor	
	2	2	-	-	85 à 95	-	R*		
I2	1	1	-	-	100	-	-	Inerte	<0,02
	2	1	-	-	-	100	-		
	3	2	-	-	25 à 75	R	-		
MI	1	2	-	>0 à 2	R	-	-	Levemente Oxidante	<0,025
	2	2	>0 à 4	-	R	-	-		
	3	3	>0 à 4	>0 à 2	R	-	-		
ME	1	2	-	>2 à 5	R	-	-	Oxidante	<0,035
	2	2	>4 à 10	-	R	-	-		
	3	3	>0 à 10	>2 à 5	R	-	-		
NB	1	2	-	>5 à 12,5	R	-	-	Aumento na Oxidação	<0,045
	2	2	10 à 25	-	R	-	-		
	3	3	10 à 25	>0 à 12,5	R	-	-		
NI	1	2	-	>12,5	R	-	-	Idem	<0,054
	2	2	>25	-	R	-	-		
	3	3	0 à >25	0 à >12,5	R	-	-		
C	1	1	100	-	-	-	-	Fortemente Oxidante	~0,06 à 0,07
	2	2	R	<30	-	-	-		

* = Restante.

Fonte: *International Institute of Welding*.

2.2.2 Seleção do Eletrodo

Já com relação aos eletrodos, eles podem aparecer em diferentes diâmetros (0,8 - 1,0 - 1,2 e 1,6 mm) e é imprescindível a correta combinação dos consumíveis utilizados, sendo a escolha do tipo de arame baseada em requisitos mecânicos e metalúrgicos da junta, combinados com o fator custo. Metais que apresentam ponto de fusão muito baixo não podem ser soldados por processos que utilizam arco elétrico (MACHADO, 1996).

A Tabela 2 ilustra as especificações da *American Welding Society* (AWS) mostrando os arames adequados para cada tipo de material, sendo que para cada um existe uma norma específica.

Tabela 2 – Normas para eletrodos de soldagem

Norma	Material a soldar
AWS A 5.3	Arames de alumínio e suas ligas
AWS A 5.6	Arames de cobre e suas ligas
AWS A 5.9	Arames de aço inoxidável e aços com alto teor Cr
AWS A 5.14	Arames de níquel e suas ligas
AWS A 5.16	Arames de titânio e suas ligas
AWS A 5.18	Arames de aço carbono e aços de baixa liga
AWS A 5.19	Arames de magnésio e suas ligas

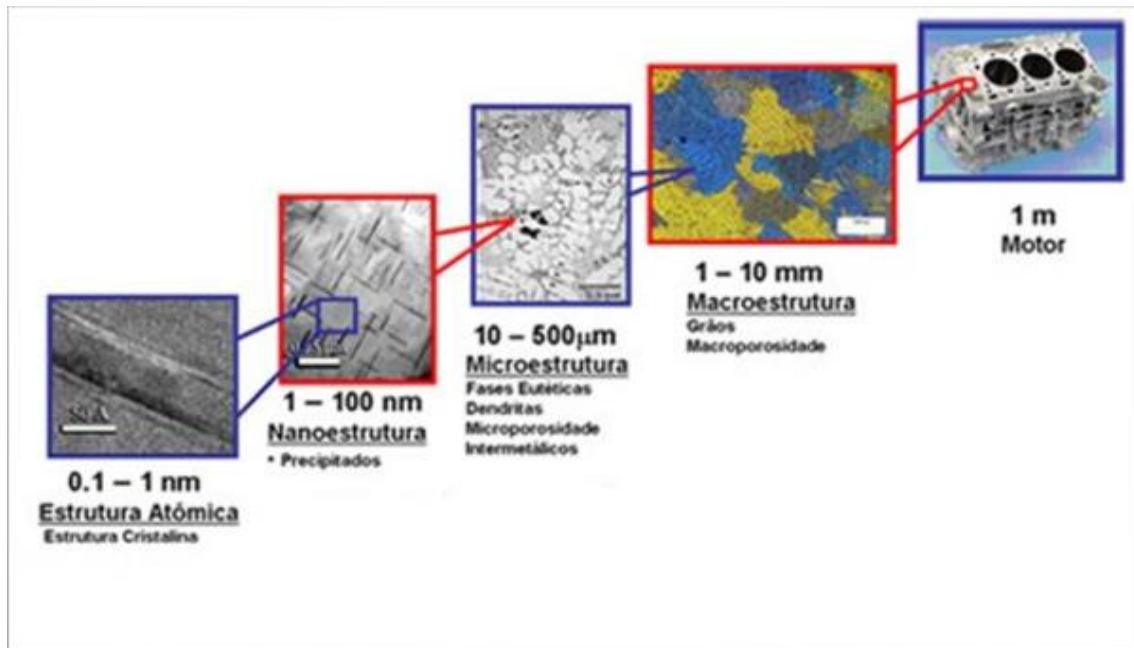
Fonte: *American Welding Society*.

2.3 METALOGRAFIA

A microestrutura é a chave para o entendimento do comportamento dos materiais, por isso cientistas e profissionais do campo vêm usando diversas ferramentas para estudar e compreender esta área. A utilização desta ferramenta permite estudar desde a estrutura dos grãos, contorno dos grãos, presença de fases, defeitos de linha, defeitos de superfície os respectivos efeitos sobre as características do material (SMITH & HASHEMI, 2012).

Para iniciar a técnica de macro ou microscopia óptica, a superfície do material em estudo necessita passar por alguns procedimentos de preparação, que algumas vezes podem ser específicos e/ou demorados. Após o corte e embutimento (se necessário), inicia-se o lixamento, de forma que se apliquem lixas com granulometria crescente, com o intuito de remover arranhões e finas camadas plasticamente deformadas. Em sequência, se dá o procedimento de polimento da peça, que removem os riscos finos formados durante o estágio de lixamento. Deve-se manter em mente que a qualidade da superfície tem um grande impacto na obtenção final das imagens. No último estágio do procedimento, o ataque químico. A escolha do intervalo de tempo e produto que serão utilizados no ataque varia de material para material (SMITH & HASHEMI, 2012).

Figura 8 – Escala versus estrutura.



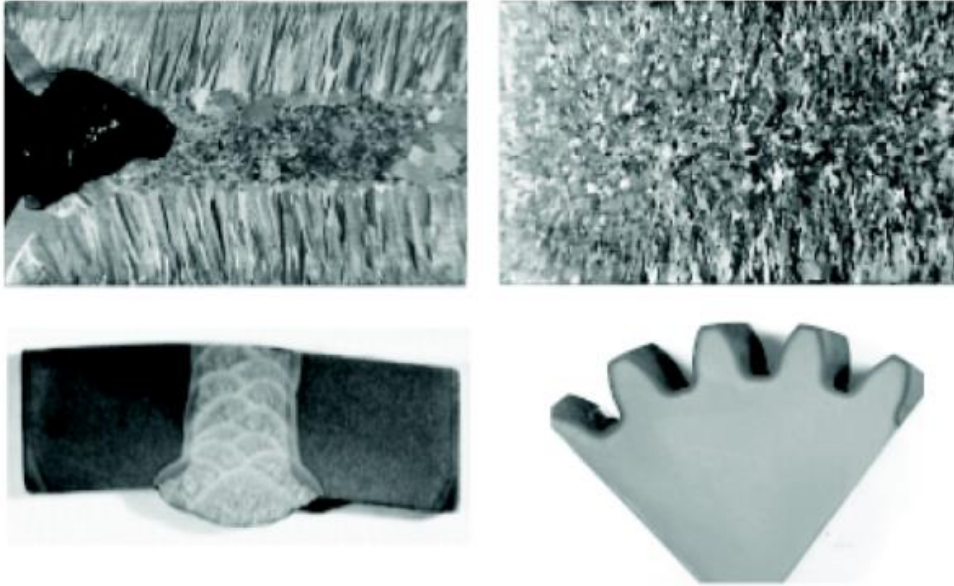
Fonte: Azevedo (2011).

2.3.1 Macroscopia

A observação preliminar de um material a olho nu, ou com baixa ampliação, é um procedimento indispensável sendo a mais antiga técnica de exame da estrutura dos materiais. Já no século XVIII Réamur pode diferenciar tipos de aços através de ataque químico e antes disso ainda, Damasco revelavam a qualidade de suas espadas através deste processo (MANNHEIMER, 2012).

Esta técnica se mostra útil na pesquisa, como na análise de falhas e no controle da qualidade. Esta é uma ferramenta muito poderosa, capaz de nos oferecer observações sobre a homogeneidade do material, processos de fabricação anteriores, já que qualquer anormalidade presente na superfície do material pode ser detectada (MANNHEIMER, 2012).

Figura 9 – Macrografias a) mini-lingote experimental de aço, atacado com Nital 10%, rechupe de solidificação b) idem, acalmado com alumínio c) filete de solda em aço carbono, atacado com Nital 10% d) camada cimentada em engrenagem, ataque iodo-iodeto



Fonte: Mannheim (2012).

2.3.2 Microscopia Óptica

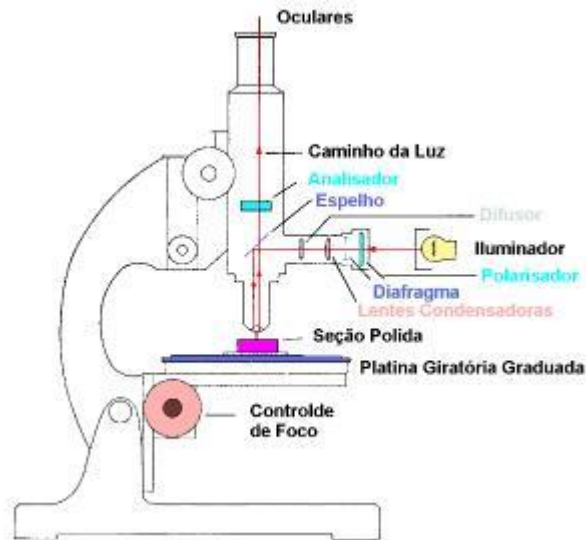
Segundo COLPAERT a metalografia microscópica estuda os produtos metalúrgicos utilizando um microscópio como o da Figura 10, tendo como objetivo a determinação de constituintes e a sua textura.

Para um estudo mais aprofundado deste tópico, necessita-se ter o conhecimento que os metais, de forma geral, são agregados cristalinos cujos cristais tanto podem ser quimicamente idênticos, como ser de composição química diferente. Eles são idênticos em casos particulares como no caso do ferro, cobre, alumínio, ou seja, em “puros”. Porém, podem também apresentar esta característica em soluções sólidas como o cobre e níquel. Estes cristais são conhecidos como os “grãos” da estrutura, porém existem casos particulares onde podem ser chamados de nódulos, veios, agulhas, glóbulos entre outros (COLPAERT, 1974).

Utilizando a técnica apropriada, torna-se possível a visualização desta textura microscópica, assim como a apreciação de sua natureza, respectiva porcentagens, dimensões, arranjo e formato. A importância de se caracterizar a microestrutura se dá ao fato de que as propriedades mecânicas do material estão diretamente ligadas a sua composição química e sua textura. Assim, os exames micrográficos (assim como os macrográficos) fornecem preciosas

informações sobre como o metal adquiriu as propriedades que apresentam (COLPAERT, 1974).

Figura 10 – Microscópio Óptico



Fonte: Prof. Dr. Hélio Goldenstein.

2.4 INTRODUÇÃO AS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS MATERIAIS

Os materiais quando colocados em sua determinada função, estão expostos a forças quando aplicados em projetos logo são de fundamental importância para estudar o comportamento do material em determinadas situações, para observar suas características, assim podendo aperfeiçoar o material e o projeto em questão (CALLISTER JR, 2002).

“O comportamento mecânico de um material reflete a relação entre a sua resposta ou deformação a uma carga ou força que esteja sendo aplicada. Algumas propriedades mecânicas importantes são a resistência, dureza, a ductilidade e a rigidez” (CALLISTER JR, 2002).

Utilizando experimentos laboratoriais pode-se definir algumas propriedades mecânicas dos materiais e para que se possa ter um resultado mais perto do ideal, deve-se utilizar as devidas condições de serviço, como por exemplo, o meio ambiente e o valor da carga devem ser considerados para os cálculos. Fatores como o tempo também são de fundamental importância para os resultados, pois a cada tempo que se aplica carga como de tração, compressão, cisalhamento obtém-se uma resposta diferente do material.

Como na maioria dos ramos da engenharia, existem normas a serem seguidas, normas que padronizam o trabalho laboratorial diminuindo as chances de conclusões errôneas. Este

trabalho segue normas pré estabelecidas como as normas DNV-RP-C102 (*Structural Desing of Offshore Ships*), DNV-OS-C101 (*Design of Offshore Steel Structures, General (LRFD Method)*), DNV-RP-C206 (*Fatigue Methodology of Offshore Ships*).

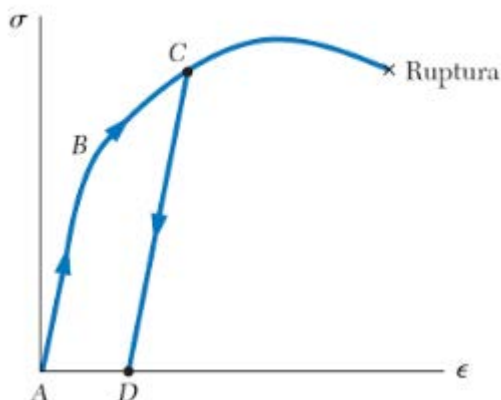
2.4.1 Comportamento Mecânico dos Materiais Sólidos

2.4.1.1 Comportamento Elástico

Diz-se que o material se comporta elasticamente se as deformações específicas provocadas em um determinado corpo de prova pela aplicação de uma força desaparecem quando a força é removida. O maior valor para qual o material está em regime elástico é o chamado limite elástico do material (BEER & JOHNSTON, 2011).

Para materiais com o ponto de escoamento bem definido, o limite elástico, o limite de proporcionalidade e o ponto de escoamento são iguais. Ou seja, o material se comporta de forma linear desde que a tensão seja mantida abaixo do ponto de escoamento, assim como mostra do ponto A até o ponto B da Figura 11 (BEER & JOHNSTON, 2011).

Figura 11 – Resposta tensão-deformação de material dúctil carregado depois de escoamento e descarregado



Fonte: BEER (2011).

2.4.1.2 Comportamento Plástico

De forma oposta ao comportamento elástico, os materiais apresentam comportamento plástico quando há deformação permanente em sua estrutura. Essa deformação ocorre após o ponto de escoamento, de tal forma que quando a força é removida a tensão e as deformações diminuem de forma linear (Intervalo C e D na Figura 11). O fato de E não retornar a zero após a remoção da força deve-se ao fato de que ocorreu deformação plástica no material (BEER & JOHNSTON, 2011).

Para muitos materiais a deformação plástica depende de fatores como o valor máximo atingido pela tensão e o tempo decorrido até que o carregamento seja removido. A parte da deformação plástica que depende da tensão é chamada de escorregamento, já a parte que depende do tempo (que também é influenciada pela Temperatura) é conhecida como fluência (BEER & JOHNSTON, 2011).

2.4.2 Propriedades Mecânicas dos Materiais

Os materiais estruturais utilizados na prática devem conter resistência. Sendo resistência uma medida das forças externas aplicadas ao material de tal forma que vençam as forças internas de ligação dos materiais. Os materiais devem ser capazes de suportar as forças em que está exposto, sem sofrer grandes distorções. Contudo, uma grande gama de propriedades é necessária para formar as características necessárias no material, por exemplo, algumas vezes o material deve ser maleável e dúctil ao mesmo tempo. Alguns procedimentos de conformação podem acarretar em percas de algumas dessas propriedades, e nessas situações o engenheiro deve entrar em ação, tomando decisões de forma a contornar essas mudanças. Outras propriedades muito importantes para os materiais são a elasticidade, dureza e tenacidade, assim como a fluência e a fadiga.

A combinação de propriedades mecânicas é fundamental para o bom funcionamento do material, e essa combinação depende da aplicação, tipo e processamento do material, assim como outros diversos outros fatores.

De forma resumida, serão apresentados alguns dos conceitos mais importantes relacionados às propriedades mecânicas dos materiais.

2.4.2.1 Escoamento e Limite de Escoamento

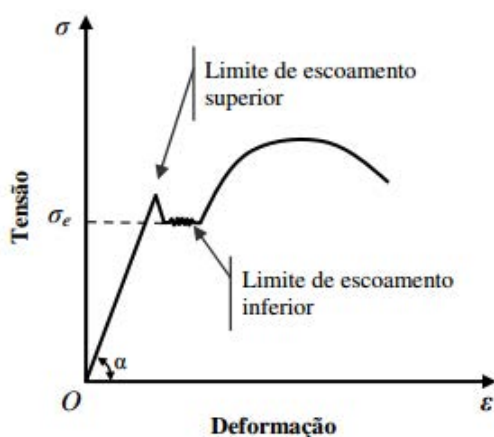
O limite de escoamento é dado pela tensão que limita as deformações elásticas e plásticas. Não existe linearidade no gráfico tensão – deformação, pois após esse limite e a partir deste ponto as deformações são permanentes. Diversos projetos são efetuados para garantir que o resultado da aplicação de uma tensão alcance somente a região elástica. A magnitude do limite convencional de escoamento de um material é justamente uma medida de sua resistência à deformação plástica (CALLISTER JR, 2002).

Nos casos onde não se pode observar o exato ponto onde existe a deformação plástica, define-se uma linha que seja paralela à porção elástica da curva tensão deformação, onde existe uma pré-deformação específica de 0,002, ou seja, a tensão que consegue causar uma deformação permanente de 0,2% no material. A tensão limite de escoamento é obtida no ponto do gráfico da curva tensão-deformação que corresponde a pré-deformação (CALLISTER JR, 2002).

Considerando os casos onde o fenômeno do pico do escoamento é descontínuo, não é aplicável o método da linha de pré-deformação. Pois a tensão de escoamento varia, e é definida pela média do valor mais alto e do valor mais baixo do intervalo de tensões.

Na figura 12 tem-se o gráfico com um exemplo de material com escoamento descontínuo assim se pega o limite de escoamento inferior, que se refere à tensão de módulo mais baixo dentro da descontinuidade e o limite de escoamento superior, a maior tensão neste mesmo intervalo e encontra-se a média entre esses valores.

Figura 12 - Comportamento tensão-deformação esquemático apresentado por alguns aços.



Fonte: Samuel (2008).

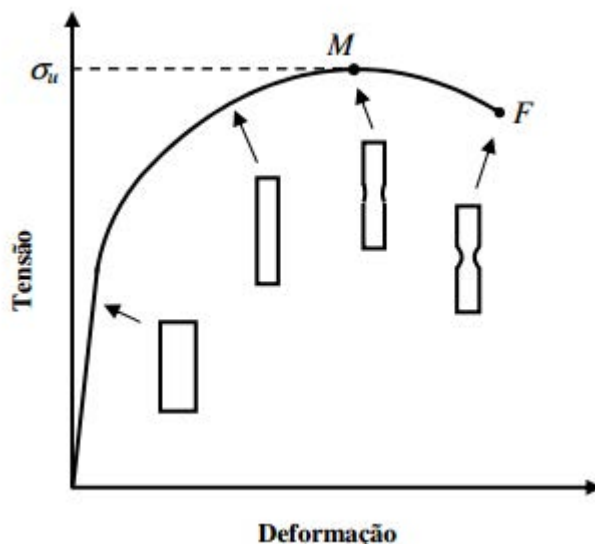
2.4.2.2. Limite de Resistência à Tração

Observando o gráfico tensão-deformação, percebe-se que o ponto máximo é definido como limite de resistência à tração, ou seja, é a máxima carga suportada pelo material antes que esse rompa. Aplicando-se por um determinado tempo essa tensão limite, o material irá se romper. Porém, antes de se romper, há uma deformação plástica deste, de forma uniforme em uma região estreita encontrada sob tração (CALLISTER JR, 2002).

Segundo CALLISTER, no momento de carga máxima suportada ocorre o estreitamento de uma região, designada como a fase de formação de “pescoço”. Após o início dessa região toda a deformação dá-se nessa área até a ruptura do material.

É possível notar na Figura 13 o gráfico tensão – deformação e nele os limites de resistência à tração, a resistência à fratura e o desenvolvimento do “empescoamento” do corpo de prova.

Figura 13 - Comportamento da curva tensão-deformação de engenharia até a fratura do Material



Fonte: Callister (2002).

Os limites de resistência à tração variam muito de material para material, apresentando ampla escala de variação, por exemplo, 50 MPa para o alumínio e 2500 MPa para um aço de elevada resistência (CALLISTER JR, 2002).

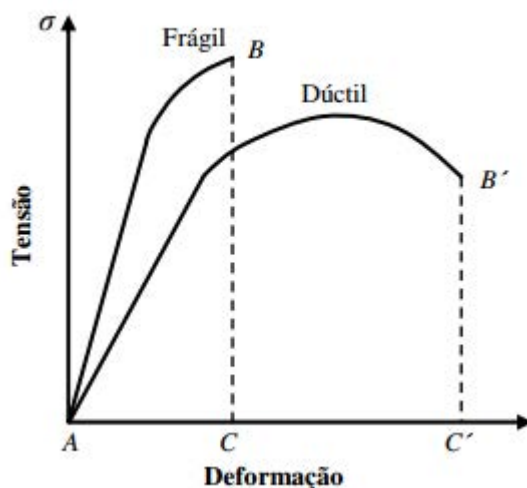
A tensão de limite de escoamento que é utilizada para estudos de tensões em projetos, pois assim que se sucede a tensão máxima do material, o limite de resistência à tração, o

material imediatamente deforma-se plasticamente e sua estrutura já não é a mesma. A resistência à fratura não é utilizada para fins de engenharia (CALLISTER JR, 2002).

2.4.2.3. Ductilidade

A ductilidade está relacionada com a medida do grau de deformação plástica que foi suportada na fratura. No caso da existência de uma deformação plástica antecedente à fratura intitula-se o material dúctil. Como esta deformação ocorre com consumo de energia, a deformação plástica anterior à fratura é intensa e associa-se a um comportamento tenaz, a fratura denomina-se dúctil. Um material que antes da sua ruptura não apresenta deformação plástica ou a mesma é considerada irrelevante é designado frágil. Materiais frágeis exibem uma ruptura catastrófica, ou seja, a uma determinada tensão não indicam que irá ocorrer a fratura. Pode-se observar na Figura 14 a diferença de curva entre um material dúctil e um frágil (CALLISTER JR, 2002).

Figura 14 - Representação esquemática do comportamento tensão-deformação em tração para materiais dúcteis e frágeis



Fonte: Garcia (2000).

A ductilidade pode ser medida pelo alongamento percentual ou pela redução de área percentual. O alongamento percentual refere-se à porcentagem da deformação plástica no instante de fratura do material. A seguir está a fórmula de cálculo do alongamento percentual (CALLISTER JR, 2002).

$$\Delta L\% = ((l_f - l_0) / l_0) \times 100 \quad (1)$$

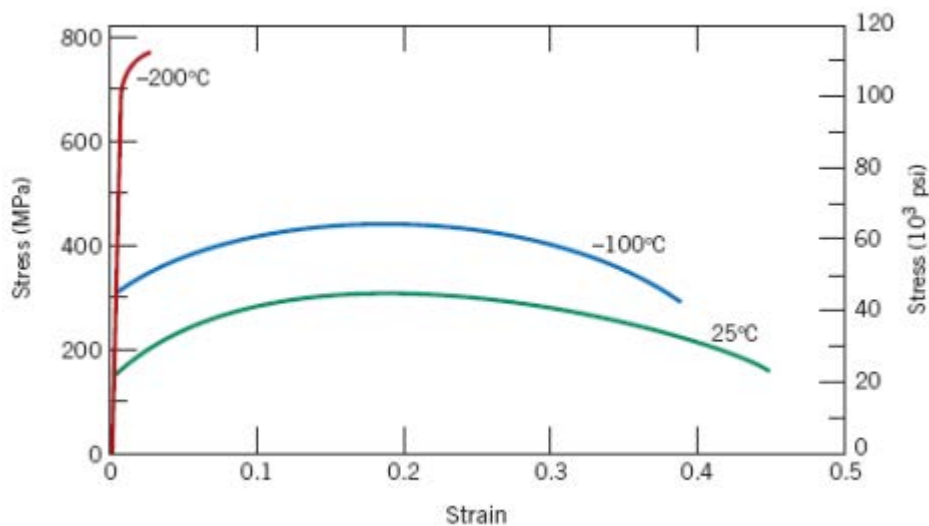
Sendo l_0 o comprimento útil antes do ensaio e l_f o comprimento após a ruptura, para menores valores de l_0 a fração de alongamento também será menor, já que o percentual é diretamente proporcional à l_0 . Foi estabelecido um tamanho com o intuito de que os corpos de prova possuam um tamanho especificado, sendo geralmente de 50 mm. Assim padronizou-se a forma de cálculo, auxiliando na comparação entre ensaios diferentes a fim de que não haja divergências (CALLISTER JR, 2002).

A redução de área percentual é definida na seguinte fórmula:

$$RA\% = ((A_0 - A_f) / A_0) \times 100 \quad (2)$$

Onde A_0 é a área da secção reta antes do ensaio e A_f é a área da secção reta após a fratura. A temperatura influencia na ductilidade do material, em valores mais baixos de temperatura o material é mais frágil e em altas temperaturas o material é mais dúctil. Essa diferença de ductilidade pode ser vista na Figura 15 (CALLISTER JR, 2002).

Figura 15 - Gráfico Tensão – Deformação em diferentes temperaturas para o ferro



Fonte: Callister (2002).

Na engenharia a ductilidade é uma propriedade bastante relevante, pois em um projeto é interessante conhecer o grau de deformação anterior à ocorrência de uma fratura na estrutura. São definidos como frágeis materiais que possuem até 5% de deformação plástica antes da fratura do corpo de prova (CALLISTER JR, 2002).

2.4.2.4. Resiliência

Resiliência é a capacidade de um material absorver energia quando deformado sob regime elástico e liberá-la quando descarregado, ou seja, retorna ao seu formato original. A medida desta propriedade é dada pelo módulo de resiliência que é representado pela letra U, sendo a energia de deformação por unidade de volume necessária para tracionar o metal de origem até o limite de escoamento (CALLISTER JR, 2002).

A fórmula matemática da resiliência é:

$$U = \int_0^{\epsilon_l} \sigma d\epsilon \quad (3)$$

Se a região elástica for linear a equação pode ser escrita da seguinte forma:

$$U = \frac{1}{2} \epsilon_l \sigma_l \quad (4)$$

ϵ_l é a deformação no momento do escoamento.

A equação mostra que a resiliência é a área abaixo da curva de tensão – deformação até o limite de escoamento. Esta área é definida pela unidade de energia, assim mostrando que a área calculada é a energia absorvida pelo material (CALLISTER JR, 2002).

2.4.2.5. Tenacidade

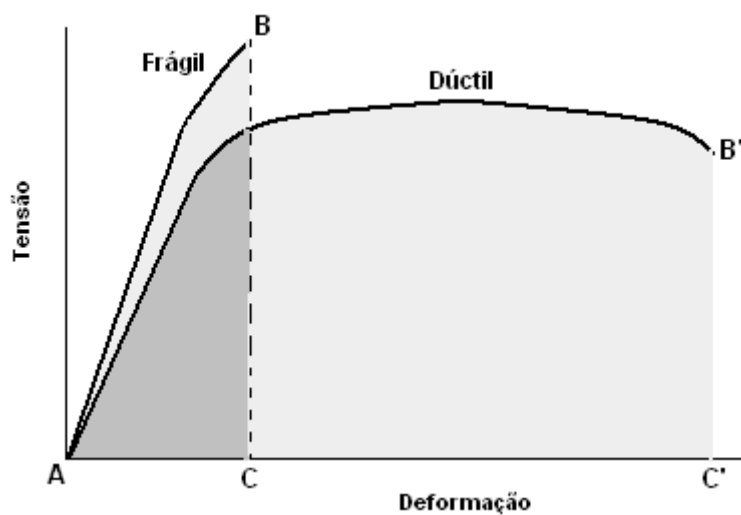
Tenacidade é a capacidade de certo material absorver a energia até sua eventual fratura. Alguns parâmetros influentes são o corpo de prova e a carga de aplicação. No caso de ensaios com carregamento dinâmico, onde existe elevada taxa de deformação, é realizado um entalhe no corpo de prova para que aconteça a ruptura do material. Geralmente o ensaio com entalhamento é denominado ensaio de impacto (CALLISTER JR, 2002).

Para que o material seja tenaz ele deve ser tanto resistente como dúctil, materiais dúcteis são mais tenazes do que materiais frágeis. Pode observar na Figura 16 que o material frágil tem um maior limite de escoamento, porém o material dúctil é mais tenaz, essa

afirmação pode ser feita através do estudo das áreas abaixo das duas curvas de tensão – deformação (CALLISTER JR, 2002).

A avaliação da tenacidade é realizada pelo ensaio de tração onde ocorre baixa taxa de deformação. A tenacidade corresponde à área abaixo da curva de tensão deformação, sendo uma energia sua unidade de medida é dada em joules (CALLISTER JR, 2002).

Figura 16 - Curvas tensão - deformação para materiais (área sombreada sob a curva no regime elástico) frágeis e materiais dúcteis.



Fonte: Callister (2002).

2.4.2.6. Fadiga

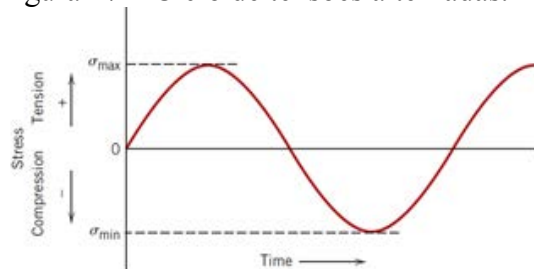
A Fadiga é caracterizada pela forma de falha que ocorre em estruturas que estão sujeitas a carregamentos cíclicos em alguns casos, podem falhar em um nível de tensão menor do que o limite de resistência à tração ou limite de escoamento para uma carga estática (CALLISTER JR, 2002).

O termo “fadiga” é utilizado, pois esse tipo de falha normalmente ocorre após um período longo de ciclos de deformação. Essas falhas tem início com uma pequena trinca, que pode ter sua origem na fabricação do material ou que evoluiu ao longo do tempo, pelas deformações cíclicas, ao redor dos concentradores de tensão. Logo, é fundamental que o projeto de estruturas dinamicamente carregadas ou sujeitas a vibrações, sejam executados de modo a minimizar a concentração de tensões. Pois, para o caso dos metais, a fadiga é um fator

determinante, sendo responsável por aproximadamente 90% de todas as falhas (CALLISTER JR, 2002).

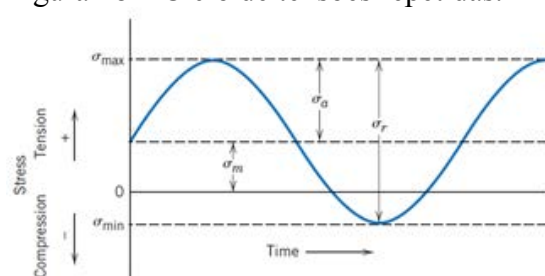
As tensões aplicadas em estruturas sujeitas a falha por fadiga podem ser de diferentes tipos: axial (tração-compressão), de flexão (dobramento) ou de torção. Normalmente existem três variedades distintas de tensão oscilante em função do tempo. O primeiro deles, o ciclo de tensão alternado, está representado na Figura 17 este tem dependência regular e senoidal em relação ao tempo, sendo a amplitude simétrica ao nível zero de tensão, alternando, por exemplo, entre uma tensão de tração máxima ($\sigma_{\max}$) e uma tensão de compressão mínima ($\sigma_{\min}$), ambas de igual magnitude. O segundo tipo de tensão está ilustrado na Figura 18, o ciclo de tensões repetidas, onde, diferentemente do primeiro ciclo ilustrado, os valores máximos e mínimos são assimétricos em relação ao nível zero de tensões. E o último, na Figura 19, está representado um ciclo de tensão onde o nível de tensão varia aleatoriamente em amplitude e frequência (CALLISTER JR, 2002).

Figura 17 – Ciclo de tensões alternadas.



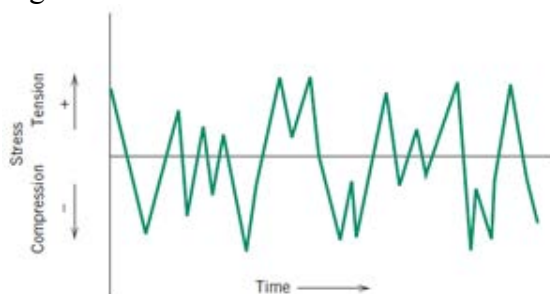
Fonte: Callister (2012).

Figura 18 – Ciclo de tensões repetidas.



Fonte: Callister (2012).

Figura 19 – Ciclo de tensões aleatórias.



Fonte: Callister (2012).

Para a determinação dos parâmetros de caracterização dos ciclos de tensão oscilante utiliza-se:

- Tensão média (σ_m):

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (5)$$

- Intervalo de tensões (σ_r):

$$\sigma_r = \sigma_{max} - \sigma_{min} \quad (6)$$

- Amplitude da tensão (σ_a):

$$\sigma_a = \frac{\sigma_r}{2} = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (7)$$

- Razão de tensões (R):

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \quad (8)$$

As propriedades mecânicas podem ser obtidas através de ensaios de simulação, utilizando equipamentos capazes de simular as condições em que o material estará exposto. Esse equipamento deve reproduzir, da forma mais fiel possível, as condições de serviço às quais o corpo de prova será submetido, tais como magnitude de tensão, periodicidade, tempo de aplicação, frequência, tipo de carregamento, etc (CALLISTER JR, 2002).

Após a realização do ensaio, é possível construir a curva S-N submetendo-se um corpo-de-prova ao ciclo de tensões, mediante influência de uma amplitude de tensão, da ordem de aproximadamente dois terços do limite de resistência à tração estática, onde o número de ciclos antes da falha é observado. Esse procedimento é repetido para outros corpos-de-prova, utilizando-se amplitudes de tensão gradativamente menores. Os resultados são dispostos em um gráfico de tensão S em função do logaritmo do número de ciclos N até a ruptura do corpo de prova por fadiga (CALLISTER JR, 2002).

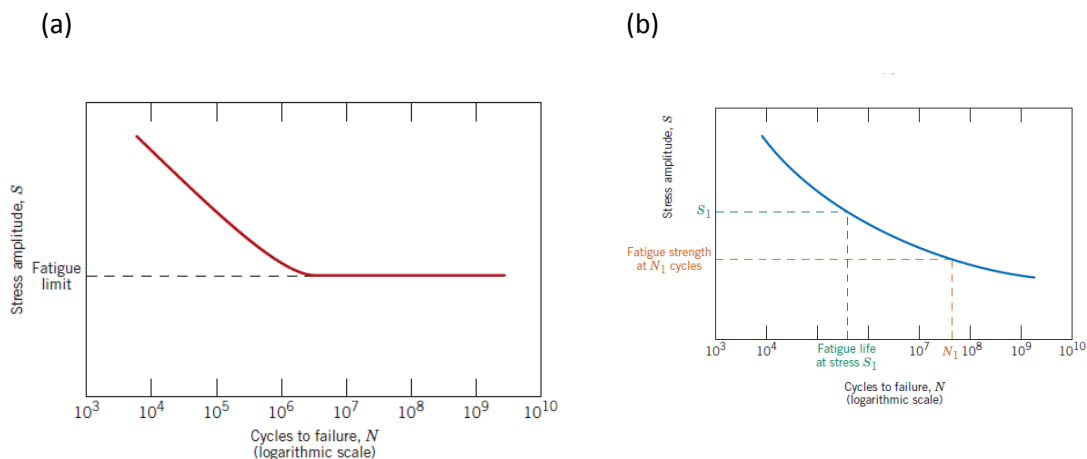
Na Figura 20 têm-se dois tipos distintos de curvas S-N. Os gráficos mostram que quanto maior o valor da tensão, menor será o número de ciclos que o material será capaz de suportar antes de romper. Algumas ligas ferrosas (à base de ferro) e titânio possuem curva característica S-N similares à da Figura 20a, onde, para elevados valores de N a curva torna-se

horizontal, ou existe um nível de tensão limite chamado de limite de resistência à fadiga ou limite de durabilidade, que corresponde a uma tensão (flutuação - variação) abaixo da qual o aço suporta um número de ciclos infinito sem romper (CALLISTER JR, 2002).

A Figura 20b ilustra a curva S-N para a maioria das ligas não ferrosas, onde não há um limite de resistência à fadiga, fazendo com que a curva continue sua tendência decrescente para maiores valores de N , fazendo com que o aparecimento da fadiga ocorra independentemente do valor da tensão. Nestes materiais, a resistência à fadiga é definida como sendo o nível de tensão no qual a falha irá ocorrer para um número específico de ciclos.

A Figura 20b mostra outra característica importante sobre o comportamento em fadiga do material, que é a vida em fadiga (N_f). Ela determina o número de ciclos que serão precisos para que certa tensão possa gerar uma falha (CALLISTER JR, 2002).

Figura 20 – Amplitude da tensão (S) em função do logaritmo de ciclos até a falha por fadiga (N) para (a) um material que exibe um limite de resistência à fadiga e (b) material que não exibe um limite de resistência à fadiga.



Fonte: Callister (2012).

2.4.2.7. Transição Dúctil – Frágil

Para a análise dessa propriedade o ensaio mais adequado é o de impacto. Ele relata a quantidade de energia absorvida pelo material. A transição dúctil – frágil é dependente da temperatura do material. Sob elevadas temperaturas o material absorve mais energia, e quando se encontra em situação de menores temperaturas ele absorve menos energia (CALLISTER JR, 2002).

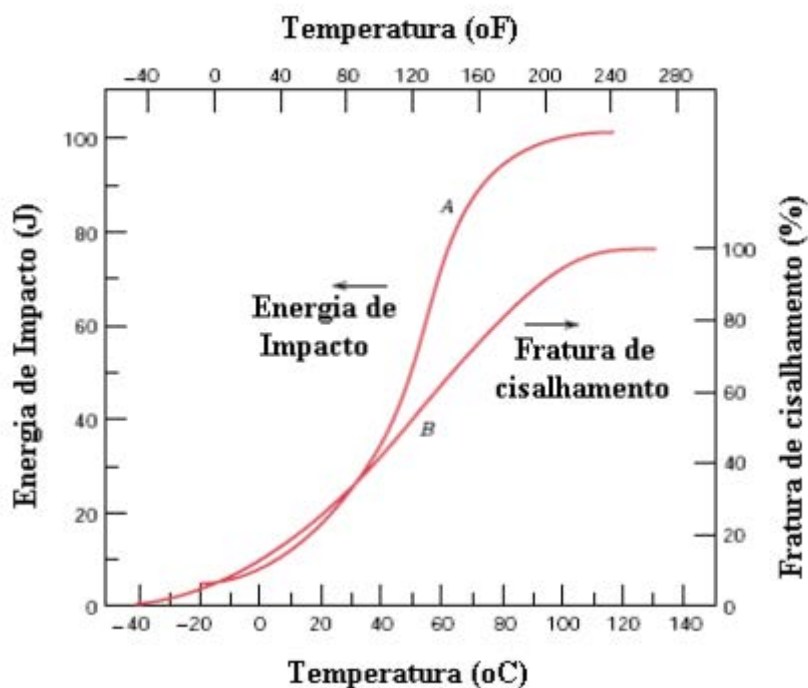
Para vários tipos de liga a transição dúctil - frágil ocorre em uma faixa de temperatura, não sendo possível identificar exatamente a temperatura onde a transferência ocorre. Como

não foi determinado nenhum critério para estabelecer a temperatura de transição, geralmente é utilizado certo valor para a energia absorvida pelo impacto (CALLISTER JR, 2002).

Existem ligas metálicas que não apresentam essa transição, as que possuem estrutura cristalina CFC até em baixas temperaturas se mantêm dúcteis. Já as ligas que possuem estruturas cristalinas CCC e HC, a sua temperatura de transição é sensível tanto para a microestrutura quanto para composição (CALLISTER JR, 2002).

Uma curva de transição do material pode ser determinada através do ensaio de impacto, permitindo observar a temperatura mínima onde o material pode ser utilizado sem que ocorra falha, além de analisar a adequação ou não do material ao projeto desenvolvido. A Figura 21 mostra a curva de transição através da energia de impacto e a porcentagem de fratura do aço A283 (CALLISTER JR, 2002).

Figura 21 - Gráfico de transição dúctil – frágil.



Fonte: Callister (2002).

Na evolução de um projeto aplicam-se temperaturas que não ultrapassem a transição dúctil-frágil do material. Um exemplo de acidente catastrófico devido à irrelevância dada à temperatura foi o naufrágio do navio Titanic, onde quando se encontrava à temperatura ambiente possuía todas as resistências adequadas, mas ao deparar-se com águas de menores

temperaturas alterou sua resistência de dúctil para frágil e não resistiu ao impacto sofrido contra um iceberg e fraturou. A Figura 22 noticia o desastre do Titanic (CALLISTER JR, 2002).

Figura 22- Notícia do acidente do Titanic.



Fonte: Dirami (2012).

2.5 DUREZA VICKERS

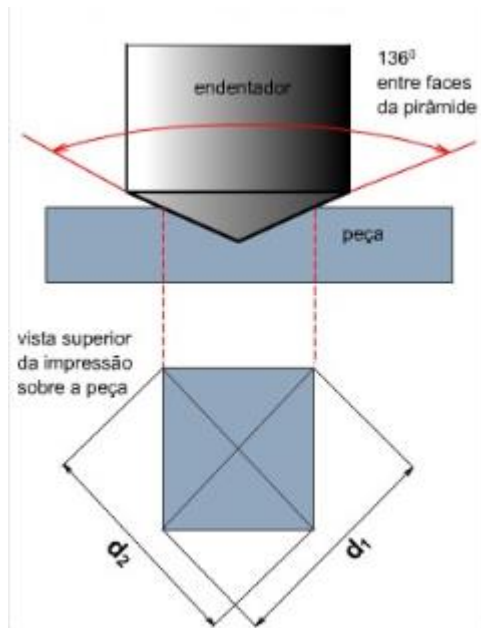
Para estudar o ensaio de microdureza Vickers, que foi utilizado neste trabalho, é necessário conhecer o ensaio de dureza Vickers convencional, pois estes são realizados de forma similar.

2.5.1 Ensaio de Dureza Vickers convencional

Segundo SOUZA, essa dureza foi desenvolvida em 1925 por Smith e Sandland, e o seu nome é atribuído à empresa que mais fabricou máquinas para realização do ensaio (Companhia Vickers-Armstrong Ltda).

Para realização deste ensaio, utiliza-se um penetrador em forma de pirâmide com base quadrada feito com diamante, com um ângulo de 136° entre as faces opostas, conforme mostra a Figura 23.

Figura 23 – Esquema de impressão do endentador Vickers.



Fonte: Portal CIMM.

Como o diamante é um material de altíssima dureza, o penetrador é quase indeformável e como todas as impressões são semelhantes entre si, a dureza Vickers independe da carga (que pode variar de 1 até 120 kgf), logo apresenta um número de dureza igual para qualquer material homogêneo. Porém a mudança de carga algumas vezes é necessária para se obter uma impressão regular, sem deformação e com o tamanho compatível para a medida de suas dimensões que são apresentadas no visor da máquina (SOUZA, 1984).

A seguinte expressão demonstra a relação existente para a obtenção do valor de dureza Vickers, que pode ser expressa em N/mm² ou kgf/mm².

$$HV = \frac{\text{carga}}{\text{área da superfície piramidal}} = \frac{2Q \operatorname{sen} \frac{136}{2}}{L^2} \quad (9)$$

$$HV = \frac{1,8544Q}{L^2} \quad (10)$$

Com relação ao procedimento, a carga é aplicada levemente na superfície do material, e deve ser mantido por alguns segundos (cerca de 20 segundos), após isso o penetrador é retirado e o microscópio é movido manualmente até encontrar a impressão, então se dá a

medição da área, que deve ser medida com precisão, para isso utiliza-se microscópio acoplado a máquina que realiza o ensaio, facilitando a medição das diagonais do quadrado que está impresso no material (SOUZA, 1984).

Para SOUZA, as principais vantagens do método Vickers são:

- Escala Contínua;
- Impressões extremamente pequenas que não inutilizam a peça;
- Grande precisão de medida;
- Deformação nula do penetrador;
- Existência de apenas uma escala de dureza;
- Aplicação para toda gama de durezas encontradas nos diversos materiais;
- Aplicação em qualquer espessura de material, podendo portanto medir também durezas superficiais.

Em contrapartida o ensaio é mais demorado e exige uma preparação cautelosa do material a ser ensaiado, de forma que torne nítida a impressão. Por esse motivo, este tipo de ensaio é mais utilizado para pesquisas e estudos que exigem uma maior precisão de resultados (SOUZA, 1984).

2.5.2. Ensaio de Microdureza Vickers

Como o próprio nome já diz, este ensaio é realizado em uma escala microscópica. Esta é a maior diferença entre os dois tipos de ensaio citados, a escala em que são realizados. Como consequência desta escala, a carga empregada, de forma similar, também é menor. Neste caso, a carga varia entre 1 e 10 kgf (SOUZA, 1984).

Este procedimento é utilizado quando se necessita uma grande precisão nos resultados, como na determinação de dureza de constituintes individuais de uma microestrutura, de materiais frágeis, peças pequenínissimas ou extremamente finas entre outras aplicações (SOUZA, 1984).

A preparação do corpo de prova também deve ser particularmente diferente, para o ensaio de microdureza a preparação metalográfica deve ser muito criteriosa, e seguir os procedimentos citados no item 3.3 deste trabalho (SOUZA, 1984).

2.6 ENSAIO DE TRAÇÃO

Para SOUZA a facilidade de execução e a reprodutividade dos resultados fazem com que o ensaio de tração seja um dos ensaios mecânicos mais importantes.

O ensaio de tração é realizado com o objetivo de oferecer informações a um determinado projeto para análise das mais variadas propriedades mecânicas. Durante a execução do ensaio uma é aplicada uma força uniaxial crescente e contínua na extensão do material, de forma simultânea nota-se o alongamento do corpo de prova, assim o corpo de prova irá deforma-se gradativamente até a ocorrência da ruptura (CALLISTER JR, 2002).

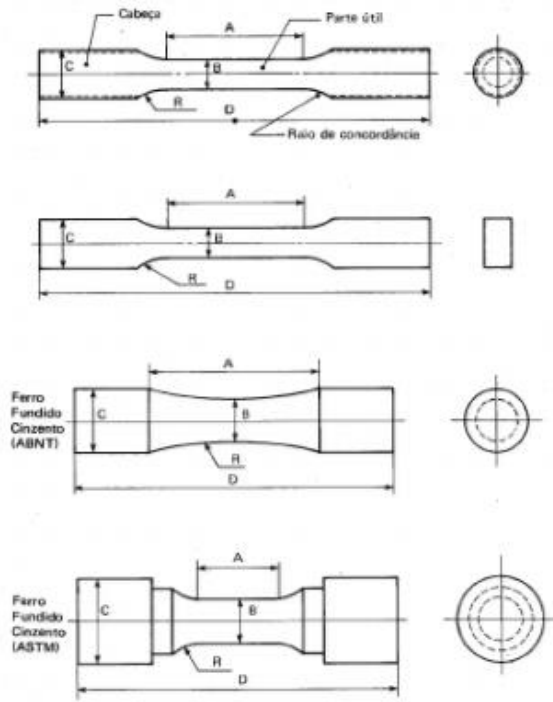
Através desse método pode-se concluir que as deformações resultantes das cargas aplicadas são distribuídas de maneira uniforme em sua extensão, até que se atinja uma carga máxima próxima ao término do ensaio e devido à possibilidade de se aplicar a carga a uma baixa velocidade em todo o ensaio, este experimento proporciona medir com segurança a resistência do material (CALLISTER JR, 2002).

No momento em que se atinge a máxima carga a uniformidade se finda e ocorre uma diminuição da secção, fenômeno denominado estrição. Com exceção de casos onde existe um defeito interno no material, a ruptura sempre acontece na região mais estreita do corpo de prova.

A confiabilidade dos resultados do ensaio de tração é dependente da precisão dos aparelhos de medida disponíveis. A exatidão na avaliação da tensão é maior quando se trabalha com pequenas deformações, grandes variações de deformação causam uma maior imprecisão na análise da tensão. Os erros podem ser oriundos desde o início do teste, quando não se alinha o corpo de prova adequadamente os esforços não serão simétricos e causaram um equívoco relacionado às deformações para a mesma carga aplicada. O material deve ser fixado de forma que a carga seja aplicada na direção do seu eixo longitudinal (CALLISTER JR, 2002).

A deformação é concentrada na região central do corpo de prova. As geometrias do corpo de prova utilizado geralmente são circulares ou retangulares, a Figura 24 representa a geometria de um corpo de prova circular, as medidas são definidas pela norma ASTM E 8M.

Figura 24 – Corpos de Prova para ensaio de Tração.



Fonte: Souza (1984).

O equipamento para a realização do ensaio de tração deforma o corpo de prova constantemente e concomitantemente mede a carga instantânea aplicada. Através de um software e dos dados obtidos o gráfico tensão-deformação é plotado para posterior estudo das propriedades mecânicas obtida. O material a ser analisado é fixado nas garras do equipamento e a fim de medir o seu eventual alongamento anterior a fratura é acoplado a um extensômetro. Nas situações onde não há um extensômetro a medição pode ser realizada através de um paquímetro, faz-se a diferença entre o tamanho do corpo de prova anterior a ruptura e depois do ensaio, sendo essa medida o alongamento observado no material (CALLISTER JR, 2002).

2.7 ENSAIO DE FADIGA

De acordo com a *American Society for Testing and Materials* fadiga é um processo onde há alteração estrutural permanente, progressivo e localizado, ocorrendo em materiais que estão expostos a tensões e deformações cíclicas em um ou mais pontos, decorrendo na formação de trincas ou fraturas completas quando é atingido o número suficiente de ciclos para tal.

O processo é dito progressivo já que verifica durante um certo intervalo de tempo o uso do material (no que se refere a fraturas que ocorrem bruscamente) e localizado, pois se inicia em pequenas áreas do componente, onde já existem deformações e tensões elevadas, tensões residuais, variações na geometria e imperfeições do material (Lage et al., 2008).

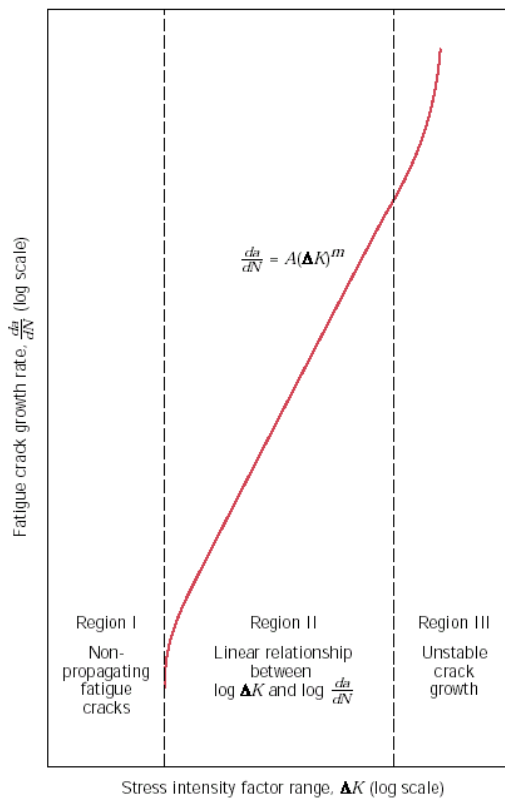
Os fenômenos de fadiga alcançaram um patamar de importância muito grande com o avanço de novas tecnologias que tornaram imprescindíveis esses tipos de ensaios em equipamentos como aviões, carros, compressores, turbinas, bombas e etc. Em termos de números, acredita-se que 90% das falhas em serviço de materiais metálicos se dão por fadiga. . (DIETER, 1976).

A real preocupação com tais fenômenos teve início com o desenvolvimento das máquinas a vapor e transportes mecânicos, já que esses equipamentos estavam sujeitas a carregamentos repetitivos e essas falhas começaram a se tornar frequentes, ocorrendo em baixas tensões nominais e com a carga variando de forma inesperada, resultando em diferentes seções na peça (DIETER, 1976).

O início da fratura por fadiga pode ser caracterizado com o surgimento de uma pequena trinca, que se expande de acordo com aplicações de tensão. Durante o crescimento dessa trinca tem-se uma diminuição na seção transversal da peça, com um consequente aumento de tensão na seção. Quando é atingido o ponto em que essa seção não é capaz de suportar a carga, dá-se a ruptura. (BARBOSA, 2014)

Pode-se dividir o fenômeno de fadiga em três etapas que estão graficamente ilustradas na Figura 25. O primeiro deles é a iniciação da trinca, composta pela nucleação e crescimento microscópico da trinca, o segundo é a propagação da trinca, onde temos o crescimento macroscópico da trinca, e por último tem-se a terceira fase, onde o crescimento da trinca aumenta rapidamente e há a ruptura do material. (BARBOSA, 2014)

Figura 25 – Ilustração gráfica das regiões de fadiga.



Fonte: Valdir (2017).

As falhas por fadiga apresentam algumas características muito peculiares. Nesse fenômeno o aspecto macroscópico geralmente é de fratura frágil, o processo de fratura deixa algumas marcas características na superfície e a fratura final pode ter aspecto dúctil ou frágil. Algumas dessas marcas características estão ilustradas nas Figuras 26 e 27.

Figura 26 – “Marcas de Praia”



Fonte: Valdir (2017).

Figura 27 – “Marcas de Catraca”



Fonte: Valdir (2017).

Na grande maioria das vezes a vida de uma peça que esta sujeita à fadiga pode ser quantificada pelo numero de ciclos de aplicação da carga que ele suporta até se romper (BRANCO, 1986).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

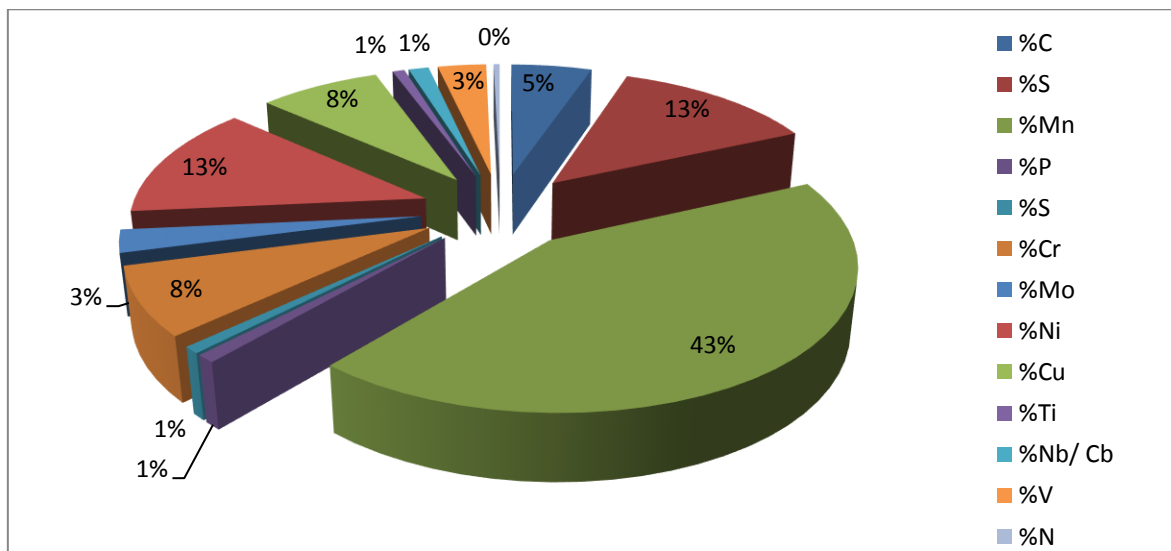
O material utilizado como ferramenta de estudo foi o aço LHR355, o qual foi fornecido pela empresa Liebherr S.A., fabricante de estruturas *offshore* para o setor de petróleo e gás. Sua composição química esta ilustrada na Tabela 3 e a porcentagem de cada elemento na Figura 28.

Tabela 3 – Composição Química do Aço LHR355.

	C%	Si%	Mn%	P%	S%	Cr%	Mo%
Max.	0,2	0,5	1,65	0,035	0,03	0,3	0,1
	Ni%	Cu%	Al%	Ti%	Nb/Cb%	V%	N%
Max.	0,5	0,3	-	0,03	0,05	0,12	0,15

Fonte: Autor.

Figura 28 – Porcentagem de cada elemento na estrutura do Aço LHR355.



Fonte: Autor.

A Figura 29 apresenta o fluxograma das etapas realizadas durante o desenvolvimento do trabalho.

Figura 29 – Fluxograma das principais etapas realizadas na análise do aço.



Fonte: Autor.

3.1 Operação de corte por serra hidráulica e de fita.

A primeira etapa do processo foi a realização do corte do tubo utilizando uma serra transversal como mostra a Figura 30, cujos parâmetros foram determinados com base nas recomendações do fabricante apresentados na Figura 31.

Figura 30 – Serra transversal.



Fonte: Autor.

Figura 31 – Especificações da Serra.

USAR ÓCULOS E OUVIDOS	10%	
AÇO 1045	25% 40%	
AÇO 1020	40% 60%	
FERRO FUNDIDO	14% 30%	
BRONZE E COBRE	40% 50%-60%	
ALUMÍNIO	50%-65%	
MATERIAIS ESTRUTURAIS	55%-85%	
PLÁSTICOS	70%-100%	

USE O POTENCIÔMETRO PARA AJUSTAR AS VELOCIDADES NO VISOR DO PAINEL DIGITAL - O visor deve estar exibindo % em seu canto direito.

A dureza dos materiais pode variar, regule a rotação do motor e a direção da lâmina móvel para o câmbio ser suavemente. Não force os dentes da serra e não serra com rotação muito alta, isto causará desgaste prematuro na fita serra.

ASSIM QUE A FITA DA SERRA COMEÇAR APRESENTAR DESVIO DE CORTE SUBSTITUA POR UMA FITA SERRA NOVA.

ATENÇÃO: UTILIZAR FITA DESGASTADA DESALINHADO O CORTE PODE DESALINHAR OS CABEÇOTES ALINHADORES DA MÁQUINA.

PARA TODOS OS MATERIAIS USE LÍQUIDO REFRIGERANTE.

MEDIDAS DA FITA SERRA
2.780 MM DE COMPRIMENTO X 27MM DE LARGURA

A DENTIDAÇÃO DA FITA SERRA E SUA DUREZA DEVERÃO SER ADEQUADOS AO MATERIAL A SER SERRADO.

LEIA A DOCUMENTAÇÃO ENVIADA COM A MÁQUINA ANTES DE OPERAR O EQUIPAMENTO.

Fonte: Autor.

Após a usinagem do tubo em duas partes, foi utilizada a serra vertical para confecção de um corpo de prova de dimensões 45x15x10mm como mostra a Figura 32, que resultaria no corpo de prova para análise metalográfica.

Figura 32 – Corpo de prova para análise metalográfica.



Fonte: Autor.

3.2 PREPARAÇÃO METALGRÁFICA

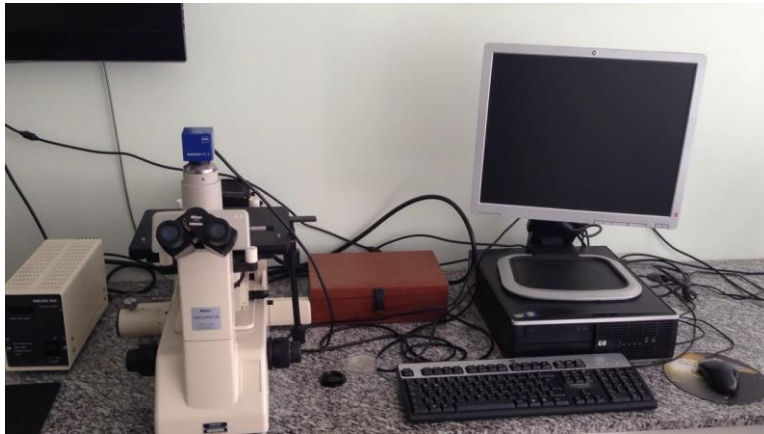
Na etapa de preparação metalográfica, foi realizado um acabamento superficial na amostra, utilizando-se lixas de granulometria decrescente de #100 até #1200. Em seguida, foi realizado o polimento com alumina 1 μ m, 2 μ m e 3 μ m de tal maneira a aprimorar a superfície da amostra.

3.3 ANÁLISES MACRO/MICROSCÓPICA.

Após o processo de preparação da amostra, foram realizadas as análises macroscópicas da peça, sem ataque químico, com o objetivo de verificar a presença de inclusões não metálicas, particularmente localizadas na região central, visando determinar se ocorreu segregação de elementos de liga naquela região, proveniente do processo de fabricação anterior. Após essa análise, foi realizado ataque químico com Nital 3% (3% de ácido nítrico +

97% de álcool etílico) por aproximadamente dez segundos, visando revelar os contornos dos grãos durante o processo de análise microscópica. As imagens foram capturadas no microscópio óptico modelo EIPHOT 200 (Figura 33), disponível no Departamento de Materiais e Tecnologia.

Figura 33 – Microscópio EIPHOT 200.



Fonte: Autor.

3.4 ENSAIO DE MICRODUREZA VICKERS

O ensaio de Microdureza Vickers foi realizado com o microdurâmetro MICROMET 2004 da BÜEHLER como mostra a Figura 34, disponível no laboratório de microdureza do Departamento de Materiais e Tecnologia da UNESP do campus de Guaratinguetá (DMT/UNESP).

Figura 34 - Microdurâmetro BUEHLER.



Fonte: Autor.

3.5 USINAGEM DOS CORPOS DE PROVA DE TRAÇÃO/FADIGA AXIAL.

Para os ensaios de Fadiga foram confeccionados dez corpos de prova do material-base, de acordo com a norma ASTM E466 (Figura 35). Os corpos de prova foram confeccionados no equipamento de eletro erosão a fio ($\varnothing 0,18\text{mm}$), da marca AgieCharmilles, modelo FW 2U, como mostra a Figura 36.

Figura 35 - Corpos de Prova para ensaio de Fadiga.



Fonte: Autor.

Figura 36 - Processo de corte por eletroerosão a fio.



Fonte: Autor.

O mesmo procedimento foi realizado para a confecção dos corpos de prova para o ensaio de tração, respeitando a norma ASTM E 8M, como ilustrado na Figura 37.

Figura 37 – Corpo de prova para ensaio de Tração.



Fonte: Autor.

3.6 ENSAIO DE TRAÇÃO

O ensaio de tração foi realizado segundo a norma ASTM E 8M, a uma velocidade de $1,5 \text{ mm.min}^{-1}$ com célula de carga de 100kN. Para isso utilizou-se um equipamento SHIMADZU (Figura 38) do Laboratório de Propriedades Mecânicas do DMT/FEG/UNESP.

Figura 38 - Equipamento SHIMADZU.

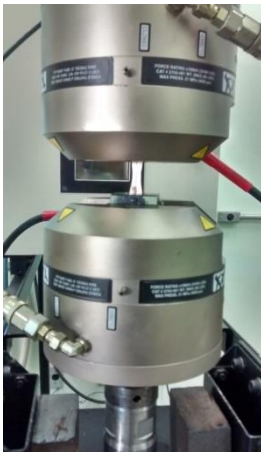


Fonte: Autor.

3.7 ENSAIO DE FADIGA

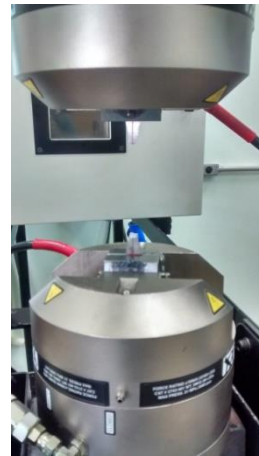
Os ensaios de Fadiga foram realizados no Departamento de Materiais e Tecnologia com a utilização da máquina servo hidráulica INSTRON 8801 de 100kN de capacidade ilustrada nas Figuras 39 e 40. A primeira com o corpo de prova antes da ruptura e a segunda com o corpo de prova após a ruptura.

Figura 39 – Antes da ruptura.



Fonte: Autor.

Figura 40 – Depois da ruptura.



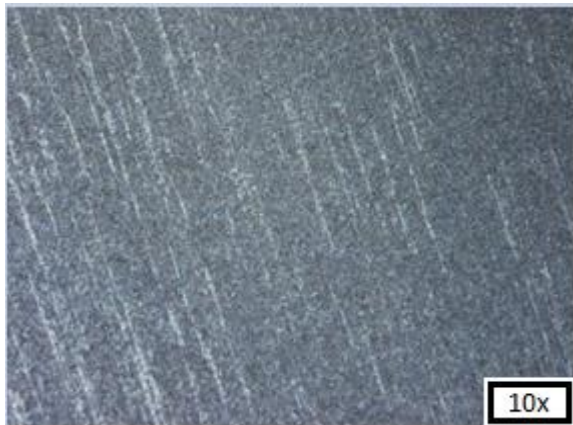
Fonte: Autor.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ANÁLISE METALOGRAFICA

Em um primeiro momento foram obtidas imagens macroscópicas do corpo de prova após polimento com lixas de granulometria decrescente de #100 até #1200 e polimento com alumina 1 μ m, 2 μ m e 3 μ m, sem ataque químico, de tal forma a obter a caracterização de possíveis inclusões presentes. Foram capturadas imagens do material-base (Figura 41), da fronteira entre o material-base e a junta soldada (Figura 42) e da junta soldada (Figura 43).

Figura 41 – Material-base.



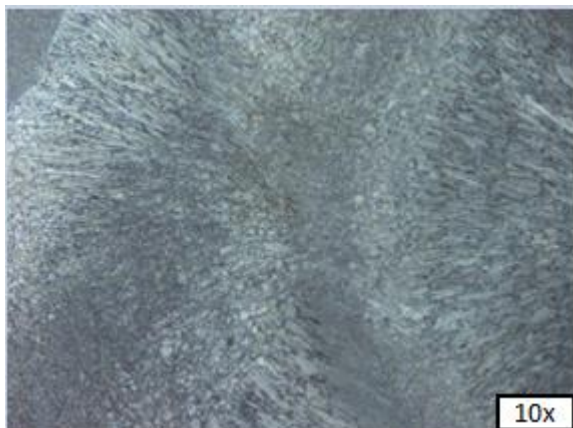
Fonte: Autor.

Figura 42 - Transição MB e junta soldada.



Fonte: Autor.

Figura 43 – Junta Soldada.



Fonte: Autor.

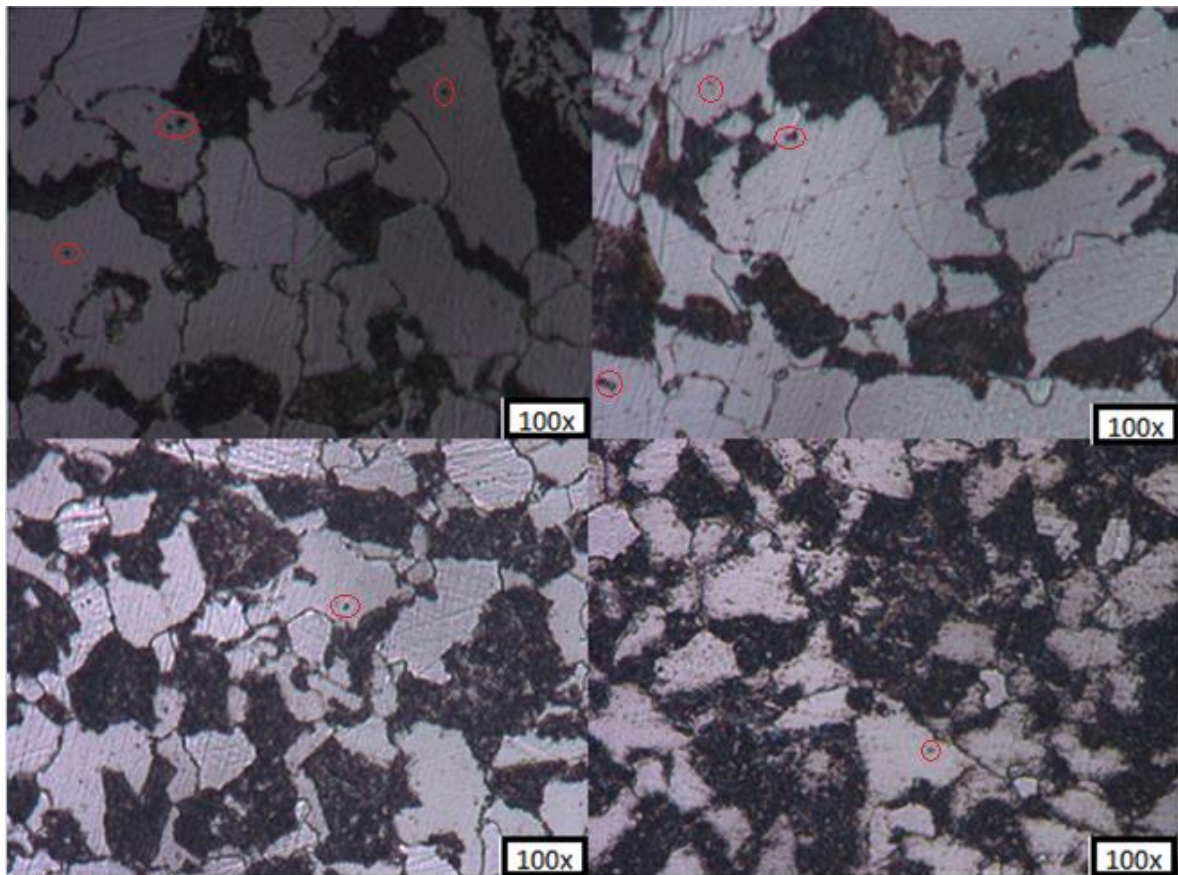
Observa-se na Figura 41 a textura bandeada resultante do processo de laminação do material-base. A Figura 42 apresenta as regiões de transição do material-base, da ZAC e do

MS. A Figura 43 apresenta detalhes do MS, na qual se pode observar os grãos colunares nos vários passes de solda aplicados.

O segundo passo foi a obtenção das imagens microscópicas, que foram capturadas após o ataque químico com Nital 3%, o qual tem a finalidade de revelar os contornos de grão e as fases presentes. Novamente foram obtidas imagens isoladas do material-base e da junta soldada.

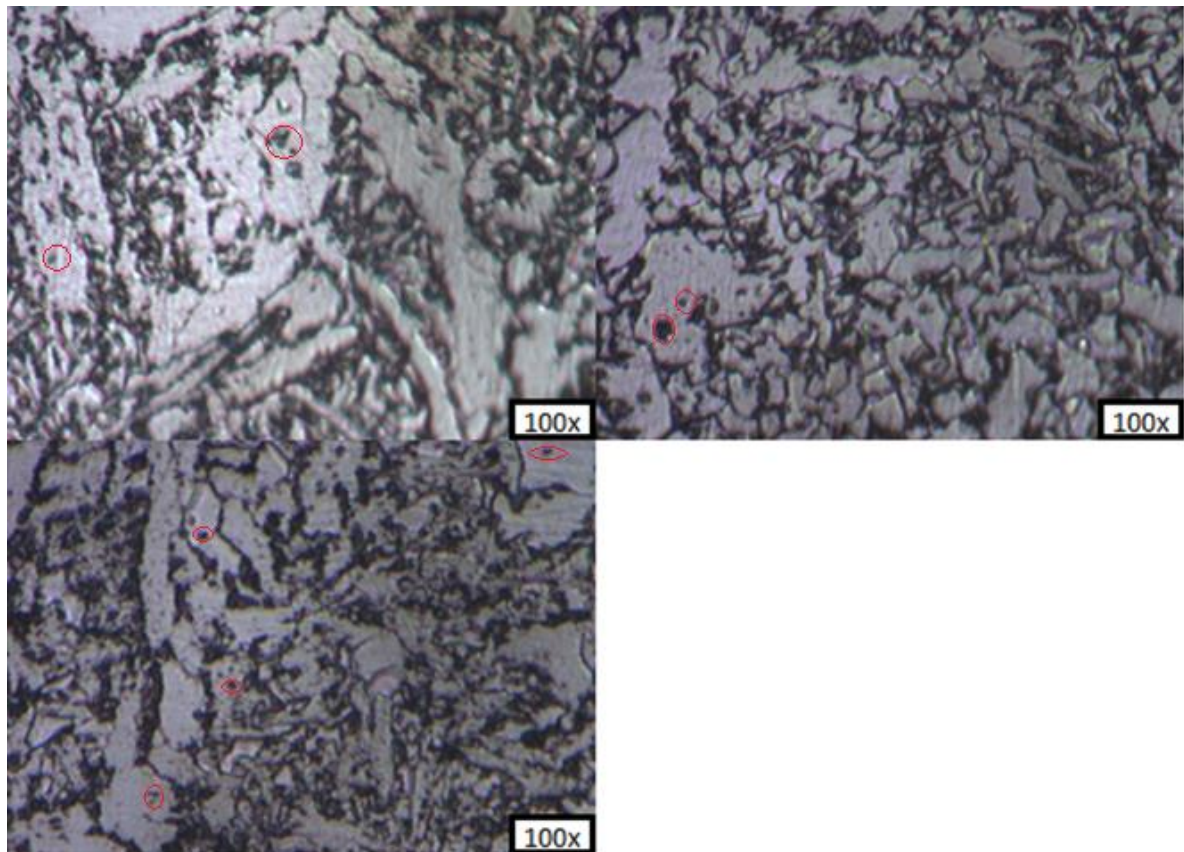
As Figuras 44 e 45 são referentes ao material-base e o metal de solda, respectivamente. Analisando a Figura 44 pode-se perceber a presença de ferrita (parte clara) e perlita (parte escura), tanto quanto a presença de inclusões (identificadas por círculos em vermelho).

Figura 44 – Micrografia do Metal Base.



Fonte: Autor.

Figura 45 – Micrografia da Junta Soldada



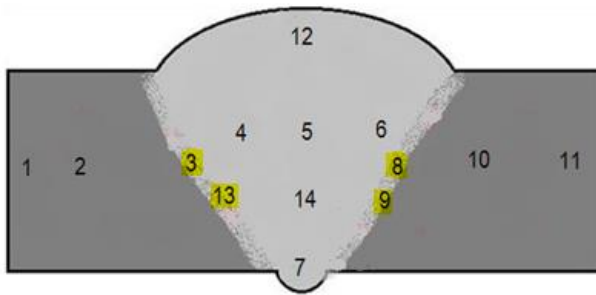
Fonte: Autor.

Após a análise das Figuras 44 e 45 é possível observar diferenças entre as duas seções, com consequentes características mecânicas distintas. Observa-se que o metal de solda apresenta grãos muito menores que o material-base e de morfologia heterogênea. Tais características indicam que o metal de solda possui propriedades mecânicas distintas e superiores ao do material-base. A morfologia apresentada revela o processo e a velocidade de resfriamento do metal de solda, caracterizada por grãos heterogêneos e colunares.

4.2 ENSAIO DE MICRODUREZA VICKERS.

A Figura 46 representa uma ilustração da junta de solda no material-base cortada em perfil, os pontos marcados indicam os locais onde foram realizados testes de microdureza Vickers. O valor da dureza com a Pirâmide de Diamante de Vickers é a carga aplicada (em kgf) dividida pela área da superfície da endentação (em mm^2) como ilustrada na Figura 47. Seus valores estão apresentados na Tabela 4.

Figura 46 – Esquema do CDP e locais de ensaio Figura 47 – Microdureza Vickers.
de microdureza Vickers.



Fonte: Autor.



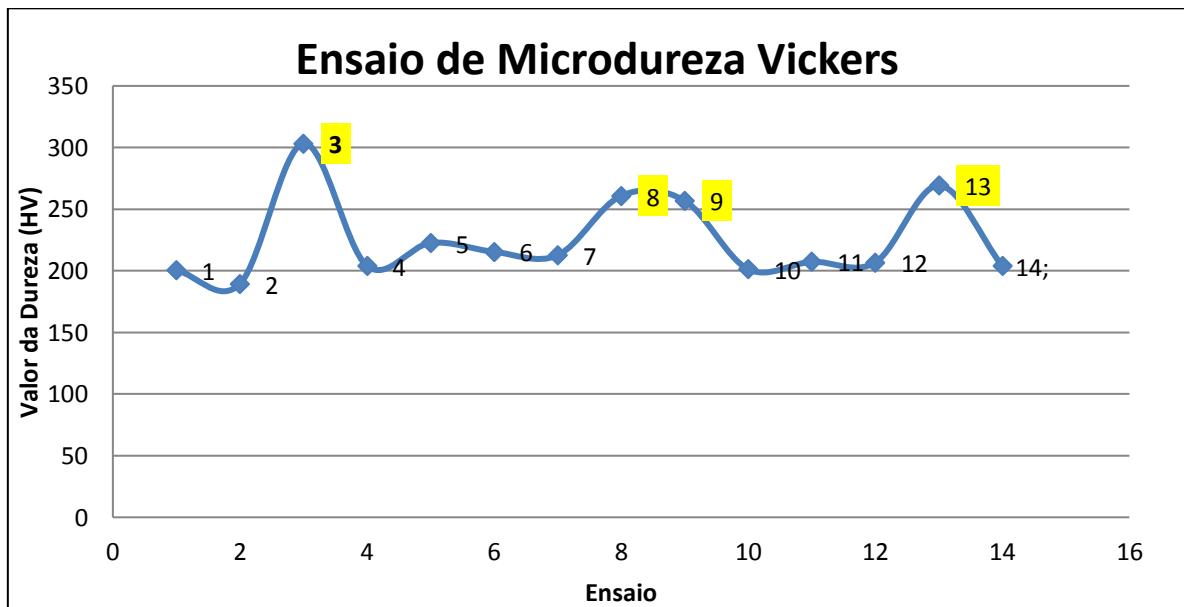
Fonte: Autor.

Tabela 4 – Valores obtidos após ensaio de Microdureza Vickers.

Ensaio	1	2	3	4	5	6	7
(Vickers)	200,4	189,4	303,3	204	222,6	215,4	212,6
Ensaio	8	9	10	11	12	13	14
(Vickers)	260,8	256,8	201,3	207,3	206,8	269,2	203,8

Fonte: Autor.

Figura 48 – Valores obtidos através do ensaio de Microdureza Vickers.



Fonte: Autor.

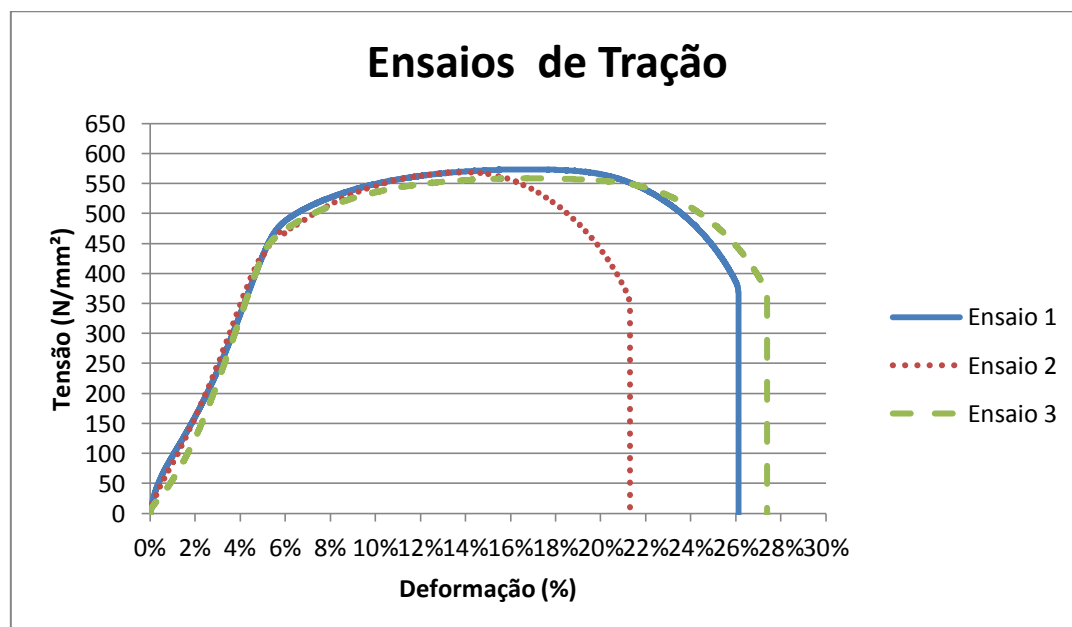
Analisando os valores da Tabela 4, pode-se observar alguns valores significativos, como o valor de 303,3 HV (ponto 3) que provavelmente corresponde à Região de Grãos Finos

(RGF) da Zona Afetada pelo Calor (ZAC), assim como os valores de 260 HV (ponto 8), 256,8 HV (ponto 9) e 269,2 HV (ponto 13) que provavelmente caracterizam a Região de Grãos Grosseiros (RGG) da ZAC, geradas em razão do gradiente de calor do cordão de solda (heterogeneidade microestrutural e de propriedades mecânicas). Com relação aos valores de Microdureza Vickers no metal de solda, observa-se pequenas variações entre os pontos 4, 5, 6 e 14, e menores que os encontrados na ZAC em razão da menor velocidade de resfriamento do metal fundido no núcleo da solda. O ponto 12, do reforço, embora próximo à superfície, apresenta valor relativamente baixo de microdureza em razão do grande volume de material e consequente menor velocidade de resfriamento também. O ponto 7, localizado na raiz do cordão, apresenta valor baixo de microdureza, o que se deve ao revenimento imposto pelos passes subsequentes de solda. Os pontos 1,2, 10 e 11, correspondentes ao material-base, apresentam valores de microdureza tipicamente em torno de 200 HV.

4.3 ENSAIO DE TRAÇÃO

Foram utilizados três corpos de provas e através do ensaio foi obtido o gráfico tensão-deformação para todos os corpos de prova. A Figura 49 apresenta as curvas dos ensaios de tração realizados, nos quais claramente se observa a tensão máxima, a tensão de escoamento, a tensão de ruptura e o alongamento de cada corpo de prova ensaiado.

Figura 49 – Tensão-Deformação para três corpos de prova do aço LHR355.



Fonte: Autor.

Os ensaios foram realizados em conformidade com as especificações da norma ASTM E 8M.

Tabela 5 – Valores obtidos após a realização do Ensaio de Tração.

CDP	Máxima Tensão (N/mm ²)	Tensão de Escoamento (N/mm ²)	Tensão de Ruptura (N/mm ²)	Módulo de Elasticidade (N/mm ²)	Alongamento
1	573,39	473,25	370,45	27214	26,1%
2	566,85	449,50	349,04	25509,9	21,3%
3	561,28	428,75	364,67	26641,8	27,7%
Média	567,18	450,50	361,39	26455,23	25%
Desvio Padrão	±6,06	±22,27	±11,08	±867,23	±3%

Fonte: Autor.

Após a realização do ensaio foi possível extrair algumas conclusões tomando como base a Figura 49 e os valores da Tabela 5. Nota-se que as tensões de escoamentos e máximas estão muito próximas e que a variação ocorreu no alongamento dos corpos de prova.

4.4 ENSAIO DE FADIGA.

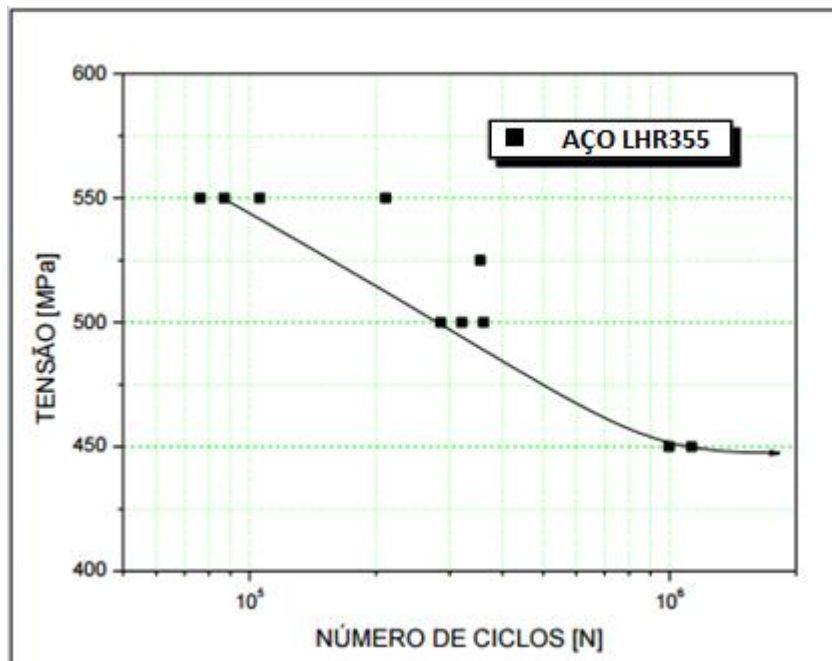
Na Tabela 6 estão os valores obtidos após o ensaio de fadiga axial do aço LHR355 utilizando dez corpos de prova. Além do número total de ciclos, também estão presentes os valores da tensão aplicada, espessura, comprimento, área, razão e as amplitudes máximas e mínimas.

Tabela 6 – Valores obtidos no ensaio de fadiga axial do aço LHR355.

FADIGA AXIAL - AÇO LHR355 OFFSHORE PLANO - 20Hz										
cdp's	σ (MPa)	w(mm)	b(mm)	Área	R	Smáx(KN)	Smin(KN)	A(KN)	Sméd(KN)	Nº ciclos total
1	550	8,90	3,05	27,15	0,1	14,930	1,493	6,718	8,211	210.891,80
2	550	8,95	3,10	27,75	0,1	15,260	1,526	6,867	8,393	76.425,30
3	550	8,95	3,05	27,30	0,1	15,014	1,501	6,756	8,257	87.102,30
4	550	8,90	3,05	27,15	0,1	14,930	1,493	6,718	8,211	105.736,80
5	525	8,90	3,00	26,70	0,1	14,018	1,402	6,308	7,710	354.399,50
6	500	8,95	3,10	27,75	0,1	13,873	1,387	6,243	7,630	285.038,30
7	500	8,90	3,10	27,59	0,1	13,795	1,380	6,208	7,587	361.121,80
8	500	9,00	3,05	27,45	0,1	13,725	1,373	6,176	7,549	320.488,50
9	450	8,85	3,05	26,99	0,1	12,147	1,215	5,466	6,681	1.000.000,00
10	450	8,90	3,05	27,15	0,1	12,215	1,222	5,497	6,718	1.000.000,00

Fonte: Autor.

Figura 50 – Ensaio de Fadiga axial do aço LHR355.



Fonte: Autor.

A Figura 50 apresenta os resultados dos ensaios de fadiga axial do aço LHR355. Observa-se que os resultados apresentaram pouca dispersão nas tensões de 550 MPa, 500 MPa e 450 MPa - este correspondendo ao cotovelo da curva, próximo ao patamar ou limite de resistência à fadiga ($>10^7$ ciclos). Observam-se, também, dois resultados conservadores de vida em fadiga: de 221 mil ciclos a 550 MPa, e de 300 mil ciclos a 525 MPa. Analisando os valores de tensão de escoamento do aço LHR355 apresentados na Tabela 5, em torno de 450 MPa, e a os resultados apresentados na Curva SN (Figura 50), destaca-se o excelente

comportamento em fadiga do material, o qual apresenta patamar de resistência (vida infinita) também em torno de 450 MPa, i.e., a relação $L.E/L.R.F=100\%$.

5 CONCLUSÃO

Esse Trabalho de Conclusão de Curso se mostrou fundamental para a análise dos esforços em que o braço de guindastes *Offshore* está submetido, com ênfase aos esforços cíclicos que comumente não são considerados na análise da integridade destes equipamentos (guindastes), sendo que essas estruturas apresentam uma enorme importância para o transporte de cargas e de pessoas nas plataformas, sendo fundamental para o seguimento. Tais esforços cíclicos são originados de inúmeras fontes como, por exemplo, pelos ciclos de trabalho, intemperismo, correntes marítimas entre outras forças, ocasionando falhas ou fraturas por fadiga da estrutura, cujos danos podem acarretar grandes prejuízos financeiros e humanos (perca de vidas) de grandes proporções.

A partir das imagens obtidas pela microscopia óptica, foi possível a caracterização do material-base e da junta soldada com eventuais presenças de inclusões. O ensaio de microdureza mostrou que o material é mais “duro” na RGF/ZAC, porém apresenta pouca discrepância dos valores de microdureza entre o metal de solda e o material-base. Através dos ensaios de tração, foi possível observar que as tensões de escoamentos e tensões máximas estão muito próximas e que a variação ocorreu no alongamento dos corpos de prova, porém dentro do esperado. O aço LHR355 apresenta muito boa resistência mecânica, com tensão máxima em torno de 567 MPa. Com relação ao ensaio de fadiga, constata-se que o aço LHR355, utilizado em guindastes *offshore*, apresentou muito bom comportamento aos esforços cíclicos, com o patamar de resistência correspondente à 100% da tensão de escoamento do material (aproximadamente 450 MPa).

REFERÊNCIAS

- ALMAR-NAESS, A., **Fatigue handbook: offshore steel structures**. 3.ed. Noruega: Tapir, 1985.
- ANDERSON, T.L. **Fracture mechanics: fundamentals and applications**. 2. ed. United States: CRC, 1995.
- BARROS, M. R. C. **Análise de fadiga em estruturas offshore tipo unidade flutuante de produção, armazenamento e transferência: FPSO**. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Rio de Janeiro: 2013.
- BEER, F. P.; JOHNSTON JUNIOR, E. R. **Mecânica dos materiais**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2011.
- BRANCO, C.M.; FERNANDES, A.A.; CASTRO, P.M.S.T. **Fadiga de estruturas soldadas**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1986.
- CALLISTER JUNIOR., W. D. **Ciência e engenharia de materiais : uma introdução**. 5.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.
- COLPAERT, H. **Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns**. Ed Edgard Blucher, São Paulo, 1974.
- DIETER, G. E. **Metalurgia Mecânica**. 2. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1981.
- GARCIA, A.; SPIM, J.; SANTOS, A. **Ensaaios dos materiais**. 2.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.
- LAGE, C.M.; FREITAS, M.S.R.; FREITAS, A.M.S. Análise de fadiga de estruturas metálicas tubulares. In: JORNADAS SUDAMERICANAS DE INGENIERIA ESTRUCTURAL, 32., Chile, 2008. **Anais...** Chile, 2008.
- MACHADO, I. G. **Soldagem e técnicas conexas: processos**. Porto Alegre: Editora Ivan Guerra, 1996.
- MANNHEIMER, W.A. **Microscopia dos materiais: uma introdução**. Rio de Janeiro, Editora E-Papers, 2012.
- OKUMOTO, Y. et al. **Design of ship hull structures: a practical guide for engineers**. 2. ed. Japão: Springer, 2009.
- SANTOS, R. B. **Estudo da resistência à fadiga da junta soldada de um aço LHR 355 aplicado na lança de guindaste offshore**. 2014. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2014.
- SMITH, F.W; HASHEMI, J. **Foundations of materials science and engineering**. 5. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2012.

SOUZA, SERGIO AUGUSTO DE. **Ensaio Mecânico de Materiais Metálicos: Fundamentos teóricos e práticos.** 5^a.ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 1984.