

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

**CARACTERÍSTICAS DO AÇO API X70 UTILIZADO EM TUBOS DE  
TRANSPORTE DE PETRÓLEO E GÁS**

**Daniel Peres da Silva Santos**  
**Marcela Gagheggi Maciel**

**Guaratinguetá**  
**2015**

DANIEL PERES DA SILVA SANTOS  
MARCELA GAGHEGGI MACIEL

CARACTERÍSTICAS DO AÇO API X70 UTILIZADO EM TUBOS DE  
TRANSPORTE DE PETRÓLEO E GÁS

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: Prof. Dr. Marcelino Pereira do Nascimento

Guaratinguetá

2015

Santos, Daniel Peres da Silva  
S237c Características do aço API X70 utilizado em tubos de transporte de petróleo e gás / Daniel Peres da Silva Santos, Marcela Gagheggi Maciel – Guaratinguetá, 2014.  
45 f. : il.  
Bibliografia: f. 44-45

Trabalho de Graduação em Engenharia de Materiais – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2014.  
Orientador: Prof. Dr. Marcelino Pereira do Nascimento

1. Aço 2. Gás 3. Petróleo I. Maciel, Marcela Gagheggi II. Título

CDU 669.14

**Daniel Peres da Silva Santos, Marcela Gagheggi Maciel**

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 ANGEL RAMÍREZ GIL  
Coordenador

**BANCA EXAMINADORA:**

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

  
Eng. BRUNO ANTONIO SORRIJA  
Membro Externo

  
Eng. CÁSSIA CAVALCANTI DA SILVA  
Membro Externo

**Fevereiro de 2015**

**Daniel Peres da Silva Santos**

NASCIMENTO 21.01.1987 – Piquete / SP

FILIAÇÃO Ismael Peres dos Santos  
Maria Elizabete da Silva Santos

2010/2014 Curso de Graduação  
Engenharia de Materiais – Universidade Estadual Paulista  
Júlio de Mesquita Filho – Campus de Guaratinguetá

**Marcela Gagheggi Maciel**

NASCIMENTO 17.04.1991 – Leme / SP

FILIAÇÃO Gilmar Tadeu Maciel  
Adriana Maria Gagheggi Maciel

2010/2014 Curso de Graduação  
Engenharia de Materiais – Universidade Estadual Paulista  
Júlio de Mesquita Filho – Campus de Guaratinguetá

## **AGRADECIMENTOS**

Daniel Peres da Silva Santos

Aos meus pais Ismael e Maria Elizabete, pelo carinho, amor, compreensão e incentivo em todas as fases desta e de outras etapas.

Aos meus irmãos Darla e Dalmo, pelas conversas e encorajamento em todas as circunstâncias da vida.

Ao professor Marcelino Pereira do Nascimento, pela paciência, entusiasmo e aconselhamentos em todo o tempo de trabalho.

À eterna República Dominicana, sem a qual a faculdade não valeria à pena. Vocês sempre estarão em minhas lembranças e em meu coração.

A todos meus colegas, que durante todos esses anos estiveram junto a mim.

E, finalmente, a FEG, por me proporcionar o melhor ensino, no qual farei tudo para ser merecedor.

## **AGRADECIMENTOS**

Marcela Gagheggi Maciel

Primeiramente, agradeço a Deus pela minha vida, minha família e por tudo que sou e consegui até hoje;

Aos meus pais, pois sem eles eu nada seria e graças a eles eu tive a oportunidade de estar aqui hoje e ser quem eu sou, pois foram seus ensinamentos que guiaram os meus caminhos;

Aos meus irmãos, por quem eu tenho muito orgulho de me espelhar e por sempre me auxiliarem e me apoiarem nas minhas decisões;

Ao meu namorado, que eu agradeço todos os dias por tê-lo ao meu lado, por sempre estar me apoiando e me incentivando e me fazer uma pessoa mais feliz a cada novo dia;

A todas as moradoras da República Bela Espelunca, a qual eu considero minha segunda família e que sempre me proporcionaram momentos de alegria, de companheirismo, de aprendizados e por sempre me apoiarem em todos os momentos durante a minha faculdade;

Aos meus professores, pelos ensinamentos que me passaram, especialmente ao professor Marcelino P. do Nascimento, por me auxiliar no desenvolvimento e conclusão deste trabalho;

Àos meus amigos de sala, Danielle, Kyrila e Guilherme, que fizeram do meu último ano um dos melhores, estando ao meu lado em todos os estudos pré-provas e nas comemorações das mesmas;

Aos meus amigos da República Toa Toa, pois desde o primeiro ano da graduação compartilham comigo os momentos mais divertidos;

E a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram com o meu trabalho de conclusão de curso e possuem uma parcela de importância em minha vida.

“Uma grande vitória só é possível se precedida de pequenas vitórias sobre nós  
mesmos”

Leonid Leonov

SANTOS, D. P. S.; MACIEL, M. G. **Características do aço API X70 utilizado em tubos de transporte de petróleo e gás.** 2015. 45 f. Trabalho de Graduação em Engenharia de Materiais – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

## **RESUMO**

Tendo em vista que a história do petróleo apresenta um rápido crescimento, muitos são os investimentos na área de exploração e produção para que seja possível acompanhar a crescente demanda na área de petróleo e gás. Frente a isso, novas tecnologias vem se desenvolvendo para descobrir novas reservas e operar com eficiência em águas ultra profundas, sem abrir mão das melhores práticas mundiais de segurança operacional. A utilização de dutos rígidos nas instalações marítimas em águas profundas vem aumentando rapidamente e devido a isso, as formas de armazenamento e lançamento de dutos vem sendo estudadas e aperfeiçoadas. No presente trabalho foi analisada as características do aço API X70, comprovando que estas são adequadas para aplicação em tubos de transporte de petróleo e gás. Foi realizado um ensaio de tração para determinar as propriedades mecânicas do metal base: tensão de escoamento, resistência à tração, módulo de elasticidade e tensão máxima, e posterior análise metalográfica a fim de determinar a microestrutura do aço em estudo. As análises de resultados mostraram que o aço apresenta elevada resistência, com boa capacidade de deformação e limite de escoamento bem definido, concluindo-se adequado para a aplicação em questão.

**PALAVRAS-CHAVE:** Aço API X70, Propriedades Mecânicas, Tubos de Petróleo e Gás.

SANTOS, D. P. S.; MACIEL, M. G. **Characteristics API X70 steel used in oil and gas transport pipes.** In 2015. 45 p. Work Undergraduate Materials Engineering-Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

### **ABSTRACT**

Having in mind that petroleum's history presents a huge growth, the exploration and production areas have been receiving lots of investments, in order to attend the increasing demand for gas and petroleum. Looking through that scenario, new technologies have been evolving in favor of discovering new natural petroleum deposits and act with effectiveness in truly deep waters without giving up the worldwide best operational security practices. The use of rigid pipes in marine installations have been rising quickly and, thanks to this reality, the many storage and pipe launching forms became study objects and are getting improved. The analysis of steel API X70 characteristics, proving that they are suitable for use in pipes developed to transport gas and petroleum is the theme of this presentation. A tensile test was conducted to determine the base metal's mechanical properties, draining's tension, traction's resistance, elasticity's modulus and maximum tension. An aspect that is concerning too is the metallographic analysis, in order to determine the studied iron's microstructure. Results of analyzes showed that the steel has high resistance, with good capacity for deformation and well defined yield point, concluding suitable for the application in question.

**KEYWORDS:** Steel API X70, Mechanical Properties, Pipes of Gas and Petroleum.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Dutos empilhados prontos para a conexão ou soldagem (BRASIL ESCOLA).....	15
Figura 2- Navio especializado no lançamento de dutos pelo método carretel (PORTAL MARÍTIMO).....	17
Figura 3 - Ilustração esquemática da laminação controlada com e sem o processo de resfriamento acelerado (CEGLIAS, 2012) .....	23
Figura 4- Rota de fabricação U-O-E de tubos com costura (CEGLIAS, 2012).....	24
Figura 5- Curvamento pelo processo de aquecimento por indução (CEGLIAS, 2012).....	25
Figura 6- Curva tensão-deformação típica de material metálico, destacando as três regiões (SOLOSANDO, 2007).....	28
Figura 7- Curva tensão-deformação típica de material metálico, mostrando a definição de módulo de elasticidade (E), do limite de resistência ( $S_{LR}$ ) e do limite de ruptura ( $S_f$ ) (SOLOSANDO,2007).....	29
Figura 8- Representação esquemática do comportamento uniaxial tensão-deformação de muitos materiais durante a deformação no sentido inicial e reverso, mostrando o efeito Bauschinger (HAUS,2011) .....	31
Figura 9- Representação esquemática de um empilhamento de discordâncias e uma linha móvel de discordâncias interagindo com vários pontos sensíveis de discordâncias (HAUS,2011).....	32
Figura 10- Anel do tubo de aço API X70, sendo cortado através do processo de oxicorte (SORRIJA,2012).....	33
Figura 11- Rugosímetro portátil modelo Surfrest 301.....	34
Figura 12- Layout dos corpos de prova utilizados nos ensaios de tração.....	35
Figura 13- Corpo de prova utilizado no ensaio de tração.....	35
Figura 14- Projetor de perfil, modelo MP 320, com resolução para medição linear de um milésimo de mm.....	36
Figura15- Microscópio óptico: (a) Epiphot 200.....	37
Figura 16- Curva da Tensão Real x Deformação Real Plástica do ensaio de tração, mostrando as curvas de tração real e convencional.....	39
Figura 17- Curva Log da Tensão Real x Log da Deformação Real Plástica do ensaio de tração, para determinação do coeficiente de encruamento (n) e coeficiente de resistência (k).....	39
Figura 18- Curva tensão real x deformação real do ensaio de tração, para determinação do módulo de elasticidade (E).....	40
Figura 19- Microestrutura do metal base na direção longitudinal (200X) (BARBOSA,2014).41	
Figura 20- Microestrutura do metal base na direção transversal (200x) (BARBOSA,2014)....	42

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Graus dos aços API .....	18
Tabela 2- Composição química e propriedade mecânica do aço de grau X70.....	20
Tabela 3- Composição química do tubo de aço API X70.....	34
Tabela 3.1- Procedimento de lixamento para ensaios de tração.....	34
Tabela 4: Medidas das rugosidades antes e após do lixamento dos corpos de prova.....	38
Tabela 5: Propriedades mecânicas encontradas através do ensaio de tração.....	40

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A – Área

$A_0$  – Área da seção transversal

API – American Petroleum Institute

ARBL – Alta Resistência e Baixa Liga

e – Defloração

$\epsilon$  – Deformação verdadeira

E – Módulo de Elasticidade

E&P – Exploração e Produção

F – Força

L – Comprimento

OCTG – Oil Country Tubular Goods

$R_a$  – Parâmetro de medição da rugosidade

S – Tensão

$S_{LR}$  – Limite de Resistência

$S_f$  – Limite de fratura

SAW – Submerged Arc Welding

SCR – Steel Catenary Risers

UOE – Etapas da conformação de aços

$\sigma$  – Tensão verdadeira

$\Delta L$  – Variação de comprimento

## LISTA DE SÍMBOLOS

CO<sub>2</sub> – Gás Carbônico

H<sub>2</sub>S – Gás Sulfídrico

Nb – Nióbio

Ti – Titânio

V – Vanádio

C – Carbono

Mn - Manganês

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVO</b> .....	<b>17</b>
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>18</b>
3.1	SISTEMA DE CODIFICAÇÃO API ( <i>AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE</i> ) .....	18
3.2	AÇO API X70 .....	19
3.3	PROCESSO DE FABRICAÇÃO DOS TUBOS .....	21
3.3.1	<b>Laminação controlada</b> .....	<b>22</b>
3.3.2	<b>Conformação U-O-E</b> .....	<b>23</b>
3.3.3	<b>Tubulações na indústria de petróleo e gás</b> .....	<b>25</b>
3.4	ENSAIO DE TRAÇÃO .....	26
3.4.1	<b>Tensão e deformação convencionais ou de engenharia</b> .....	<b>26</b>
3.4.2	<b>Tensões verdadeiras</b> .....	<b>27</b>
3.4.3	<b>Curva tensão-deformação</b> .....	<b>28</b>
3.5	EFEITO BAUSCHINGER .....	30
3.5.1	<b>Mecanismos do Efeito Bauschinger</b> .....	<b>31</b>
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E METODOLOGIA</b> .....	<b>33</b>
4.1	MATERIAIS .....	33
4.2	MÉTODOS .....	35
4.2.1	<b>Ensaio de Tração</b> .....	<b>35</b>
4.2.2	<b>Ensaio Metalográfico</b> .....	<b>36</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>38</b>
5.1	ENSAIO DE TRAÇÃO .....	38
5.2	ENSAIO METALOGRÁFICO .....	41
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>43</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>44</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A Indústria do Petróleo apresenta uma história de crescimento rápido para atender à demanda do mercado mundial pelos vários subprodutos gerados a partir da extração de óleo e gás dos combustíveis fósseis (VILAS BÔAS, 2012). A já alta demanda por energia, óleo em particular, está prevista para aumentar nas próximas décadas 2-3% ao ano. Sendo assim, empresas de petróleo buscam intensificar esforços para acompanhar a demanda mundial. Tais esforços devem ser feitos na área de exploração e produção (E&P), especialmente na descoberta e desenvolvimento de novas reservas, e na superação de desafios através do aumento de desempenho, do desenvolvimento de novas tecnologias e da redução de custos (AGUIAR, 2008).

Foi descoberto em 2006 o petróleo da camada pré-sal, um gigantesco reservatório de petróleo e gás natural, localizado nas Bacias de Campos, Santos e Espírito Santo (região litorânea entre os estados de Santa Catarina e o Espírito Santo). Estas reservas estão localizadas abaixo da camada de sal (que podem ter até 2km de espessura), portanto se localizam de 5 a 7 mil metros abaixo do nível do mar (CAMADA PRÉ SAL). Atualmente, já superou-se a marca dos 500 mil barris de petróleo produzidos por dia no pré-sal, um patamar alcançado apenas oito anos após a primeira descoberta, uma realidade que coloca o Brasil em uma posição estratégica frente à grande demanda de energia mundial das próximas décadas (PRÉ-SAL).

Frente a isso, novas tecnologias vêm se desenvolvendo para descobrir essas reservas e operar com eficiência em águas ultra profundas, sem abrir mão das melhores práticas mundiais de segurança operacional (PRÉ-SAL).

Algumas empresas são especializadas em instalações de tubulações de óleo e gás em alto mar, cuja realização pode ocorrer através de dutos rígidos ou flexíveis. O processo de instalação é complexo e depende diretamente do tipo de tubulação a ser utilizada. No processo, inúmeras variáveis precisam ser avaliadas com o objetivo de manter a integridade estrutural durante e após a instalação (VILAS BÔAS, 2012).

Mundialmente, os órgãos reguladores governamentais que tratam da movimentação de petróleo, derivados e gás natural, exigem das empresas transportadoras o gerenciamento das ameaças à integridade dos dutos através de um ciclo de melhoria contínua, que engloba a aplicação e a integração de atividades interdisciplinares de inspeção e avaliação de integridade estrutural, visando garantir a segurança das pessoas que vivem ao redor destas instalações e a proteção ao meio ambiente (THIAGO, 2011).

Nos últimos anos, a utilização de dutos rígidos nas instalações marítimas em águas profundas vem aumentando rapidamente. Apesar da instalação deste tipo de duto possuir um custo mais alto, esta solução ganha mais apoio das empresas exploradoras a cada ano, uma vez que os dutos flexíveis com as tecnologias atuais estão chegando ao seu limite de capacidade de profundidade de instalação. Já a limitação das tubulações rígidas está relacionada principalmente com limite de tamanho das embarcações disponíveis no mercado (VILAS BÔAS, 2012).

A forma de armazenamento e lançamento de dutos mais empregada no passado consistia em empilhar dutos em trechos prontos para a conexão ou soldagem em navios ou plataformas de transporte e posterior lançamento, como mostra a Figura 1. Por razões relativas à diminuição de tempo de lançamento e de custo de operação de instalação, a indústria tem preferido enrolar os dutos em carretéis, em terra, e transportá-los em navios especiais para um lançamento rápido pelo método denominado Carretel (*Reel – Lay*), como mostra a Figura 2. O inconveniente é que este método introduz deformação plástica nos tubos durante o processo de instalação, o que pode acarretar modificações nas propriedades mecânicas finais do tubo. A variação das propriedades dos tubos devido à deformação plástica é um processo irreversível capaz de afetar a resistência, a ductilidade, a tenacidade, a resistência ao colapso e a suscetibilidade à corrosão do aço (VILAS BÔAS, 2012).

Figura 1: Dutos empilhados prontos para a conexão ou soldagem.



Fonte: (BRASIL ESCOLA)

Figura 2: Navio especializado no lançamento de dutos pelo método carretel.



Fonte: (PORTAL MARÍTIMO)

A variação das propriedades mecânicas pode gerar o chamado Efeito Bauschinger que consiste na diminuição da tensão de escoamento quando, após a deformação em uma dada direção, ocorre deformação na direção oposta. Este efeito ocorre na estrutura do estado trabalhado a frio, durante a deformação plástica (VILAS BÔAS, 2012).

## **2 OBJETIVO**

O objetivo principal deste trabalho visa determinar as características mecânicas e microestruturais de tubos de aço API X70, utilizados na condução de petróleo e gás em dutos submarinos, tendo em vista que este é um dos principais materiais utilizados nesta aplicação e o estudo de suas propriedades é um importante fator para a indústria de petróleo.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Sistema de codificação API (*American Petroleum Institute*)

Os tubos petrolíferos são geralmente codificados pela norma API, representados por uma letra seguida de um número. Este número refere-se ao limite de escoamento mínimo em ksi (milhares de libras por polegada quadrada) (VILAS BÔAS, 2012). Assim, o grau X-70 tem tensão mínima de escoamento de 70 ksi.

A Tabela 1 mostra os graus dos aços API e suas respectivas tensões mínimas de escoamento em ksi e MPa (API 5L)

Tabela 1 – Graus dos aços API

GRAU	Tensão Mínima de Escoamento	
	Ksi	MPa
A25	25	172
A	30	207
B	35	241
X42	42	289
X46	46	317
X52	52	358
X56	56	386
X60	60	413
X65	65	448
X70	70	482
X80	80	551

Os tubos petrolíferos são divididos em três grandes grupos:

- Tubos para condução de petróleo, gás e seus derivados: são os *line pipe* e fazem o transporte dos fluidos dos campos produtores para os tanques de armazenamento ou de separação ou navios, destes para as refinarias e destas para os clientes. Estes tubos são os de Graus A25, A, B e X seguidos por dois números que se referem ao limite de escoamento, em ksi;
- Tubos para produção de petróleo e gás ou revestimento de poços: são os OCTG (*Oil Country Tubular Goods*) que agrupam os *casing* e *tubing*. O *casing* é a coluna que faz o revestimento dos poços petrolíferos e o *tubing* é a coluna que injeta ou retira fluidos do poço. Estes tubos são os de Graus

que contêm as letras M, J, K, N, L, T, P, Q, C seguida por dois ou três dígitos que se referem ao limite de escoamento mínimo, em ksi;

- Tubos para perfuração de poços: são os *drill pipe*, o qual é conectado um ao outro através de uma peça soldada na extremidade chamada *tool joint*. Na extremidade da coluna é colocada a broca que faz a perfuração do poço. Os graus destes tubos também são compostos por uma letra seguida por dois ou três dígitos (VILAS BÔAS, 2012).

Neste presente trabalho estaremos estudando os tubos do tipo *line pipe* com Grau X70, ou seja, com limite de escoamento mínimo de 70 ksi ou 482 MPa.

### 3.2 Aço API X70

Na fabricação de tubos de grande espessura, há necessidade de uso de aços de alta resistência mecânica à tração, como por exemplo, os aços da série API 5L X70. Especificações internacionais requerem elevadas propriedades de impacto para este aço e, naturalmente, também para as suas juntas soldadas. Estas exigências refletem não apenas a necessidade dos aços e das juntas soldadas possuírem uma temperatura de transição a mais baixa possível (característica essencial para usos em regiões frias), mas também um elevado patamar superior de energia de impacto, particularmente em gasodutos, cujas elevadas tensões de serviço podem contribuir para a ocorrência de falha no modo dúctil de propagação de trincas (KIRKWOOD, 1996).

O aço API 5L X70 foi introduzido pela primeira vez na construção de dutos de transporte de gás, no início dos anos 1970, na Alemanha. Isso foi possível com o desenvolvimento da prática de laminação controlada e conforme esta técnica foi sendo aprimorada, o material pode ser melhorado. Desde então, o X70 provou ser um material confiável para a implementação de vários projetos de dutos (KIRKWOOD, 1996).

Este material é classificado como aços de Alta Resistência e Baixa Liga (ARBL), os quais são aços microligados que apresentam (em sua forma original mais simples) microestrutura típica de ferrita-perlita. Sua composição química é similar à de um aço de baixo-carbono, mas com microadições de elementos de liga de aproximadamente 0,1% Nb, Ti, V para garantir propriedades mecânicas superiores. Desta forma, o teor de carbono pode ser reduzido porque ele é compensado pelo efeito de endurecimento

causado pela microadição de elementos de liga, resultando em melhores propriedades de soldabilidade e tenacidade do material (JUNIOR, 2004).

Quanto às especificações de resistência mecânica, é importante definir limites máximos de resistência mecânica para aços de tubulações para evitar a formação de gradientes de resistência significativos em regiões de solda circunferencial do tubo, devido à eventual discrepância entre a resistência mecânica do metal base e do metal de adição. Adicionalmente, para aços utilizados na fabricação de *risers* rígidos SCR (*steel catenary risers*) é importante garantir que o material do tubo, que será lançado através do desbobinamento do duto soldado, apresente uma relação adequada entre o limite de escoamento (L.E.) e o limite de resistência (L.R.) (usualmente em torno de 0,75). Isto é necessário para garantir que o material suporte a deformação plástica imposta durante o bobinamento, sem falhar (JUNIOR, 2004).

A Tabela 2 mostra a composição química e as propriedades mecânicas do aço API 5L – X70.

Tabela 2 – Composição química e propriedade mecânica do aço de grau X70

GRAU	C	Mn	P	S	Outros	L.E. (Mpa)	L.R. (MPa)
	%max	%max	%max	%max		min	min
Tubos sem costura							
X70	0,28	1,4	0,03	0,03	Nb+V+Ti < 0,15%	483	565
Tubos com costura							
X70	0,26	1,65	0,03	0,03	Nb+V+Ti < 0,15%	483	565

Os dutos soldados, quando em operação, são inevitavelmente submetidos a carregamentos dinâmicos, tanto em função da pressurização durante a operação como devido ao movimento do duto produzido por correntes marinhas e pela maré. O lado externo da solda, submetido à proteção catódica, fica em contato com a água do mar rica em cloretos, e o lado interno fica em contato com a água de produção, petróleo e gases como o gás carbônico (CO<sub>2</sub>) e gás sulfídrico (H<sub>2</sub>S). Com a intensa movimentação das marés, os defeitos e as discontinuidades na solda tornam-se concentradores de tensão que podem dar início a trincas por fadiga na estrutura, podendo levá-la à falha (ZILIO, 2013).

Também existem os inibidores de corrosão que são compostos químicos que objetivam diminuir a agressividade do meio corrosivo. No processo de corrosão-fadiga há evidências de que existe um efeito eletroquímico na etapa de iniciação e propagação da

fratura, pois o uso de inibidores e proteção catódica auxilia na prevenção da nucleação da trinca (ZILIO,2013).

A proteção catódica é um processo de controle contra a corrosão de metais e o seu princípio é eliminar, por processo artificial, as áreas anódicas da superfície do metal, fazendo com que toda a estrutura adquira um comportamento catódico. Portanto, o mecanismo de atuação do inibidor de corrosão está baseado na formação de uma barreira ou filme na superfície do material, que impede ou retarda as reações de corrosão, e na alteração do meio corrosivo, tornando-o menos agressivo (ZILIO,2013).

### **3.3 Processo de fabricação dos tubos**

A popularização do sistema de tubos se deu no século XIX, na Inglaterra, com a grande demanda por tubos que transportavam gás de carvão para iluminação residencial e pública. Disso surgiu a necessidade de buscarem novas maneiras de produzir estes tubos de forma mais rápida e barata. Neste período, o nascimento de várias técnicas de fabricação culminou com o desenvolvimento do processo de produção de tubos a partir de uma chapa retangular, conformada em U e a seguir submetida à solda longitudinal por sobreposição das bordas da chapa ao longo de seu comprimento. E foi durante a Segunda Guerra Mundial que começou a desenvolver nos EUA a tecnologia de construção de grandes extensões de tubulações para o transporte de combustíveis e petróleo, motivada pela enorme demanda de energia durante aquele período (JUNIOR, 2004).

O termo tubulações refere-se a um conjunto de dutos, que por sua vez é entendido como um equipamento industrial formado pela montagem sucessiva de vários segmentos iguais, resultando em uma linha de condução efetiva de fluido (gás ou líquido). Portanto, o tubo é a unidade básica para a construção de dutos, fabricado em diferentes materiais e comprimentos, e comumente unidos um ao outro através de solda circunferencial (JUNIOR, 2004).

### 3.3.1 Laminação controlada

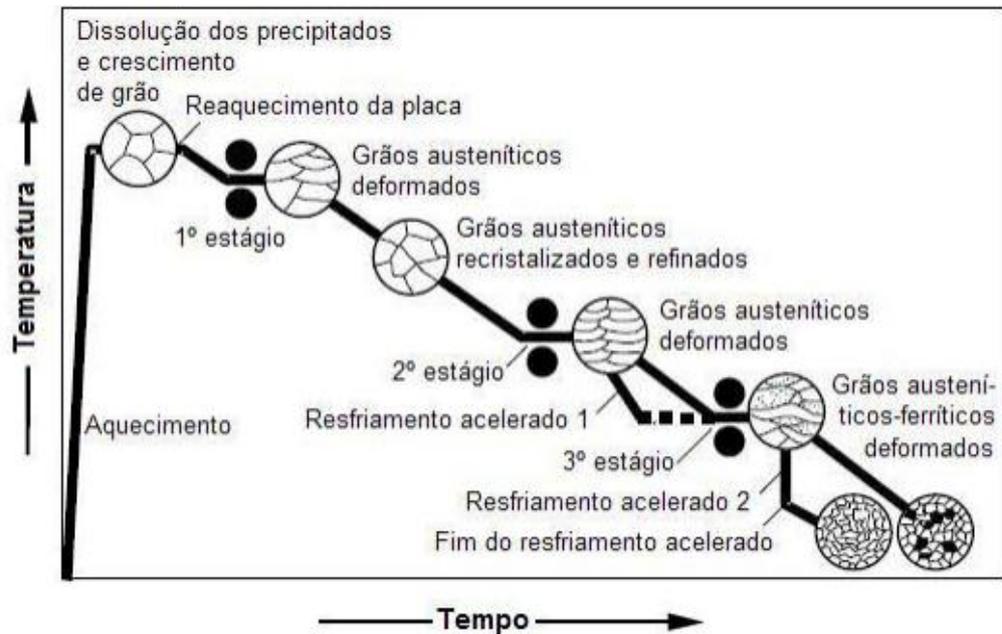
Nos últimos anos houve um desenvolvimento significativo na tecnologia de fabricação de aços para tubulações (*line pipe steels*) (JUNIOR, 2004). O processamento termomecânico por laminação controlada tem-se apresentado como a alternativa mais adequada para a produção de aços microligados (LOPES, 2010).

Na laminação controlada, o aumento da resistência mecânica do material é conseguido muito mais pelo refino da microestrutura, do que pelo endurecimento do material devido à adição de elementos de liga formadores de precipitados. Por causa disso, o resultado final é um material com teores reduzidos de elementos de liga (baixo carbono equivalente), resultando em um aço com boa soldabilidade e baixo custo (LOPES, 2010).

O processo de laminação controlada é composto, basicamente, por dois estágios. O primeiro estágio (desbaste) é comumente realizado em temperaturas relativamente elevadas (entre 950°C e 1100°C) e seu principal objetivo é o refino do grão através da completa recristalização da austenita depois de cada passe de laminação. No segundo estágio (acabamento) explora-se o efeito dos elementos de liga (principalmente o Nb) em estabilizar a austenita e retardar sua recristalização estática em temperaturas inferiores a 900°C. Ao final do processo, obtém-se grãos muito deformados e alongados, que resultam em grãos finos de ferrita após a transformação  $\gamma$ - $\alpha$ . Além do refino de grão, a adição de elementos como V e Ti é também utilizada durante o processo de laminação controlada de aços microligados. Este processo é mostrado na Figura 3 (JUNIOR, 2004).

A demanda por tubulações de aços cada vez mais resistentes e tenazes, motivada principalmente pela necessidade de transporte de grandes quantidades de óleo e derivados, levou ao desenvolvimento de graus superiores de aços API, como X80 e X100. Nestes aços, suas propriedades superiores de resistência mecânica e tenacidade podem ser obtidas somente com microestrutura de ferrita acicular, ou mesmo de microestrutura bainítica (JUNIOR, 2004).

Figura 3: Ilustração esquemática da laminação controlada com e sem o processo de resfriamento acelerado.

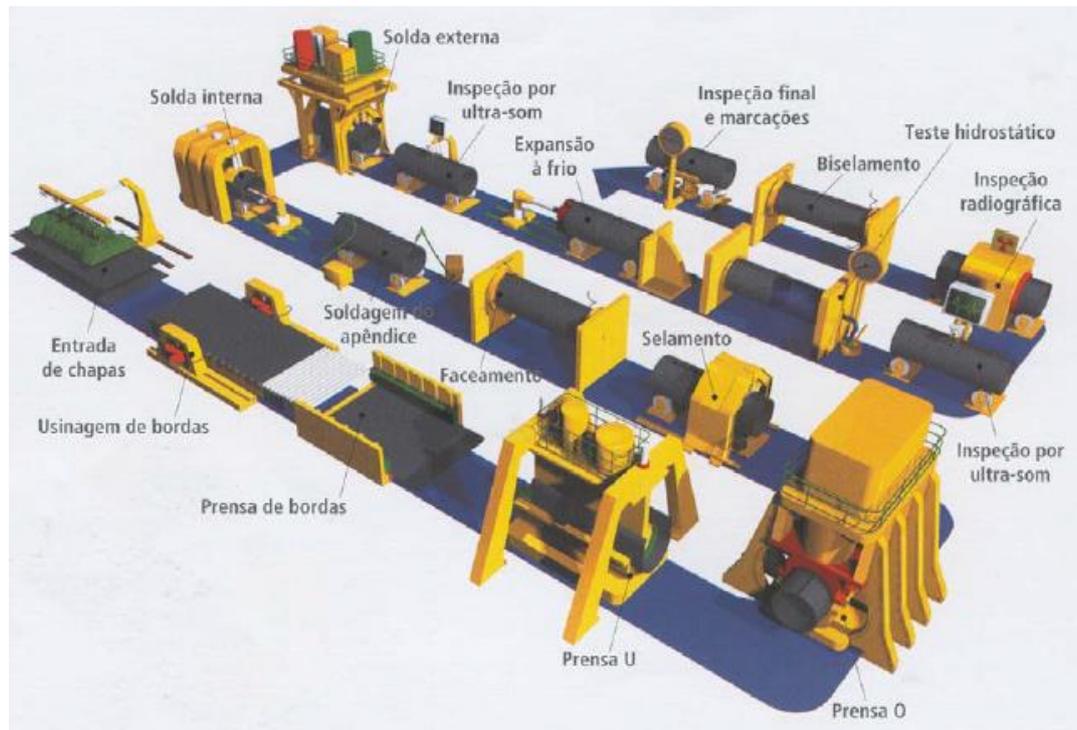


Fonte: (CEGLIAS, 2012)

### 3.3.2 Conformação U-O-E

A próxima etapa de fabricação do tubo é a conformação UOE, realizado a partir de chapas. A sigla “UOE” representa exatamente as etapas do processo. A primeira etapa consiste no dobramento da chapa no formato de “U” e em seguida é conformado em “O”. A etapa seguinte é a soldagem das extremidades da chapa pelo processo de arco submerso (SAW – *Submerged Arc Welding*). Após a soldagem, o tubo é submetido a uma expansão “E”, cuja finalidade é de ajustar o seu diâmetro às tolerâncias da norma API. A Figura 4 apresenta todo o processo de fabricação do tubo (JUNIOR, 2004).

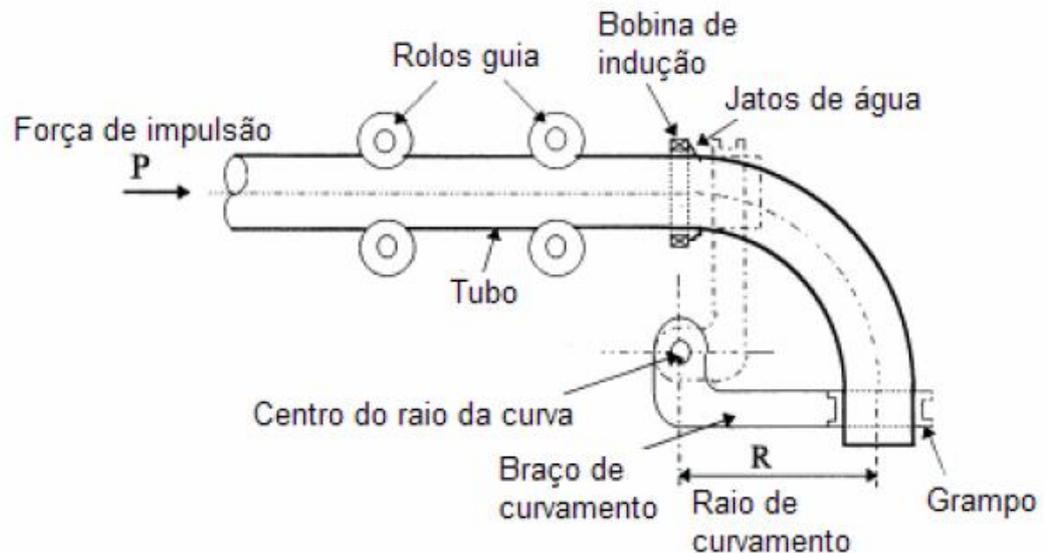
Figura 4: Rota de fabricação U-O-E de tubos com costura



Fonte: (CEGLIAS, 2012)

O processo de curvamento do tubo é a última etapa antes do material ir para o mercado. O curvamento dos tubos é um processo de conformação livre capaz de dobrar tubos de quaisquer diâmetros em pequenos raios. O método de indução eletromagnética consiste em aquecer o material através de um campo magnético gerado por uma corrente elétrica alternada de alta frequência de um anel (bobina) de cobre, que envolve o tubo metálico sem tocá-lo. Aquecida a região, o tubo passa para a etapa de curvamento, onde uma das extremidades é empurrada por um carro impulsor a uma velocidade constante, enquanto a outra extremidade é fixada por um grampo em um braço giratório que aplica um momento fletor de modo a realizar uma deformação contínua. Por fim, o tubo passa por um resfriamento rápido por um jato de água ou ar emitido da própria bobina, que cessa assim, o aquecimento e consequentemente, a deformação plástica. A Figura 5 ilustra o processo descrito acima (JUNIOR, 2004).

Figura 5: Curvamento pelo processo de aquecimento por indução



Fonte: (CEGLIAS,2012)

### 3.3.3 Tubulações na indústria de petróleo e gás

Desde a produção até o abastecimento de petróleo e derivados, três pontos distintos devem ser interligados: os poços de produção, as refinarias e os centros de consumo. Diante disso, as linhas de dutos se apresentam como uma boa alternativa, principalmente por dois motivos. O primeiro deles é o custo, apesar do investimento inicial de construção e instalação das linhas ser elevado, o transporte de combustíveis fósseis através de malhas de dutos é significativamente mais barato do que o transporte por avião, navio, trem ou caminhão. Segundo dados dos EUA, constatou-se que com US\$ 1,00 é possível transportar, em território norte-americano, uma tonelada de derivados de petróleo a uma distância aproximadamente de 8 km utilizando-se o avião, ao longo de 30,5 km através de caminhões, 72,5 km através de trens, 322 km utilizando-se navios e 383 km através de linhas de dutos (JUNIOR, 2004).

O segundo principal motivo é pelo fato de os dutos ser o meio de transporte mais seguro, confiável e de maior regularidade para o transporte de grandes quantidades de óleo e gás natural através de grandes extensões territoriais, além de haver menor risco de danos ambientais devido a vazamentos (JUNIOR, 2004).

As tubulações na indústria do petróleo possui cinco classificações de acordo com a sua função na cadeia produtiva (JUNIOR, 2004):

- a) Linhas de fluxo: fazem o transporte de material dos poços de extração a uma unidade de centralização. Normalmente abrangem pequenas extensões e servem para coletar produtos e transportá-los para as unidades de processamento;
- b) Linhas de transferência: escoam produtos a partir das unidades de processamento e armazenamento até as linhas de transporte principais;
- c) Linhas de transporte: são os principais condutores de petróleo e gás no sistema. Estas linhas podem apresentar grandes diâmetros (até 56'') e longas extensões, e são utilizadas para a distribuição de gás natural para as indústrias e para as redes locais de distribuição, para o transporte de óleo cru até as refinarias, ou de derivados de petróleo até as regiões de consumo;
- d) Linhas de produtos: servem para o transporte de produtos derivados do petróleo a partir das refinarias para os centros de distribuição;
- e) Linhas de distribuição: permitem a distribuição local a partir do sistema de distribuição de gás para as residências, comércios, etc.

Neste trabalho, o foco dos estudos são os efeitos que ocorrem nos dutos empregados como linhas de transporte de óleo e gás, que representam a maior parcela em operação no mundo.

### **3.4 Ensaio de tração**

#### **3.4.1 Tensão e deformação convencionais ou de engenharia**

Para se descrever o comportamento mecânico de um material sob a ação de uma força de tração, deve-se utilizar o conceito de tensão ( $S$ ) e deformação ( $e$ ). A tensão quando aplicada em um material indica que a força ( $F$ ) necessária para provocar uma variação no comprimento ( $\Delta L$ ) é diretamente proporcional à área da seção transversal onde a força é aplicada ( $A_0$ ) do material solicitado mecanicamente (SOLOSANDO, 2007).

Dessa forma, a definição de tensão é dada pela equação (1) e a deformação ( $e$ ) é definida pela equação (2).

$$S = \frac{F}{A_0} \quad (1)$$

$$e = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2)$$

### 3.4.2 Tensões verdadeiras

Quando a tensão e deformação são descritas como nas equações (1) e (2) são frequentemente utilizadas na engenharia para dimensionamento de componentes mecânicos, por exemplo (SOLOSANDO,2007).

Porém, quando efetuada esta convenção, há o erro de não considerar a redução de área da seção transversal na direção solicitada para compensar o aumento do comprimento, além de que não se considera um comprimento inicial de referência que pode variar ao longo tempo devido uma sequência de solicitações. Estes problemas são corrigidos com as definições de tensão e deformação verdadeiras, como mostram as equações (3) e (4), sendo A e L a área e o comprimento no instante da aplicação da força F, respectivamente (SOLOSANDO, 2007).

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (3)$$

$$\varepsilon = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right) \quad (4)$$

As equações (2) e (4) podem ser reescritas assumindo um volume constante e considerando a variação da área da seção transversal à aplicação da força.

$$e = \frac{A_0}{A} - 1 \quad (5)$$

$$\varepsilon = \ln\left(\frac{A_0}{A}\right) \quad (6)$$

Além de assumir um volume constante, se considerar o fenômeno de deformação uniforme, ou seja, todo material sujeito à força F de tração se alonga do mesmo modo em todo o seu comprimento, é possível deduzir as equações (7) e (8) que relacionam as deformações convencionais e verdadeiras (SOLOSANDO, 2007).

$$\sigma = S.(e + 1) \quad (7)$$

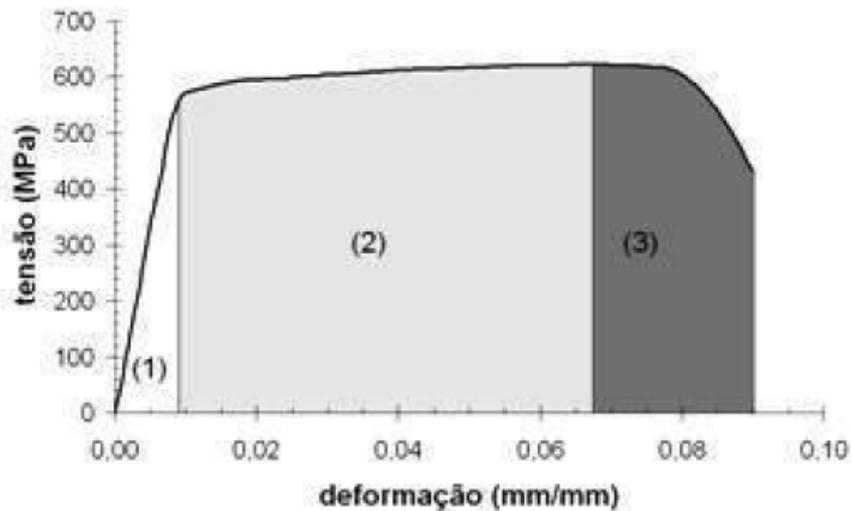
$$\varepsilon = \ln(e + 1) \quad (8)$$

### 3.4.3 Curva tensão-deformação

De acordo com a norma ASTM E 8M, a curva tensão-deformação obtida por um ensaio de tração realizado em materiais metálicos pode ser dividida em três regiões, como mostra a Figura 6:

- 1) Região de deformação elástica: ao se aplicar uma solicação mecânica, gera-se uma deformação que deixa de existir ao cessar a solicação e dessa forma o material retorna às suas dimensões originais;
- 2) Região de deformação plástica uniforme: ao ocorrer uma solicação mecânica, o material sofre uma mudança uniforme permanente de sua forma;
- 3) Região de deformação plástica não uniforme: ocorre devido à concentração de deformação plástica localizada, ou seja, numa única região do corpo de prova;

Figura 6: curva tensão-deformação típica de material metálico, destacando as três regiões.



Fonte: (SOLOSANDO, 2007)

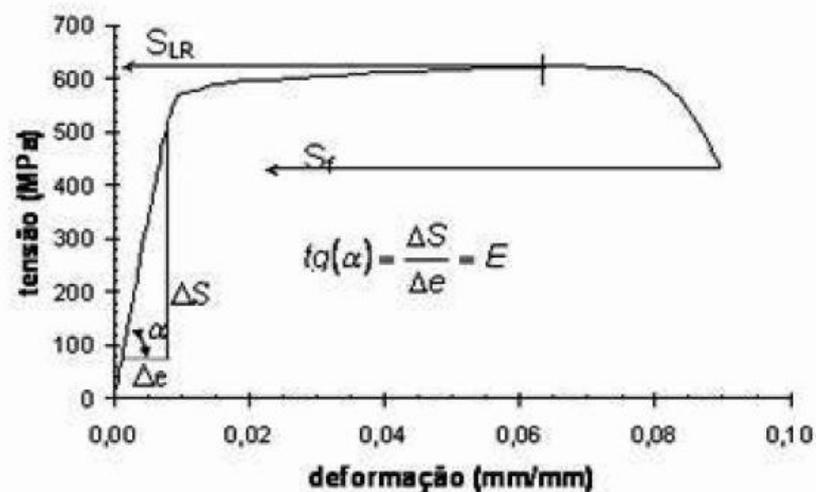
Ao se analisar uma curva de tensão-deformação, alguns conceitos devem ser definidos, como o limite de resistência ( $S_{LR}$ ), limite de fratura ( $S_f$ ) e o módulo de elasticidade ( $E$ ), também chamado de módulo de Young, que é definido matematicamente como sendo o coeficiente angular do trecho linear elástico (SOLOSANDO, 2007).

Na maioria dos materiais metálicos, elevados valores de  $E$  são encontrados, indicando pequenas deformações elásticas. Com isso, os valores numéricos de tensão

convencional e verdadeira na região de deformação elástica são praticamente idênticos (SOLOSANDO, 2007).

O limite de resistência é a tensão máxima que um material, sob tração, pode suportar sem que ocorra deformação localizada, como pode ser observado na Figura 7. A tensão chega a um limite máximo e depois decresce até a ocorrência da fratura, portanto, o limite de resistência é o marco do início de deformação plástica não uniforme (SOLOSANDO, 2007).

Figura 7: curva tensão-deformação típica de material metálico, mostrando a definição de módulo de elasticidade (E), do limite de resistência ( $S_{LR}$ ) e do limite de ruptura ( $S_f$ ).



Fonte: (SOLOSANDO, 2007)

Além de definir o comportamento de um material metálico, a partir da curva tensão-deformação também podem ser definidas cinco propriedades mecânicas básicas que o caracterizam :

**Rigidez:** diretamente associada ao módulo de elasticidade (E), é a capacidade de um material metálico deformar-se no trecho elástico sob uma dada tensão aplicada, ou seja, quanto maior for o módulo de elasticidade mais rígido será o material e menor será a deformação elástica que resultará da aplicação de uma dada tensão.

**Resistência:** capacidade do material metálico em resistir à deformação plástica. Quanto mais resistente for uma material, maiores serão os valores do limite de escoamento e de limite de resistência por ele apresentado.

**Resiliência:** é a energia absorvida por unidade de volume de material no trecho elástico e liberada quando o mesmo é descarregado. Esta propriedade é quantificada pelo módulo de resiliência, o qual representa a energia de deformação por unidade de volume

requerida para tracionar o material desde uma carga nula até a sua tensão limite de escoamento.

Ductilidade: capacidade de deformação plástica de um material metálico e pode ser quantificada através do alongamento total do material.

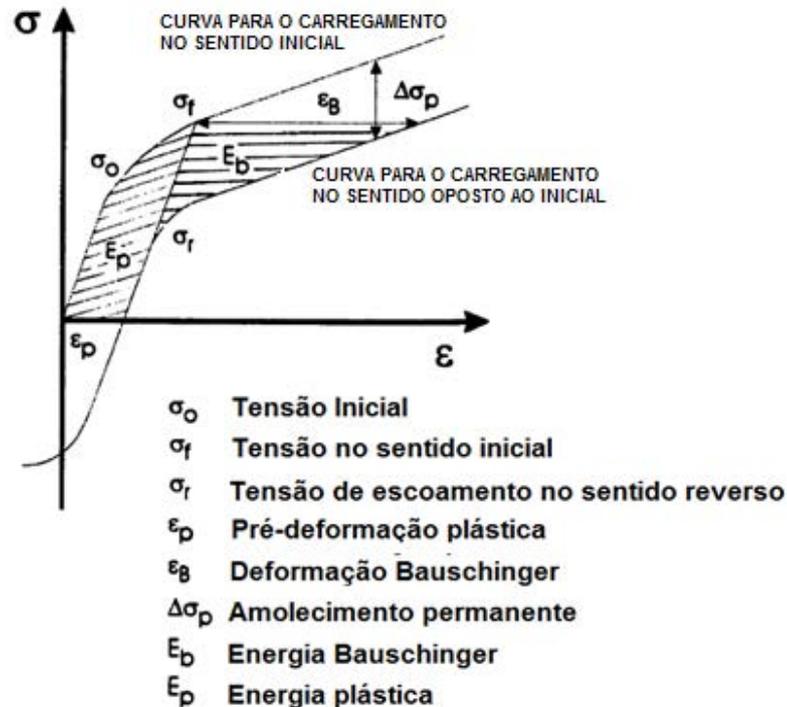
Tenacidade: energia total absorvida por unidade de volume necessária para que ocorra mudança de forma material até a sua ruptura, podendo ser considerada como a área total sob a curva tensão-deformação (SOLOSANDO, 2007).

### **3.5 Efeito Bauschinger**

O Efeito Bauschinger é um importante fenômeno mecânico em metais e suas ligas. Este efeito é normalmente associado a condições de carregamento onde a tensão limite de escoamento sofre diminuição, quando a deformação imposta sobre um dado material metálico, normalmente policristalino, é invertida (VILAS BÔAS, 2012; SOLOSANDO, 2007).

Quando os materiais são carregados em uma direção axial (por exemplo, tração) no regime plástico, descarregados, e em seguida, recarregados no sentido inverso (por exemplo, compressão), eles podem produzir, durante a recarga um nível de tensão mais baixo do que o do carregamento realizado no sentido original. A Figura 8 é a representação esquemática do Efeito Bauschinger (HAUS, 2011).

Figura 8: Representação esquemática do comportamento uniaxial tensão-deformação de muitos materiais durante a deformação no sentido inicial e reverso, mostrando o efeito Bauschinger.



Fonte: (HAUS,2011)

### 3.5.1 Mecanismos do Efeito Bauschinger

Muitos estudos tem sido realizados para explicar o Efeito Bauschinger. Inicialmente acreditava-se que a causa do efeito Bauschinger eram as tensões internas e tensões residuais macroscópicas desenvolvidas devido à deformação não homogênea de grãos individuais de um metal policristalino (HAUS, 2011), que facilitariam o movimento de discordâncias no sentido contrário ao da deformação inicial, e conseqüentemente, o escoamento no sentido reverso. Outro mecanismo propõe que fontes de discordâncias de sinais opostos no carregamento reverso proporcionariam a aniquilação de discordâncias inicialmente formadas com conseqüente redução do encruamento e do limite de escoamento observado inicialmente (SOLOSANDO, 2007).

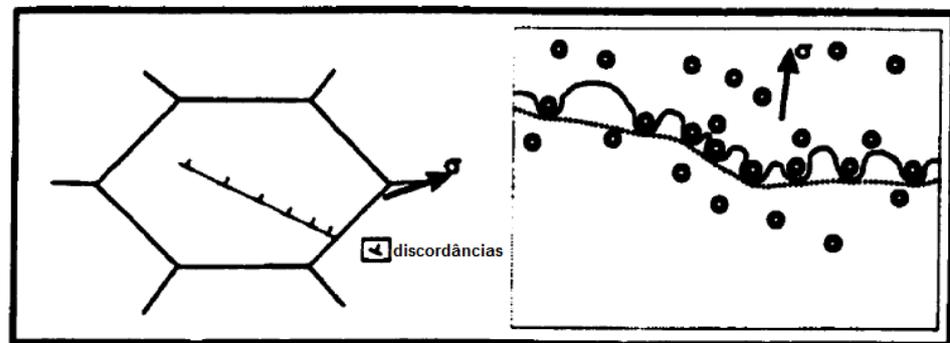
Em geral, existem duas escolas principais para explicar o Efeito Bauschinger: teoria das tensões internas, e a teoria das discordâncias, além de um modelo composto também utilizado para descrever esse efeito (HAUS,2011).

- a) Teoria das tensões internas: teoria para explicar a redução da elasticidade observada na inversão da carga.

Essa teoria explica que há uma curvatura na curva de tensão inicial, na transição elasto-plástica. A deformação elástica é homogênea e uniforme na seção da carga, já durante a deformação plástica, a distribuição de tensões não é uniforme e, portanto, após a descarga, tensões residuais que surgem são responsáveis pelo efeito de redução da elasticidade ao se reverter a carga (HAUS,2011);

- b) Modelo Composto: sugere que sempre que duas fases, ou dois componentes, com diferentes propriedades mecânicas, coexistirem em um único exemplar, pode ser que eles possuam a mesma constante elástica, mas diferentes limites de escoamento (HAUS,2011);
- c) Teoria das discordâncias: sugere que durante a pré-deformação, uma larga faixa de tensões é construída através da formação de empilhamentos de discordâncias nas barreiras. A Figura 9 demonstra discordâncias empilhadas nos obstáculos que são definidos como barreiras (HAUS,2011).

Figura 9: Representação esquemática de um empilhamento de discordâncias e uma linha móvel de discordâncias interagindo com vários pontos sensíveis de discordâncias.



Fonte: (HAUS,2011)

Essas barreiras, tais como contornos de grão, são fortes o suficiente para bloquear o movimento de discordâncias. Como resultado, as tensões centrais produzidas pelas discordâncias empilhadas ajudarão o movimento na direção inversa (HAUS,2011).

## 4 MATERIAIS E METODOLOGIA

A metodologia que será utilizada neste trabalho consiste no desenvolvimento de corpos de prova a partir do aço API X70 para em sequência realizar ensaio de tração e ensaio metalográfico e dessa forma poder caracterizar as propriedades mecânicas e microestruturais do aço utilizado em tubos de transporte de petróleo e gás.

### 4.1 Materiais

Neste trabalho utilizou-se o aço API X70, o qual apresenta como principais características: alta resistência e baixa liga, excelente tenacidade e soldabilidade. O material foi fornecido pela Tenaris Confab S.A., na forma de anéis de tubos, como mostra a Figura 10, com diâmetro externo de 700mm e espessura de parede de 15,8mm. Os tubos foram obtidos a partir de chapas conformadas em “U” e posteriormente em “O”, com suas bordas unidas por dois cordões de solda pelo processo de arco submerso e por fim pelo processo de expansão “E”. A Tabela 3 apresenta a composição química do tubo de aço API X70.

Figura 10: Anel do tubo de aço API X70, sendo cortado através do processo de oxicorte



Fonte: (SORRIJA,2012)

Tabela 3: Composição química do tubo de aço API X70 (% em peso).

C	Si	Mn	P	S	V+Nb+Ti
0,12	0,45	1,70	0,025	0,015	0,15

As amostras foram retiradas dos anéis de tubo de acordo com as especificações da norma API 5L e a partir disso confeccionou-se os corpos de prova para ensaios de tração.

Após a usinagem, os corpos de prova passaram pelo processo de lixamento, utilizando-se um torno, para evitar a respectiva falha no ensaio devido à presença de riscos “grosseiros” nos mesmos, conforme procedimento mostrado na Tabela 3.1. Além disso, segundo a norma ASTM E606, os corpos de prova devem apresentar rugosidade em torno de  $0,2\mu\text{m}$  para a realização do ensaio de tração, que foi medida através do parâmetro Ra, com comprimento de amostragem de 0,8 e percurso total de 4 mm (*cut-off*), em um rugosímetro portátil, modelo Surftest 301, como mostra a Figura 11.

Tabela 3.1: Procedimento de lixamento para ensaios de tração.

Etapa	Lixamento	Rotação (rpm)	Tempo (minutos)
1	Lixa #320	1000	5 min
2	Lixa #400	1000	5 min
3	Lixa #600	1000	5 min
4	Lixa #1000	1000	5 min

Figura 11: Rugosímetro portátil modelo Surftest 301.



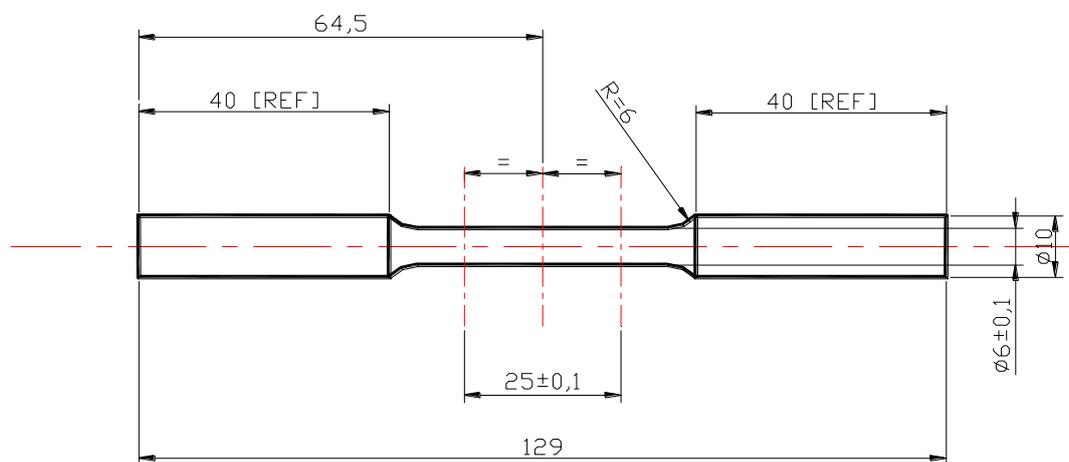
Fonte: (Próprio autor)

## 4.2 Métodos

### 4.2.1 Ensaio de Tração

Os corpos de prova de tração foram confeccionados conforme as recomendações da norma ASTM E8M, no formato cilíndrico, obtidos em relação à direção longitudinal do tubo. A Figura 12 mostra o *layout* do corpo de prova utilizado no ensaio de tração, assim como a Figura 13 mostra o corpo de prova já usinado.

Figura 12: Layout dos corpos de prova utilizados nos ensaios de tração.



Fonte: (próprio autor)

Figura 13: Corpo de prova utilizado no ensaio de tração.



Fonte: (próprio autor)

Os corpos de prova foram dimensionados e posteriormente ensaiados à temperatura ambiente, segundo a norma ASTM E8M e API 5L, em uma máquina Instron 8801, com

100 kN de capacidade, com uma velocidade de 2mm/min. Esses ensaios são necessários para a certificação do tubo perante essas normas, além de caracterizar as propriedades mecânicas do metal base para justificar a sua escolha perante à aplicação em tubos de transporte de petróleo e gás.

Dessa forma, efetuados os ensaios de tração, foram medidos com um projetor de perfil modelo MP 320, como mostrado na Figura 14, os respectivos raios de curvatura na região de fratura dos corpos de prova já ensaiados. Por fim, foram obtidos os valores das tensões limites de escoamento e resistência convencionais, tensão verdadeira de fratura, módulo de elasticidade, deformação verdadeira de fratura, coeficiente de resistência e coeficiente de encruamento dos materiais em estudo com os dados até aqui coletados.

Figura 14: Projetor de perfil, modelo MP 320, com resolução para medição linear de um milésimo de mm.



Fonte: (Próprio autor)

#### 4.2.2 Ensaio Metalográfico

O ensaio metalográfico consiste na microscopia óptica com ataque químico, que tem como finalidade caracterizar a microestrutura do metal base. Dessa forma, foram

analisadas amostras extraídas do metal base na direção longitudinal em relação ao comprimento do tubo. Estas foram preparadas seguindo a norma ASTM E3.

Inicialmente, as amostras foram lixadas utilizando-se lixas de granulometria decrescente de 200 a 2000 *mesh* e com a finalidade de se obter um fino acabamento, empregou-se como abrasivo uma solução de sílica coloidal em suspensão.

Em seguida, foi aplicado Nital 2% para revelar a microestrutura do material e assim destacar os contornos de grãos e distinguir a fase ferrítica (área clara) do constituinte perlítico (área escura). O ataque químico foi cessado mediante a lavagem da amostra em água corrente, seguida de secagem através da aplicação combinada de álcool etílico e fluxo de ar quente.

As análises foram realizadas através de um microscópio óptico, marca NIKON, modelo EPIPHOT 200, como mostra a Figura 15. A câmera utilizada para capturar as imagens foi a AxioCam ERc 5s, acoplada ao microscópio óptico, utilizando o *software* AxionVision. Em seguida, as micrografias foram processadas pelo *software* ImageJ para melhor qualidade de imagem.

O microscópio utilizado encontra-se instalado nas dependências do Laboratório de Análise de Imagens de Materiais do Departamento de Materiais e Tecnologia (DMT), da UNESP de Guaratinguetá.

Figura 15: Microscópio óptico: (a) Epiphot 200



Fonte: (próprio autor)

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Ensaio de tração

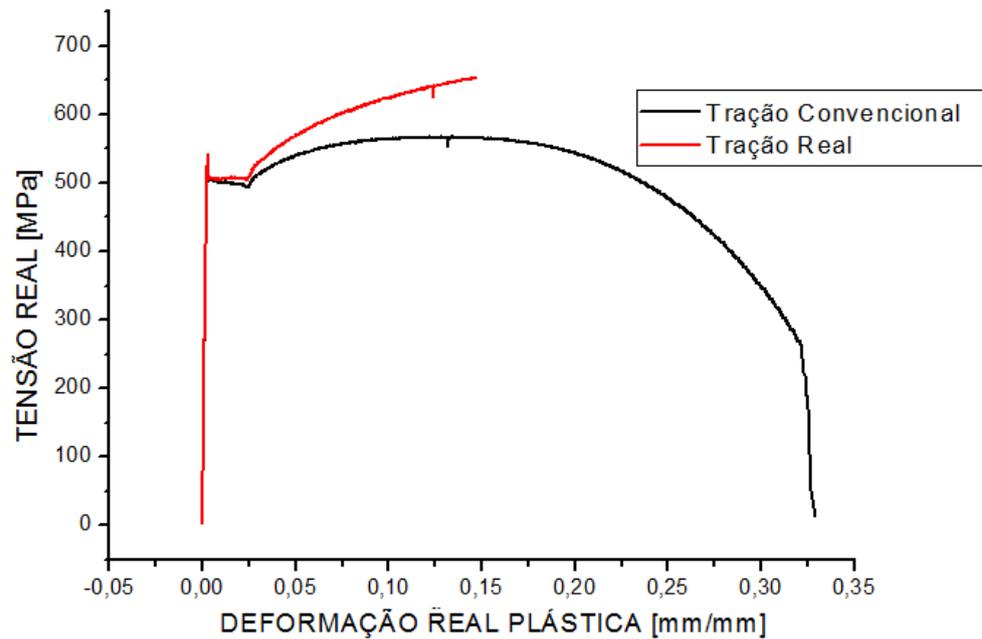
Para a realização dos ensaios foi necessário a realização do lixamento dos corpos de prova de modo a retirar riscos grosseiros dos mesmos e obter uma rugosidade adequada conforme pede a norma ASTM E606. A Tabela 4 mostra os resultados das medições de rugosidade, antes e após o lixamento, permitindo que o corpo de prova se torne adequado para a realização do ensaio de tração.

Tabela 4: Medidas das rugosidades antes e após do lixamento dos corpos de prova.

<b>Corpo de prova</b>	<b>Rugosidade Inicial (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Rugosidade Final (<math>\mu\text{m}</math>)</b>
1	1,18	0,38
2	1,50	0,58
3	1,38	0,31
4	1,62	0,33
5	0,96	0,22
6	1,06	0,15
7	1,31	0,46
8	1,11	0,23
9	2,89	0,23
10	1,74	0,20
<b>Média</b>	<b>1,47 <math>\pm</math> 0,55</b>	<b>0,30 <math>\pm</math> 0,13</b>

Após a realização do ensaio, foram traçadas as curvas de tração convencional e tração real do material, como mostra a Figura 16. Com isso, foi possível determinar a tensão limite de escoamento e resistência convencionais, tensão verdadeira de fratura, módulo de elasticidade, deformação verdadeira de fratura, coeficiente de resistência e coeficiente de encruamento, indicados na Tabela 5.

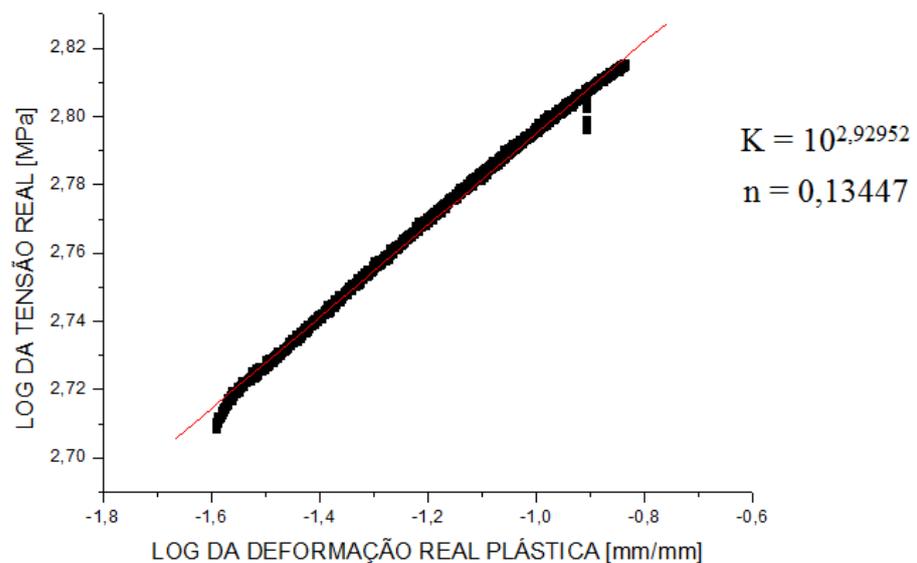
Figura 16: Curva da Tensão Real x Deformação Real Plástica do ensaio de tração, mostrando as curvas de tração real e convencional.



Fonte: (Próprio autor)

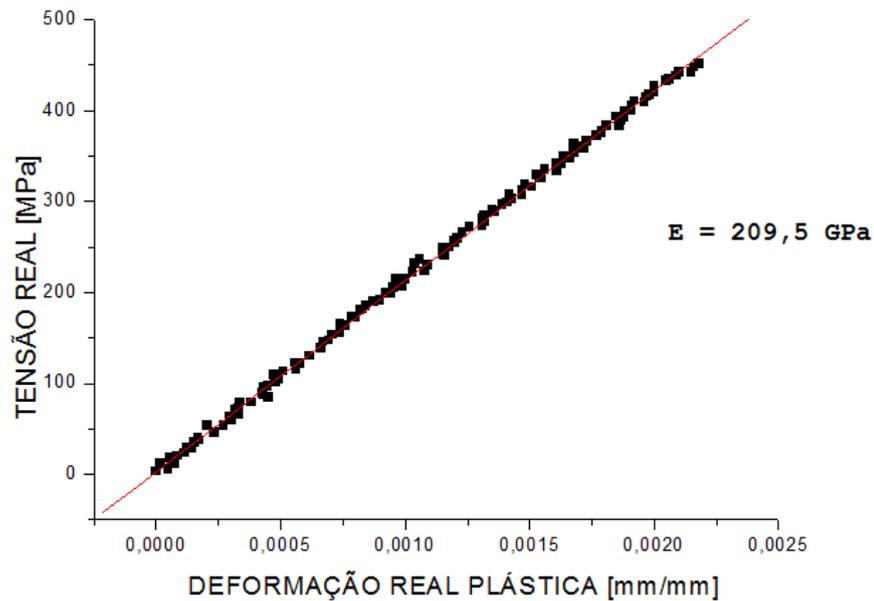
As Figuras 17 e 18 mostram as curvas do ensaio de tração para a determinação do coeficiente de encruamento ( $n$ ) e coeficiente de resistência ( $K$ ), e o módulo de elasticidade ( $E$ ), respectivamente.

Figura 17: Curva Log da Tensão Real x Log da Deformação Real Plástica do ensaio de tração, para determinação do coeficiente de encruamento ( $n$ ) e coeficiente de resistência ( $k$ ).



Fonte: (Próprio Autor)

Figura 18: Curva tensão real x deformação real do ensaio de tração, para determinação do módulo de elasticidade (E).



Fonte: (Próprio Autor)

As Figuras 17 e 18 indicam que o material em estudo apresenta uma alta capacidade de deformação pois os diagramas tensão-deformação apresentam variações relativamente pequenas na tensão, acompanhadas de grandes variações de deformação.

Pode-se notar também na Figura 16, que o escoamento é bem definido caracterizado por um aumento relativamente grande na deformação, acompanhado por uma pequena variação de tensão.

Dessa forma, pode-se concluir que estas características encontradas nas curvas do ensaio de tração comprovam que o aço X70 em estudo, está de acordo com a norma API 5L.

Tabela 5: Propriedades mecânicas encontradas através do ensaio de tração.

tensão máx. convencional (MPa)	tensão máx. real (MPa)	deformação convencional (mm)	deformação real (mm)	limite de escoamento (MPa)	tensão de escoamento /tensão máxima
568,1	654	0,329	0,146	504,642	0,88

Através da razão elástica definida pela relação entre os limites de escoamento e tensão máxima é possível garantir o escoamento plástico para situações inesperadas de sobrecarga, isso significa que o escoamento deve ser suficiente para gerar uma acentuada

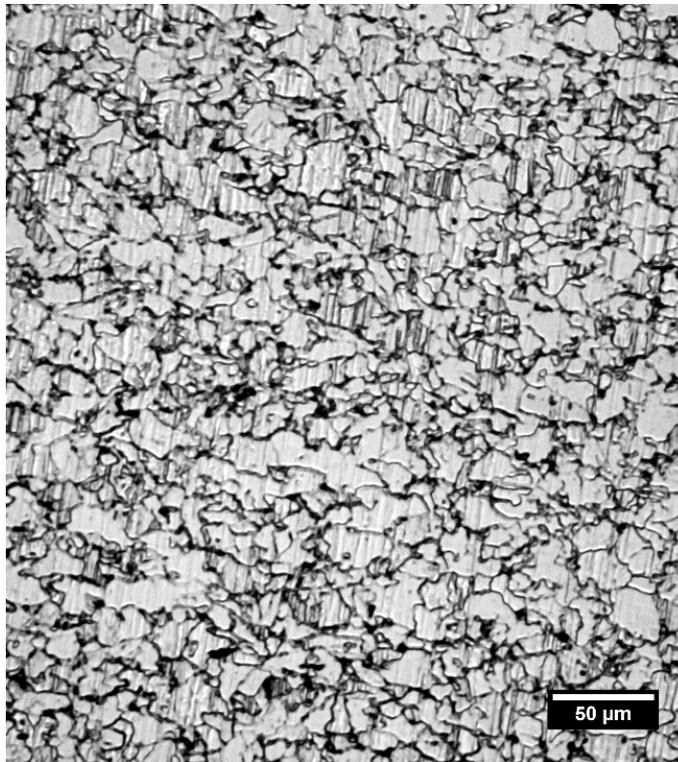
deformação plástica sem, no entanto, vir a falhar repentinamente. Segundo a norma API 5L é recomendável uma razão elástica de 0,8.

## 5.2 Ensaio Metalográfico

A microestrutura da amostra do metal base retirada na direção longitudinal e na direção transversal é mostrada na Figura 19 e na Figura 20, respectivamente. A análise na direção longitudinal revela uma microestrutura composta predominantemente por ferrita (área clara) e, em menor quantidade, por perlita (área escura). Isso é devido ao baixo teor de carbono, característico do aço API 5L X70, indicando uma microestrutura pouco bandeada e refinada.

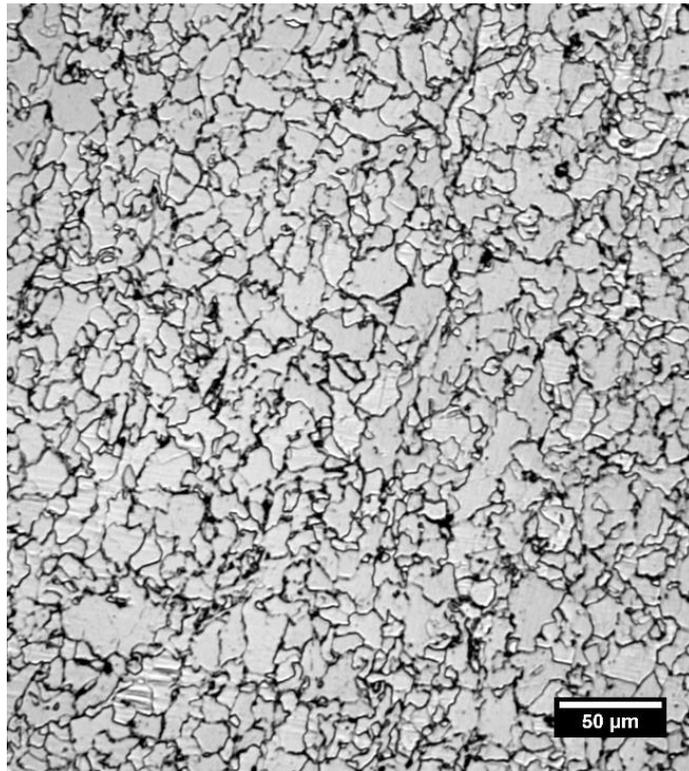
Nota-se também que essa microestrutura à base de ferrita e perlita, sem presença de ferrita acicular, tanto na direção longitudinal, quanto na direção transversal, indica que o aço foi laminado convencionalmente a quente sendo posteriormente tratado termicamente por normalização.

Figura 19: Microestrutura do metal base na direção longitudinal (200x).



Fonte: (BARBOSA,2014)

Figura 20: Microestrutura do metal base na direção transversal (200x).



Fonte: (BARBOSA,2014)

## 6 CONCLUSÕES

Por meio da avaliação dos resultados obtidos neste trabalho foi possível concluir que:

- As propriedades mecânicas do aço API X70 após conformação em tubo estão de acordo com a norma API 5L. Constata-se tal fato na análise da curva de tensão-deformação a qual indica que o material apresenta uma alta capacidade de deformação e escoamento bem definido, o que garante uma acentuada deformação plástica sem antes vir a falhar.
- Além de comprovar uma elevada ductilidade, pois o material apresentou um grande alongamento total, comparado a baixa variação de tensão.
- A análise microestrutural revelou a presença dos constituintes ferrita e perlita, típico de aço com pequena quantidade de carbono. Na comparação entre as microestruturas longitudinal e transversal constata-se suave deformação dos grãos da primeira como consequência do processo de laminação termo-mecânica, que vem ao encontro da norma API 5L, que recomenda até 10% de anisotropia.

## REFERÊNCIAS

AGUIAR, A. C. C. **Análise estrutural de tubos expansíveis para poços de petróleo;** Projeto final do curso de Engenharia de Petróleo, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008.

API 5L. **Specification for Line Pipe Steel.** Estados Unidos, 42<sup>th</sup> Edition, New York, 2004.

ASTM E8M. **Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials.**

ASTM E606. **Standard Test Methods for Strain-Controlled Fatigue Testing.**

ASTM E646. **Standard Test Methods for Tensile Strain-Hardening Exponents (n-Values) of Metallic Sheet Materials.**

ASTM E3. **Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens.**

BARBOSA, V. S. **Avaliação da integridade estrutural em um tubo de aço API 5L X70 através da propagação de trincas por fadiga;** Dissertação de mestrado, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, 2014.

CAMADA PRÉ-SAL. Disponível em [http://www.suapesquisa.com/geografia/petroleo/camada\\_pre\\_sal.htm](http://www.suapesquisa.com/geografia/petroleo/camada_pre_sal.htm) Acessado em 15 de novembro de 2014.

CEGLIAS, R. B. **Análise de tensão residual em tubo de aço API 5L X70;** Dissertação de mestrado, Instituto Militar de Engenharia, 2012.

HAUS, S. A. **Influência do efeito baushinger no retorno elástico em aços avançados de elevada resistência;** Universidade Federal do Paraná, 2011.

JÚNIOR, E. H. **Investigação experimental do comportamento dúctil de aços API-X70 e aplicação de curvas de resistência  $J-Aa$  para previsão de colapso em dutos;** Tese para obtenção do título de doutor em engenharia, Universidade de São Paulo, 2004.

KIRKWOOD, P.R.; TAIT, W.P. **Developments in welding consumables for the seam welding of high strength X70 line pipe;** Paper 33 IIW, pp. 299-306, 1996.

LOPES, I. F. G. **Estudo da característica morfológica do aço API 5L X-70 processado por laminação controlada**; Universidade Estadual de Ponta Grossa, 2010.

PRÉ-SAL. Disponível em <<http://www.petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/areas-de-atuacao/exploracao-e-producao-de-petroleo-e-gas/pre-sal/>> Acessado em 15 de novembro de 2014.

SOLOSANDO, S. G. **Efeito Bauschinger em aços inoxidáveis**; Relatório final do projeto de iniciação científica, Centro Universitário da FEI, 2007.

SORRIJA, B. A. **Caracterização microestrutural de junta soldada com arco submerso e análise da propagação de trincas em um tubo de aço API X70**; Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, 2012.

SOUZA, S. A. **Ensaio mecânicos de materiais metálicos. Fundamentos teóricos e práticos**; 5ª edição, São Paulo, 1982.

THIAGO, V. L. **Avaliação de integridade em dutos com danos de deformação plástica causados por sobrecarga do solo**; Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011.

VILAS BÔAS, A. C. C. **Comportamento mecânico e de corrosão do aço X70 sob carregamento cíclico simulando o bobinamento de tubos**; Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, 2012.

ZILIO, J. L. **Avaliação da Resistência à corrosão-fadiga no aço API 5L X60 em meio aquoso salino**; Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2013.