



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

**ESTUDO DO EFEITO BAUSCHINGER EM TUBOS DE AÇO API  
5L X70 APLICADOS NO TRANSPORTE DE PETRÓLEO E GÁS**

**Guilherme Matos de Vasconcelos**

**Guaratinguetá  
2015**

GUILHERME MATOS DE VASCONCELOS

ESTUDO DO EFEITO BAUSCHINGER EM TUBOS DE AÇO API 5L X70  
APLICADOS NO 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

V331e Vasconcelos, Guilherme Matos de  
Estudo do efeito Bauschinger em tubos de aço API 51 x70 aplicados no transporte de petróleo e gás / Guilherme Matos de Vasconcelos – Guaratinguetá, 2015.  
68 f. : il.  
Bibliografia: f. 66-68

Trabalho de Graduação em Engenharia de Materiais – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2015.  
Orientador: Prof. Dr. Marcelino Pereira do Nascimento

1. Tubos 2. Aço – propriedades mecânicas 3. Gás 4. Petróleo  
5. Oleodutos de petróleo I. Título

CDU 621.643.2

**ESTUDO DO EFEITO BAUSCHINGER EM TUBOS DE AÇO API 5L X70**  
**APLICADOS NO TRANSPORTE DE PETRÓLEO E GÁS**

**Guilherme Matos de Vasconcelos**

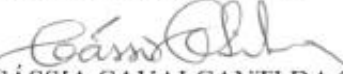
ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO  
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE  
"GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA"

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 PEREIRA DO NASCIMENTO  
Orientador/UNESP-FEG

  
Profª. MSc Cássia CAVALCANTI DA SILVA  
UNESP-FEG1

  
Eng. BRUNO ANTONIO SORRIJA  
UNESP-FEG

**Dezembro de 2015**

## **DADOS CURRICULARES**

***Guilherme Matos de Vasconcelos***

NASCIMENTO	13.08.1991 – São Paulo/ SP
FILIAÇÃO	Irineu Rodrigues de Vasconcelos Elis Regina Pereira Matos de Vasconcelos
2010/2014	Curso de Graduação Engenharia de Materiais – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho – Campus de Guaratinguetá

## ***AGRADECIMENTOS***

Guilherme Matos de Vasconcelos

Aos meus pais Irineu e Elis, pelo apoio, amor e pelos ensinamentos desde o começo da minha vida.

À minha irmã mais nova, Mariana, por ter me feito aprender a ter responsabilidades para poder tomar conta dela quando meus pais estavam ausentes.

Ao professor Marcelino Pereira do Nascimento pelo tempo cedido e pelos aconselhamentos ao longo deste trabalho.

À minha namorada Daniela, pelo carinho, apoio e paciência durante todo este último ano.

A todos meus amigos, da faculdade e os mais antigos, que durante todos esses anos estiveram junto a mim.

E a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram com o meu trabalho de conclusão de curso e fazem parte da minha vida.

“Seja a mudança que você quer ver no mundo”

Mahatma Gandhi

VASCONCELOS, G. M. **Estudo do Efeito Bauschinger em tubos de aço API 5L X70 aplicados no transporte de petróleo e gás.** 68f. 2015. Trabalho de Graduação em Engenharia de Materiais – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

## RESUMO

Apesar da crescente preocupação em buscar fontes de energia mais sustentáveis, a demanda de petróleo tende a crescer nos próximos anos. Para acompanhar esse crescimento, a indústria do petróleo tem investido cada vez mais em inovação e eficiência. Frente a isso, novas tecnologias têm sido desenvolvidas para explorar águas mais 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 vêm sendo estudadas e aperfeiçoadas. Neste trabalho foi analisado o Efeito Bauschinger no aço API 5L X70, comprovando que houve uma redução no limite de escoamento quando foi aplicado um esforço em um sentido prévio e logo em seguida foi aplicado um esforço em um sentido contrário ao prévio. Para observar esse fenômeno, foi realizado o ensaio de tração para determinar as propriedades mecânicas do metal base, como tensão de escoamento, resistência à tração, módulo de elasticidade e tensão máxima, para posterior comparação com os resultados obtidos pelo ensaio de Efeito Bauschinger. As análises de resultados mostraram que o aço apresenta elevada resistência, com ótima capacidade de deformação plástica sem falhar e limite de escoamento bem definido, mostrando-se adequado para a aplicação de tubos de petróleo e gás.

**PALAVRAS-CHAVE:** Efeito Bauschinger. Aço API 5L X70. Propriedades Mecânicas. Tubos de Petróleo e Gás.



VASCONCELOS, G. M.. **Study of the Bauschinger Effect in API 5L X70 steel pipes used in the transport of oil and gas.** 68p. 2015. Work Undergraduate Materials Engineering-Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

### **ABSTRACT**

Despite the growing concern in seeking more sustainable energy sources, oil demand is likely to grow in coming years. To keep up with this growth, the oil industry has increasingly invested in innovation and efficiency. Knowing that, new technologies have been developed to explore deeper waters, without giving up the best practices in worldwide operational safety. The use of rigid pipelines in deepwater offshore facilities is increasing quickly and because of this, the ways of storing and launching pipe have been studied and perfected. In this paper the Bauschinger effect on API 5L X70 steel was analyzed proving that there was a reduction in yield strength when an effort was applied in a previous direction, then an effort was then applied in the opposite direction. To observe this phenomenon, the tensile test was conducted to determine the mechanical properties of the base metal, such as yield stress, tensile strength, elasticity and maximum tensile, so then compare it with the results obtained in the Bauschinger Effect Test. The analysis results showed that the steel had high resistance, with good plastic deformation capacity without failing, well-defined yield point, showing itself appropriate for the operation of oil and gas pipes.

**KEYWORDS:** Bauschinger Effect. Steel API 5L X70. Mechanical Properties. Pipes for Gas and Petroleum.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Gráfico da evolução da demanda mundial de petróleo .....	15
Figura 2: Dutos empilhados prontos para a conexão ou soldagem. ....	16
Figura 3: Navio utilizado no lançamento de dutos pelo método carretel. ....	17
Figura 4: Sistema de proteção catódica de anodo de sacrificio em água do mar .....	24
Figura 5: Sistema de proteção catódica de corrente impressa .....	25
Figura 6: Ilustração esquemática da laminação controlada com e sem o processo de resfriamento acelerado.....	27
Figura 7: Linha de fabricação de um tubo pela conformação U-O-E: .....	28
Figura 8: Curvamento pelo processo de aquecimento por indução.....	29
Figura 9 Curva Tensão-Deformação convencional típica de um material metálico .....	31
Figura 10: Tensão de escoamento e limite de escoamento convencional .....	32
Figura 11: Curva de Tensão-Deformação convencional típica de material metálico, mostrando a definição de módulo de elasticidade (E), do limite de resistência ( $S_{LR}$ ) e do limite de ruptura ( $S_f$ ).....	34
Figura 12: Representação do comportamento uniaxial durante a deformação no sentido inicial e reverso, mostrando o efeito Bauschinger.....	36
Figura 13: Curva do ensaio de efeito Bauschinger.....	37
Figura 14: Representação esquemática do modelo composto. ....	39
Figura 15: Representação esquemática de um empilhamento de discordâncias e uma linha móvel de discordâncias interagindo com vários pontos sensíveis de discordâncias. ....	40
Figura 16: Oxiorte do anel feito com o aço API 5L X70 .....	42
Figura 17: Rugosímetro Surf test 301 .....	43
Figura 18: Máquina Instron 8801 .....	44
Figura 19: Foto de dois dos copos de prova utilizados.....	45
Figura 20: Representação das medidas dos corpos de prova.....	45
Figura 21: Curva Tensão-Deformação Convencional e Real da amostra 1 .....	47
Figura 22: Curva Tensão-Deformação da zona elástica da amostra 1 para a obtenção do módulo de elasticidade (E).....	48
Figura 23: Curva log da Tensão Real x log da Deformação Real da zona plástica da curva de Tensão-Deformação da amostra 1 para a obtenção do coeficiente de encruamento (n) e do coeficiente de resistência (K) .....	48

Figura 24: Curva Tensão-Deformação Convencional e Real da amostra 2 .....	49
Figura 25: Curva Tensão-Deformação da zona elástica da amostra 2 para a obtenção do módulo de elasticidade (E) .....	49
Figura 26: Curva Log da Tensão Real x Log da Deformação Real da zona plástica da curva de Tensão-Deformação da amostra 2 para a obtenção do coeficiente de encruamento (n) e do coeficiente de resistência (K) .....	50
Figura 27: Curva Tensão-Deformação Convencional e Real da amostra 3 .....	50
Figura 28: Curva Tensão-Deformação da zona elástica da amostra 3 para a obtenção do módulo de elasticidade (E) .....	51
Figura 29: Curva Log da Tensão Real x Log da Deformação Real da zona plástica da curva de Tensão-Deformação da amostra 3 para a obtenção do coeficiente de encruamento (n) e do coeficiente de resistência (K) .....	51
Figura 30: Curva do ensaio de efeito Bauschinger (tração-compressão de 1% de deformação) da amostra 1.....	54
Figura 31: Gráfico de Log da tensão real por Log da deformação real da parte trativa do ensaio de efeito Bauschinger da amostra 1.....	55
Figura 32: Gráfico de Log da tensão real por Log da deformação real da parte compressiva do ensaio de efeito Bauschinger da amostra 1.....	56
Figura 33: Curva do ensaio de efeito Bauschinger (tração-compressão de 1% de deformação) da amostra 2.....	56
Figura 34: Gráfico de Log da tensão real por Log da deformação real da parte trativa do ensaio de efeito Bauschinger da amostra 2.....	57
Figura 35: Gráfico de Log da tensão real por Log da deformação real da parte compressiva do ensaio de efeito Bauschinger da amostra 2.....	58
Figura 36: Curva do ensaio de efeito Bauschinger (tração-compressão de 1% de deformação) da amostra 3.....	58
Figura 37: Gráfico de Log da tensão real por Log da deformação real da parte trativa do ensaio de efeito Bauschinger da amostra 3.....	59
Figura 38: Gráfico de Log da tensão real por Log da deformação real da parte compressiva do ensaio de efeito Bauschinger da amostra 3.....	60

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Graus dos aços API e suas respectivas tensões de escoamento em ksi e MPa.....	19
Tabela 2 Composição do aço API 5L X70.....	21
Tabela 3: Propriedades mecânicas e limites de composição do aço API 5L X70.....	22
Tabela 4: Composição química do tubo de aço API X70.....	41
Tabela 5: Procedimento de lixamento para ensaios de tração.....	42
Tabela 6: Tensões e deformações obtidas nos ensaios de tração .....	52
Tabela 7: Módulos de elasticidade e coeficientes obtidos nos ensaios de tração.....	53
Tabela 8: Tensão limite de escoamento, tensão limite na reversão, tensão limite na compressão e os parâmetros $BE_{T-C}$ e $BEF_{T-C}$ .....	61
Tabela 9: Coeficientes de encruamento e coeficientes de resistência nos ensaios nas partes tratativas e compressivas do ensaio.....	61

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A – Área

$A_0$  – Área da seção transversal

API – American Petroleum Institute

ARBL – Alta Resistência e Baixa Liga

e – Defrormação

$\varepsilon$  – 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

1.	INTRODUÇÃO .....	14
2.	OBJETIVO .....	18
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	19
3.1	SISTEMA DE CODIFICAÇÃO API ( <i>AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE</i> )	19
3.2	AÇO API 5L X70 .....	20
3.3	PROTEÇÃO SUPERFICIAL CONTRA CORROSÃO .....	22
<b>3.3.1</b>	<b>Proteção catódica .....</b>	<b>22</b>
<b>3.3.2</b>	<b>Inibidores de corrosão .....</b>	<b>25</b>
3.4	PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE TUBOS .....	26
<b>3.4.1</b>	<b>Laminação Controlada .....</b>	<b>26</b>
<b>3.4.2</b>	<b>Conformação U-O-E .....</b>	<b>27</b>
3.5	ENSAIO DE TRAÇÃO .....	29
<b>3.5.1</b>	<b>Definição de tensão e deformação convencionais.....</b>	<b>30</b>
<b>3.5.2</b>	<b>Tensão e deformação verdadeiras .....</b>	<b>30</b>
<b>3.5.3</b>	<b>Curva de tensão e deformação .....</b>	<b>31</b>
3.6	EFEITO BAUSCHINGER .....	35
<b>3.6.1</b>	<b>Mecanismo do Efeito Bauschinger .....</b>	<b>38</b>
4.	MATERIAIS E METODOLOGIA .....	41
4.1	MATERIAIS .....	41
4.2	MÉTODOS .....	43
<b>4.2.1</b>	<b>Ensaio de Tração.....</b>	<b>43</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Ensaio de efeito Bauschinger .....</b>	<b>46</b>
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	47
5.1	ENSAIO DE TRAÇÃO .....	47
5.2	ENSAIO DE EFEITO BAUSCHINGER .....	54
6.	CONCLUSÕES .....	65
	<u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</u>	<u>66</u>

## 1. INTRODUÇÃO

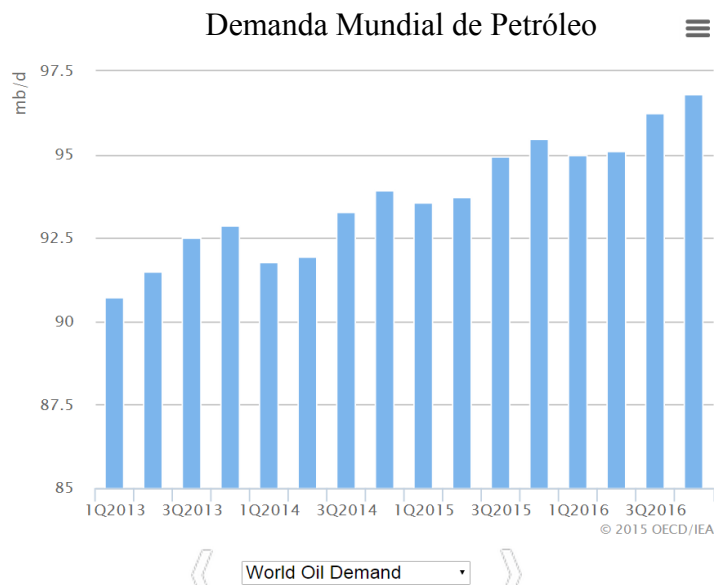
Substância oleosa e inflamável, o petróleo é a principal fonte de energia na atualidade. O fato de ser um recurso esgotável, aliado ao seu grande valor econômico, fez com que esse combustível se tornasse um elemento causador de grandes mudanças geopolíticas e socioeconômicas em todo o mundo (PETRÓLEO).

O primeiro poço de petróleo foi descoberto nos Estados Unidos– Pensilvânia – no ano de 1859. Ele foi encontrado em uma região de pequena profundidade, 21m, ao contrário das escavações de hoje, que ultrapassam os 6000 metros. O maior produtor e consumidor mundial são os Estados Unidos e, por esta razão, necessitam importar cada vez mais (PETRÓLEO). No Brasil, a primeira sondagem foi realizada em São Paulo, entre 1892-1896, por Eugênio Ferreira de Camargo, quando ele fez a primeira perfuração na profundidade de 488 metros; contudo, o poço jorrou somente água sulfurosa. Foi somente no ano de 1939 que foi descoberto o óleo de Lobato na Bahia (PETRÓLEO).

A demanda por petróleo está avançando em um ritmo acelerado nos últimos cinco anos, impulsionada pela queda do preço do barril para menos de US\$ 50. A Agência Internacional de Energia (AIE) prevê que a demanda aumentará em 1,7 milhão de barris por dia (bpd) em 2015, chegando aos 95 milhões de barris por dia. Para 2016, a previsão é que a demanda aumente 1,4 milhão de bpd (OMRPUBLIC). A Figura 1 apresenta um histograma da demanda mundial de petróleo no último triênio.



Figura 1: Gráfico da evolução da demanda mundial de petróleo



Fonte: (OMRPUBLIC)

Com esse aumento, as empresas de petróleo buscam intensificar esforços para acompanhar a demanda mundial. Tais esforços têm sido feitos na área de exploração e produção (E&P), especialmente na descoberta e no desenvolvimento de novas reservas, e na superação de desafios através do aumento de eficiência, do desenvolvimento de novas tecnologias e da redução de custos (AGUIAR, 2008).

Além disso, esforços extensivos têm sido tomados para o fornecimento de petróleo e gás natural de modo mais econômico e seguro desde os centros produtores até aos grandes centros consumidores. Conseqüentemente, tubos de aço de grandes diâmetros e de espessura reduzida, alta resistência mecânica e com elevados limites de escoamento têm sido empregados em sistemas de dutos terrestres e submarinos para operarem sob elevadas pressões na linha. Atualmente, o modal dutoviário constitui a forma mais segura e eficiente de transportar os produtos de petróleo, uma vez que, por ora, não foi disponibilizado para a sociedade outro meio mais otimizado em termos de operação e economia (BARBOSA, 2014).

Em alto mar, o transporte do petróleo extraído é feito por dutos rígidos ou flexíveis. O processo de instalação dos mesmos é muito complexo, pois depende do tipo de tubulação que vai ser utilizada e também há muitas variáveis a serem consideradas (VILAS BÔAS, 2012).

Nos últimos anos, a utilização de tubos rígidos vem aumentando visto que o seu uso é limitado apenas pelo tamanho da embarcação a qual realiza a instalação. Em contrapartida, os tubos flexíveis estão em decadência devido à sua limitação de profundidade, já que cada vez mais as explorações ocorrem em águas mais e mais profundas (VILAS BÔAS, 2012).

Até pouco tempo atrás, a forma de lançamento de tubos de extração de petróleo mais utilizada consistia em, primeiramente, armazenar dutos empilhando-os em navios ou plataformas, como se pode observar na Figura 2, e posteriormente lançá-los ao mar por meio da soldagem. Todavia, esse método demandava muito tempo além de ter um elevado custo, já que era necessária muita mão de obra para realizar a instalação. Assim a indústria do petróleo tem dado preferência atualmente para os dutos contínuos enrolados em carretéis em terra, pois são de mais fácil instalação, apesar de demandarem navios especiais para carregar esses dutos. Esse método é denominado Carretel ou *Reel-Lay*, como mostra a Figura 3. O inconveniente desse método é que ele aplica uma 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 mecânica, a ductilidade, a tenacidade, a resistência ao colapso e a suscetibilidade à corrosão do aço (SANTOS, 2014).

Figura 2: Dutos empilhados prontos para a conexão ou soldagem.



Fonte: (BRASIL ESCOLA)

Figura 3: Navio utilizado no lançamento de dutos pelo método carretel.



Fonte: (OCEANICA)

## **2. OBJETIVO**

O objetivo principal deste trabalho é estudar a ocorrência do efeito Bauschiger em tubos de aço API 5L X70, utilizados na condução de petróleo e gás em dutos submarinos, avaliando o efeito da deformação imposta de forma uniaxial, tanto no sentido da tração quanto no da compressão. Assim, pretende-se observar o fenômeno da redução do limite de escoamento do material em decorrência da aplicação do carregamento reverso nesses tubos, como ocorre com os dutos contínuos enrolados em carretéis.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

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

O sistema de codificação API é representado por uma letra seguida de um número, o qual se refere ao limite de escoamento do material em ksi (milhares de libras por polegada quadrada). Os tubos aplicados à extração e condução de petróleo e gás normalmente são codificados por esse sistema. No caso do aço em estudo, o API 5L X70, tem-se tensão mínima de escoamento de 70 ksi (VILAS BÔAS, 2012).

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 e suas respectivas tensões de escoamento em ksi e MPa

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

Fonte: (API 5L)

A classe dos tubos petrolíferos é dividida 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 indicam o limite de escoamento, em ksi (SANTOS, 2014);

- 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 (SANTOS, 2014);
- Tubos para perfuração de poços, ou *drill pipe*, são conectados um ao outro através da soldagem de uma peça em suas extremidades 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 5L X70

Para fabricar tubos de grande espessura, é preciso que sejam utilizados aços de alta resistência mecânica à tração, como os aços da série API 5L X70. Devido ao seu perfil de uso, as especificações internacionais requerem elevadas propriedades de impacto tanto para o aço em si, quanto para as suas soldas. Essas rigorosas exigências refletem a necessidade dos aços e das suas juntas soldadas possuírem uma baixa temperatura de transição, devido ao seu uso em regiões frias, e também alta resistência ao impacto, já que as elevadas tensões de aplicação podem contribuir para a ocorrência de falha no modo dúctil de propagação de trincas (KIRKWOOD, 1996).

A primeira aplicação do ao API 5L X70 foi na construção de dutos de transporte de gás nos anos de 1970 na Alemanha. Isso apenas foi possível com o aprimoramento das técnicas de laminação controlada e, desde então, a classe dos aços X70 vem sendo utilizada em inúmeros projetos de dutos de petróleo e gás devido não só às suas propriedades, mas também pela sua confiabilidade (KIRKWOOD, 1996).

O API 5L X70 é classificado com um aço de Alta Resistência e Baixa Liga (ARBL), os quais são aços microligados que apresentam uma microestrutura típica de ferrita-perlita e baixa concentração de elementos de liga, ou seja, ele se assemelha à um aço de baixo carbono com microadições de cerca de 0,1% de elementos como o Nb, o Ti e o V, adições essas que proporcionam propriedades mecânicas superiores, como boa soldabilidade e tenacidade à fratura, aos aços ARBL. Essas ótimas propriedades mecânicas são originadas do efeito de endurecimento resultado da microadição de elementos de liga, mesmo com seu baixo teor de carbono (SANTOS, 2014).

A Tabela 2 mostra a composição química de uma amostra do aço API 5L X70.

Tabela 2: Composição do aço API 5L X70

C	Si	Mn	P	Al	Cu	S
0,14	0,27	1,45	0,01	0,05	0,03	0,00076
Nb	V	Ti	Cr	Ni	Mo	
0,051	0,041	0,018	0,0005	0,001	0,0045	

Fonte: (API 5L)

Para evitar a formação de gradientes de resistência nas soldas que possam comprometer a integridade do tubo, é imprescindível definir limites máximos de resistência mecânica no aço, já que normalmente há uma diferença entre as propriedades do metal base e do metal de adição (JUNIOR, 2004).

Há ainda a necessidade de que aços utilizados na fabricação de *risers* rígidos SCR (*steel catenary risers*) apresentem uma razão entre o limite de escoamento (L.E.) e o limite de resistência (L.R.) de cerca de 0,75, para garantir que o material do tubo suporte a deformação plástica, advinda do bobinamento, sem falhar (SANTOS, 2014).

A Tabela 3 mostra as propriedades mecânicas do aço API 5L – X70 e também os limites máximos de concentração de carbono e de alguns microligantes.

Tabela 3: Propriedades mecânicas e limites de composição do aço API 5L 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

Fonte: (API 5L)

### 3.3 Proteção superficial contra corrosão

Além dos inúmeros esforços a que esses tubos ficam submetidos, como no movimento das correntes marinhas e da maré que fazem com que os defeitos e as discontinuidades da solda virem concentradores de tensão podendo assim iniciar trincas que levam à falha do duto, há também o problema com o meio que eles ficam expostos. Para poder suportar esses efeitos o tubo, principalmente na parte da solda, não só tem que possuir determinadas propriedades mecânicas, mas também passar por processos que melhoram suas propriedades químicas superficiais (ZILIO, 2013).

O lado externo do tubo fica em contato com a água do mar que é conhecida por sua riqueza em cloretos na sua composição. Já o lado interno fica em contato com a água de produção, o petróleo extraído e alguns gases como o gás carbônico (CO<sub>2</sub>) e o gás sulfídrico (H<sub>2</sub>S). Para os dutos conseguirem suportar esse meio agressivo são utilizados principalmente dois tipos de proteção superficial: proteção catódica e os inibidores de corrosão (ZILIO, 2013).

#### 3.3.1 Proteção catódica

Para evitar a oxidação, a proteção catódica é um método clássico e eficiente e é usado para proteção anticorrosiva de tubulações e reservatórios subterrâneos. Trata-se de um sistema em que eletrodos são introduzidos na água do mar, próximos à tubulação que se



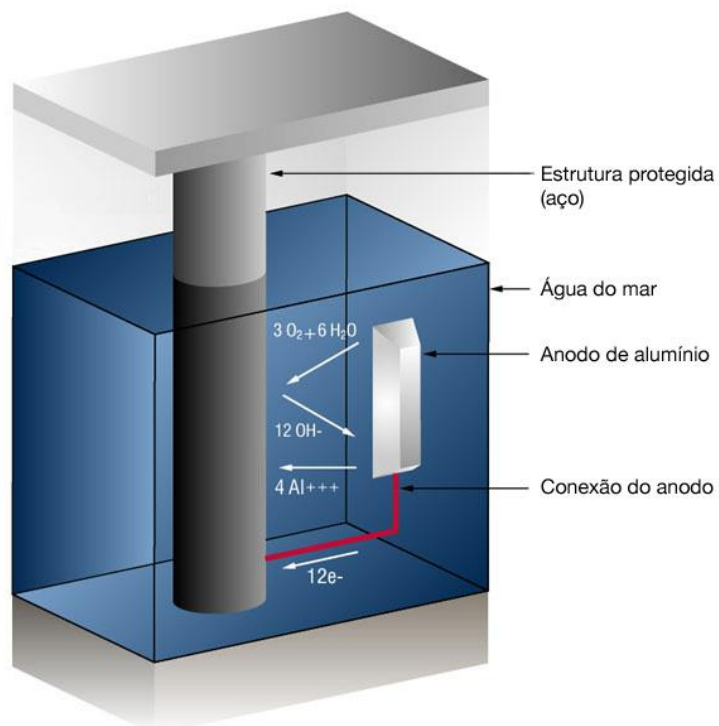
deseja proteger. Uma corrente elétrica é aplicada em ambos - eletrodos e tubulação - para se opor ao comportamento anódico da rede de tubos. Dessa forma, ela passa a operar como um catodo, em que não há oxidação (ZILIO, 2013).

Nas tubulações é preciso considerar ainda a corrosão das superfícies internas - normalmente evitada com pinturas e revestimentos anticorrosivos. O método de proteção catódica é um processo anticorrosivo ativo que complementa a proteção dada pelo revestimento externo e interno das tubulações - a energia elétrica necessária para proteger uma estrutura sem revestimento seria, em muitos casos, milhares de vezes superior. O sistema pode ser aplicado em gasodutos, polidutos, tanques de usos diversos etc (FRAUCHES-SANTOS, 2013).

Há dois tipos de proteção catódica para estruturas metálicas: galvânica e por corrente impressa.

Na proteção galvânica, ou por corrente de sacrifício, instala-se um ânodo galvânico paralelo à tubulação e assim a ligação da tubulação a ser protegida com o mar é feita por meio de um metal mais eletronegativo (ânodo galvânico) do que o duto. Com isso, a perda de elétrons da estrutura para o meio (o que causa a corrosão) é compensada pela ligação da estrutura metálica ao ânodo de sacrifício, que é normalmente um eletrodo de cobre e sulfato, magnésio ou alumínio. Assim, o direcionamento da corrente elétrica preserva a tubulação metálica, e a corrosão ocorre no ânodo (PROTECAO-CATODICA). A Figura 4 apresenta um sistema de proteção catódica de anodo de sacrifício.

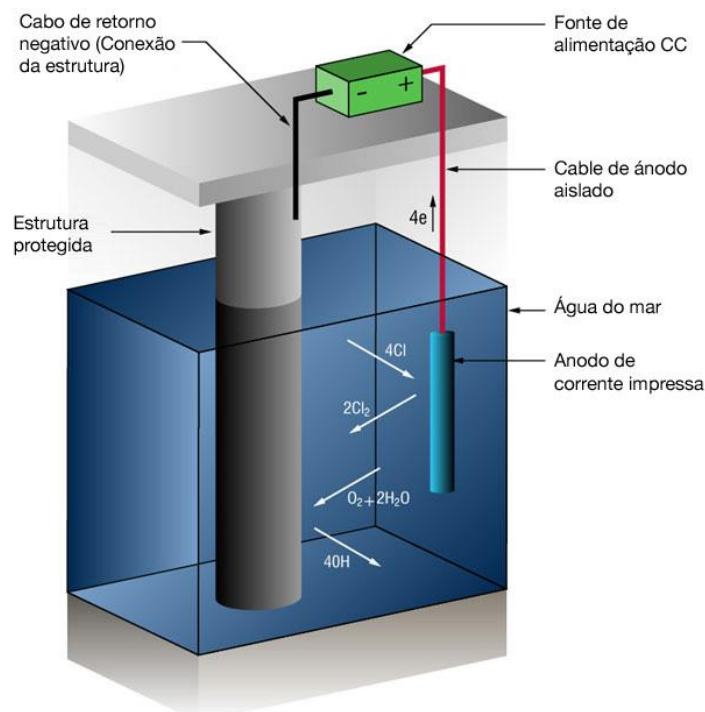
Figura 4: Sistema de proteção catódica de anodo de sacrifício em água do mar



Fonte: (PROTECAO-CATODICA)

Já na proteção por corrente impressa, a estrutura metálica é ligada a um retificador de corrente elétrica. Conforme o revestimento externo perde sua eficiência, é preciso aumentar a intensidade da corrente do retificador. O sistema tem a mesma função do anterior, transferir a corrosão a um ânodo submerso. Porém, ele utiliza uma fonte externa de energia, de corrente contínua, chamada de retificador. Dessa forma, se faz a ligação entre o ânodo instalado no solo e a tubulação (cátodo) a ser protegida (PROTECAO-CATODICA). A Figura 5 apresenta um sistema de proteção catódica por corrente impressa.

Figura 5: Sistema de proteção catódica de corrente impressa



Fonte: (PROTECAO-CATODICA)

### 3.3.2 Inibidores de corrosão

Neste processo, são utilizadas substâncias, orgânicas ou inorgânicas, que evitam ou reduzem a propagação das reações de corrosão quando adicionadas a um meio corrosivo. Esses inibidores aderem à superfície do material, no caso o duto, por meio da adsorção, criando assim um filme muito fino o qual resulta em uma redução na taxa de corrosão, pois esse filme acaba diminuindo tanto as reações anódicas quanto as catódicas (FRAUCHES-SANTOS, 2013).

### **3.4 Processo de fabricação de tubos**

O termo “tubulações” se refere a um conjunto de dutos, que, por sua vez, é entendido como um equipamento industrial composto pela montagem sucessiva de vários segmentos de tubos iguais através da união dos mesmos por soldas circunferenciais, resultando em uma linha de condução efetiva de fluido (gás ou líquido). Portanto o tubo, que pode ser composto de inúmeros materiais em diferentes comprimentos, é a unidade básica para a construção de dutos (JUNIOR, 2004).

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 publicação. Com esse aumento na demanda, surgiu a necessidade de se desenvolver novos meios de produzir esses tubos de maneira mais eficiente. Assim, surgiram várias técnicas de produção nesse período. Uma delas utilizava uma chapa retangular, conformada em U que em seguida era submetida a um processo de soldagem longitudinal por sobreposição das bordas da chapa ao longo de todo o seu comprimento. Esse método é um precursor de um método muito utilizado atualmente, o método de conformação U-O-E (JUNIOR, 2004).

Todavia foi apenas na Segunda Guerra Mundial que, nos EUA, foram surgindo novas técnicas e tecnologias de construção de grandes extensões de tubulações, com a finalidade de transportar combustíveis por grandes distâncias, pois havia uma grande demanda por energia naquele período (SANTOS, 2014).

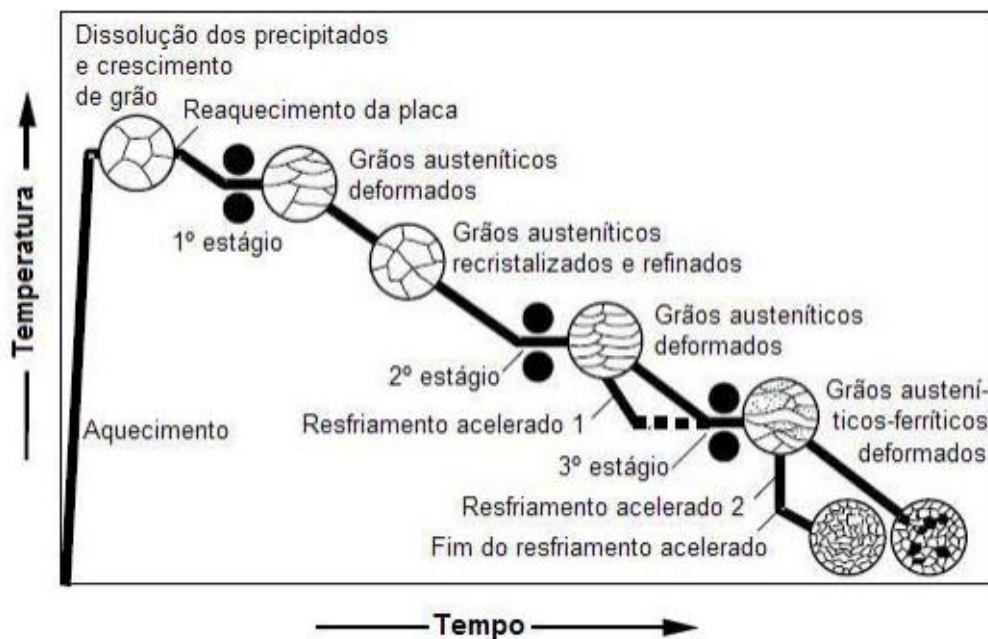
#### **3.4.1 Laminação Controlada**

A laminação controlada é um processo termomecânico muito utilizado na fabricação de aços microligados. Nela 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. Esse processo resulta em um aço com boa soldabilidade e baixo custo, já que contém baixa concentração de elementos de liga ou baixo carbono equivalente (LOPES, 2010).

Esse processo é composto basicamente por duas fases ou estágios: o primeiro estágio ou debaste e o segundo estágio ou acabamento (LOPES, 2010).

No primeiro estágio ou debaste, o material é submetido a temperaturas elevadas, entre 950°C e 1100°C, para o refinamento de grão através da completa recristalização da austenita após cada passe da laminação. Já no segundo estágio ou acabamento são explorados os efeitos que os elementos de liga (principalmente o Nb) têm de estabilizar a austenita e de retardar a sua recristalização, em temperaturas inferiores a 900°C. Ao final do processo, obtêm-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 6 (SANTOS, 2014).

Figura 6: Ilustração esquemática da laminação controlada com e sem o processo de resfriamento acelerado.



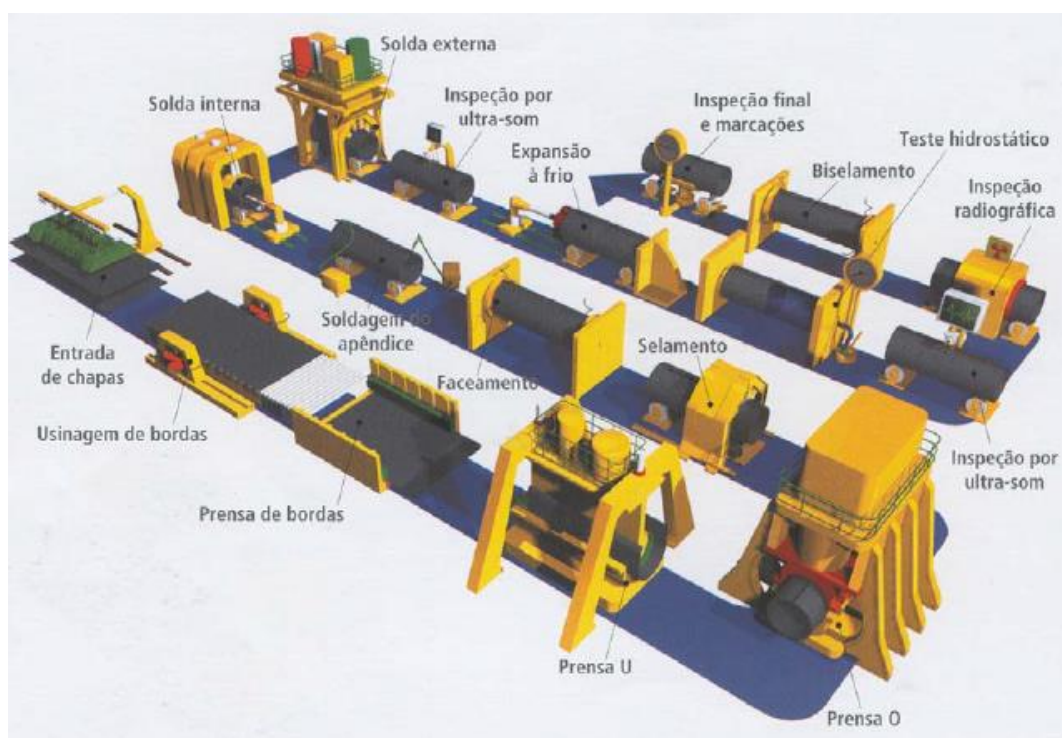
Fonte: (CEGLIAS, 2012)

### 3.4.2 Conformação U-O-E

Após realizada a laminação controlada, o material já está pronto para ser conformado na forma de tubo, normalmente pelo método de conformação U-O-E. Esse processo é feito

em etapas: na primeira, a chapa é dobrada por uma prensa, adquirindo o formato de “U”. Na segunda etapa, uma outra prensa dobra novamente a chapa, que está em forma de “U”, para essa adquirir um formato em “O”. Já na terceira etapa, a chapa em forma de “O” é soldada, pelo método de arco submerso (SAW - *Submerged Arc Welding*), para se tornar um tubo. Por último, após a soldagem, o tubo então é submetido a uma expansão para ajustar seu diâmetro às normas da API. A Figura 7 apresenta todo o processo de fabricação do tubo (JUNIOR, 2004).

Figura 7: Linha de fabricação de um tubo pela conformação U-O-E:

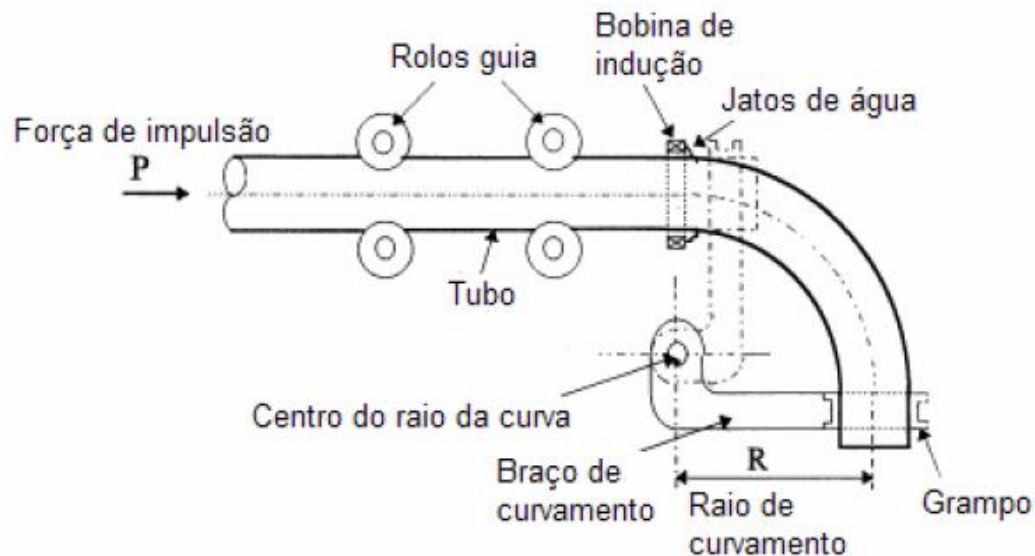


Fonte: (CEGLIAS, 2012)

Após essa conformação, o tubo passa por uma fase de curvamento por indução eletromagnética, que é a última até que o tubo vá para o mercado (SANTOS, 2014). O método de indução eletromagnética consiste em aquecer o material através de um campo magnético originado por uma corrente alternada de alta frequência em uma bobina geralmente de cobre. O tubo então passa por essa bobina, onde é aquecido, e posteriormente é levado para ser curvado por um carro propulsor que aplica um momento fletor no tubo.

Após ser curvado, o tubo então é resfriado por um jato de água ou ar para finalizar o processo (JUNIOR, 2004). Esse processo é representado na Figura 8.

Figura 8: Curvamento pelo processo de aquecimento por indução



Fonte: (CEGLIAS,2012)

### 3.5 Ensaio de Tração

Não existe ensaio mecânico que preveja completamente o real desempenho mecânico de um material, seja na etapa de produção (conformação, usinagem, etc.), seja na etapa de utilização (como elemento estrutural, peça automobilística, painel, etc.). No entanto, o ensaio de tração é considerado o teste mecânico que apresenta a melhor relação entre informações obtidas e custo/complexidade de ensaio. O ensaio de tração consiste, basicamente, em se tracionar um corpo de prova de seção reta retangular ou circular até a sua ruptura. Diversos parâmetros podem ser medidos. Aqui interessa fazer uma descrição dos parâmetros utilizados na teoria da conformação plástica dos metais e algumas características destes parâmetros (JUNIOR, 2004).

### 3.5.1 Definição de tensão e deformação convencionais

O comportamento mecânico de um material sob uma força de tração pode ser estudado com os conceitos 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 (SANTOS, 2014).

As definições desses parâmetros são representadas nas equações (1) e (2).

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

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

### 3.5.2 Tensão e deformação verdadeiras

Os parâmetros de tensão e deformação descritos nas equações (1) e (2) são muito utilizados no dimensionamento de componentes mecânicos, prática muito utilizada na engenharia. Porém esses parâmetros, que também são chamados de convencionais, não levam em conta a diminuição da área transversal do corpo de prova para compensar o aumento do comprimento e ainda não levam em conta também que o comprimento inicial de referência pode variar ao longo do ensaio devido às solicitações (JUNIOR, 2004).

Esses 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 (SANTOS, 2014).

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

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

Assumindo um volume constante durante o ensaio e considerando a variação da área da seção transversal, as equações (2) e (4) podem também ser representadas como nas equações (5) e (6), respectivamente (SANTOS, 2014).



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

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

Considerando que todo o corpo de prova sofre ação uniforme da força  $F$  trativa ao longo de seu comprimento e também o fato de o volume permanecer constante, é possível relacionar os parâmetros convencionais com os reais de acordo com as equações (7) e (8) a seguir (SANTOS, 2014).

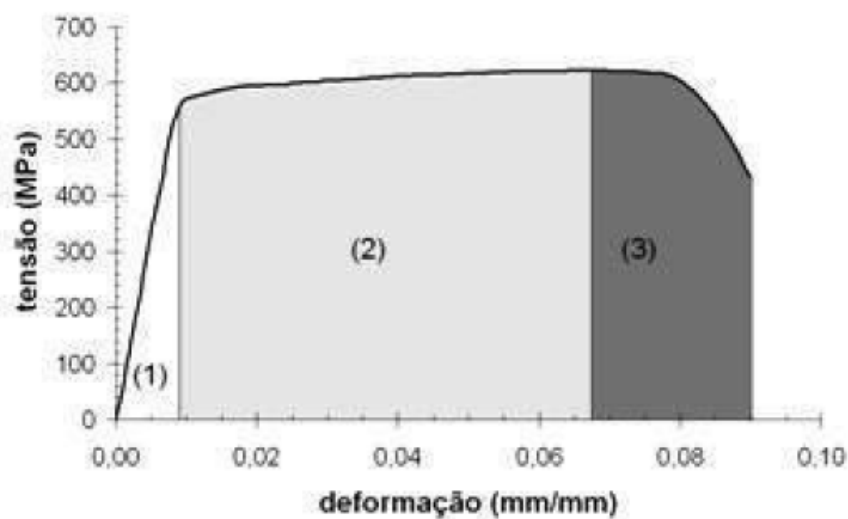
$$\sigma = S.(e + 1) \quad (7)$$

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

### 3.5.3 Curva de tensão e deformação

A obtenção da curva de tensão e deformação convencionais é feita com os dados obtidos no ensaio de tração, seguindo a norma ASTM E8M. Essa curva é dividida basicamente em 3 regiões, conforme apresentado na Figura 9.

Figura 9: Curva Tensão-Deformação convencional típica de um material metálico



Fonte: (SOLOSANDO, 2007)

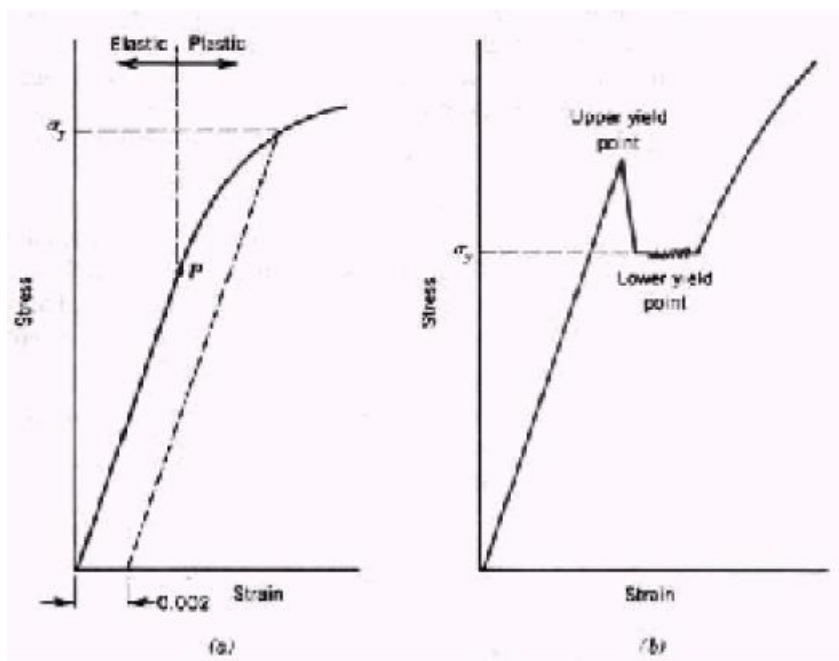
1ª) Região Elástica: nessa região o material apresenta um comportamento elástico, ou seja, o material se deforma com a aplicação de uma força mecânica e, após essa força parar de ser aplicada, o material retorna à sua forma original (SOLOSANDO, 2007). Neste trecho a curva obedece a “*Lei de Hooke*”.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (9)$$

Em que E, é denominado “Módulo de Elasticidade” ou “Módulo de Young” e pode ser determinado através da inclinação da curva tensão-deformação nessa região de comportamento linear;

2ª) Região de deformação plástica uniforme: nessa região o material, ao sofrer uma solitação, se deforma uniformemente mas, ao cessar dessa solitação, o material não retorna à sua forma original, permanecendo em sua forma final. Logo no início dessa região, há a transição da região elástica para plástica (SOLOSANDO, 2007). Essa transição pode ocorrer de forma gradativa (Figura 10a), ou de forma mais brusca (Figura 10b).

Figura 10: Tensão de escoamento e limite de escoamento convencional



Fonte: (JÚNIOR, 2004)

Nessa transição é definido parâmetro de limite de escoamento ( $\sigma_e$ ) que, no caso de 10a, corresponde à tensão necessária para causar 0,2% de deformação plástica permanente. Já no caso de 10b, há o limite de escoamento superior ( $\sigma_{es}$ ), que ocorre na tensão máxima suportada no regime elástico, e o limite de escoamento inferior ( $\sigma_{ei}$ ), que ocorre na tensão mínima do regime plástico (JÚNIOR, 2004).

Além disso, há dois parâmetros muito importantes no estudo da zona plástica da curva: o coeficiente de encruamento e o coeficiente de resistência. O encruamento do material é o endurecimento por deformação a frio, ou seja, quanto mais a força vai agindo sobre o corpo de prova, mais resistente ele vai se tornando. Este fenômeno pode ser observado pelo aumento contínuo da tensão, à medida que o ensaio se processa após o escoamento. Isto ocorre devido às interações entre as discordâncias que impedem o escorregamento dos planos cristalográficos, formando barreiras para a deformação (CIPRIANO,2008).

Podemos medir esse encruamento, representado por “n”, utilizando uma relação matemática empírica denominada equação de Hollomon, considerando que a parcela da curva tensão-deformação real ou verdadeira entre o escoamento e a estricção é representada pela equação exponencial (10) (CIPRIANO,2008).

$$\sigma_v = K \cdot \varepsilon^n \quad (10)$$

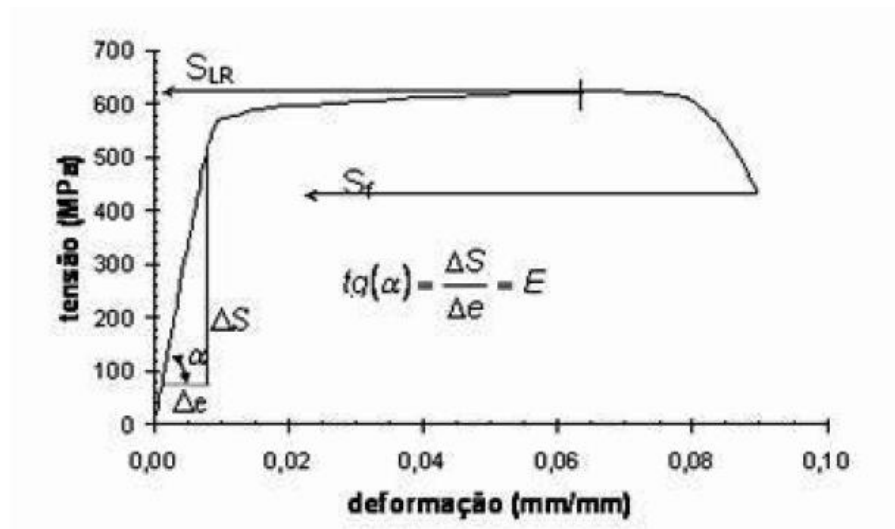
Sendo “K” o coeficiente de resistência, “ $\sigma_v$ ” a tensão verdadeira aplicada ao corpo de prova e “ $\varepsilon$ ” a deformação verdadeira sofrida pelo corpo de prova. Os valores de “K” e “n” são constantes do material, sendo que n é adimensional com valor sempre inferior a um [6]. Quanto maior o valor de “n”, mais encruado encontra-se o material e maior é o aumento das tensões no início da região de encruamento de um gráfico tensão versus deformação, considerando ensaios de carregamento e descarregamento sucessivos (CIPRIANO,2008).

Para determinar o coeficiente de encruamento através da curva tensão-deformação de engenharia temos que aplicar o logaritmo nos dois lados da equação (10), a fim de linearizá-la. Com isso se obtém a equação (11) .

$$\log \sigma_v = \log K + n \cdot \log \varepsilon \quad (11)$$

3ª) Região de deformação plástica não uniforme: após algum tempo de esforço mecânico na região plástica, ocorrem concentrações de deformações plásticas em alguns pontos do material e portanto essas regiões se deformam de maneira diferente do restante do material até que ocorra a fratura. É nessa região que se pode definir os parâmetros de limite de resistência convencional ( $S_{LR}$ ), limite de fratura ( $S_f$ ). O primeiro se refere à tensão máxima convencional suportada pelo material. Após esse parâmetro, o material passa a se deformar de maneira não uniforme até se romper sob uma tensão, essa tensão na hora da ruptura é o limite de fratura ( $S_f$ ). Ambos podem ser observados na Figura 11 (SOLOSANDO, 2007).

Figura 11: Curva de Tensão-Deformação convencional 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 desses parâmetros, é possível obter outras propriedades da curva de Tensão-Deformação que são imprescindíveis para se fazer qualquer projeto com o material.

Resistência Mecânica: capacidade do material metálico em resistir à deformação plástica (SOLOSANDO, 2007)..

Rigidez: capacidade de um material metálico deformar-se no trecho elástico. É associada ao parâmetro de módulo de elasticidade (E), quanto maior for o E, mais rígido será o material e menor será a sua deformação elástica quando solicitado por uma tensão (SOLOSANDO, 2007)..

Ductilidade: Capacidade de deformação plástica do material. É quantificado através do alongamento total do material, desconsiderando a deformação proveniente da deformação plástica (SOLOSANDO, 2007)..

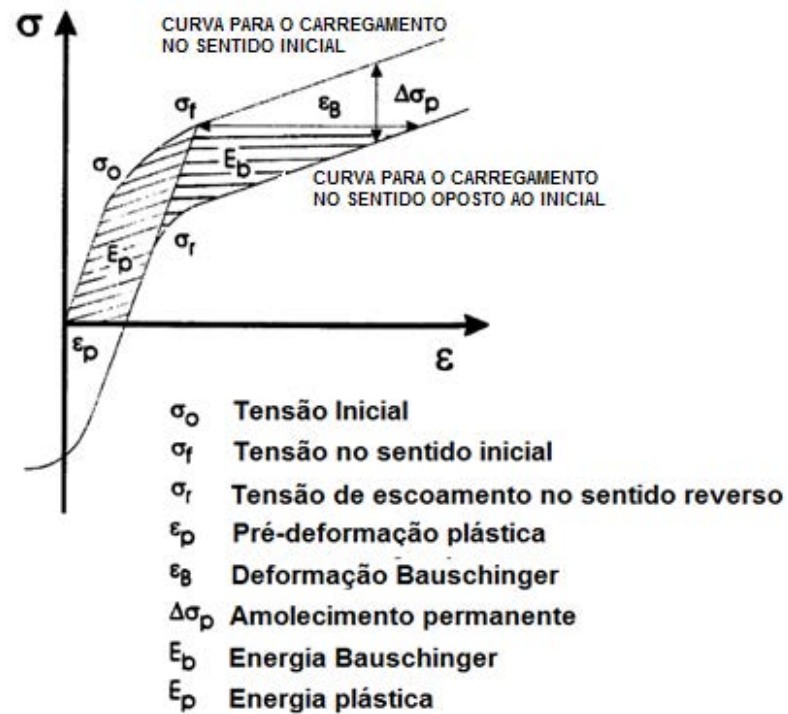
Resiliência: habilidade do material absorver energia no regime elástico. Pode ser quantificado pela área abaixo da curva Tensão-Deformação, mas somente na parte elástica (SOLOSANDO, 2007)..

Tenacidade: habilidade do material absorver energia no regime elástico e plástico. Pode ser quantificada pela área abaixo da curva Tensão-Deformação (SOLOSANDO, 2007).

### **3.6 Efeito Bauschinger**

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 (HAUS, 2011). A Figura 12 ilustra esse efeito.

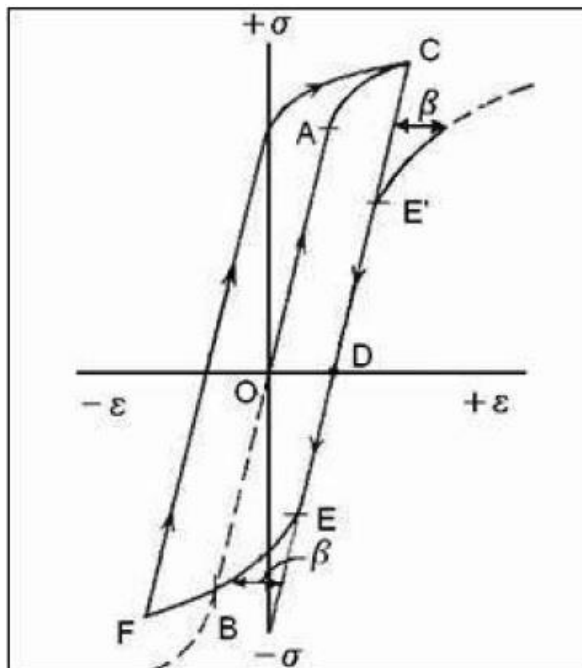
Figura 12: Representação do comportamento uniaxial durante a deformação no sentido inicial e reverso, mostrando o efeito Bauschinger



Fonte: (HAUS,2011)

Essa dependência do sentido do carregamento e o comportamento assimétrico das tensões são conhecidos como efeito Bauschinger. A Figura 13 ilustra uma curva de tensão-deformação em circuito de histerese e também a redução do limite de escoamento.

Figura 13: Curva do ensaio de efeito Bauschinger



Fonte: (SOLOSANDO, 2007)

Da Figura 13 é possível observar que tensão limite de escoamento sob o efeito de tração é A. Se o mesmo material dúctil fosse testado em compressão, a tensão de escoamento seria representada pelo ponto B (curva pontilhada) (SOLOSANDO, 2007).

Se for considerado então um corpo de prova sofrendo primeiramente tração e passando da tensão de escoamento (ponto A) até ponto C, ao longo do caminho O-A-C, e após chegar no ponto C a solicitação de tração for cessada, a curva então seguirá pelo caminho C-D. A partir do ponto D, uma tensão de compressão é aplicada e então a curva segue o caminho D-E-F e a tensão de escoamento de compressão nova será correspondente ao ponto E, portanto menor que a tensão limite de escoamento original de compressão (ponto B) (SOLOSANDO, 2007).

Uma maneira de quantificar o efeito Bauschinger é através do parâmetro BE (“Bauschinger Effect”) e BEF (“Bauschinger Effect Factor”). Esses parâmetros são representados pelas equações (12) e (13) a seguir.

$$BE_{t-c} = \frac{|S_{NA\_REVERSÃO}| - |S_{LE,COMPRESSÃO}|}{|S_{NA\_REVERSÃO}|} \quad (12)$$

$$BE_{c-t} = \frac{|S_{NA\_REVERSÃO}| - |S_{LE,TRAÇÃO}|}{|S_{NA\_REVERSÃO}|} \quad (13)$$

$$BEF_{t-c} = \frac{|S_{LE,COMPRESSÃO}|}{|S_{NA\_REVERSÃO}|} \quad (14)$$

$$BEF_{c-t} = \frac{|S_{LE,TRAÇÃO}|}{|S_{NA\_REVERSÃO}|} \quad (15)$$

Sendo  $S_{NA\_REVERSÃO}$  é a tensão limite de escoamento convencional no instante da reversão do carregamento e  $S_{NA,COMPRESSÃO}$  e  $S_{NA,TRAÇÃO}$  são respectivamente as tensões de tração e compressão convencionais na direção reversa. Portanto, quanto mais próximos os valores obtidos pelas equações (12) e (13) ou também pelas equações (14) e (15), menor será o efeito Bauschinger (SOLOSANDO, 2007).

### 3.6.1 Mecanismo do Efeito Bauschinger

Inicialmente acreditava-se que a causa do efeito Bauschinger era as tensões internas e tensões residuais macroscópicas desenvolvidas devido à deformação não homogênea de grãos individuais de um metal policristalino, 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 (SANTOS, 2014).

Basicamente, existem duas escolas principais para explicar o Efeito Bauschinger: teoria das tensões internas, e a teoria das discordâncias, além de um modelo composto proposto por MASING em 1926 (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,

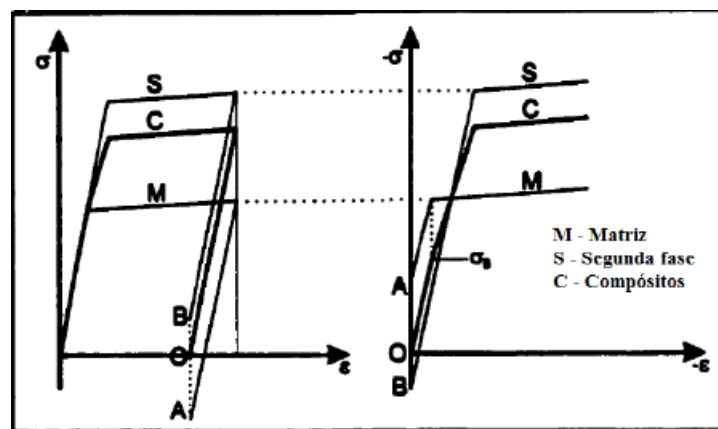


portanto, após a descarga, tensões residuais que surgem são responsáveis pelo efeito de redução da elasticidade ao se reverter a carga (HAUS,2011);

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).

Quando a amostra sofre a mesma pré-deformação em uma direção, se esta é suficientemente alta, a deformação plástica irá ocorrer na fase que tem o menor limite elástico, enquanto a outra irá se comportar de maneira elástica. Na descarga, quando a aplicação de carga é cessada, uma fase ou componente terá tensão de tração e a outra terá tensão residual de compressão. Na recarga, no mesmo sentido, ao mesmo nível de tensão, ambos irão se comportar de maneira elástica, mas na recarga no sentido oposto, as tensões residuais na fase do componente “macio” ajudarão a tensão aplicada a causar deformação plástica prematura. Assim, o comportamento é assimétrico e o sistema PE mais “macio” para o carregamento reverso do que era no estado original (HAUS,2011).

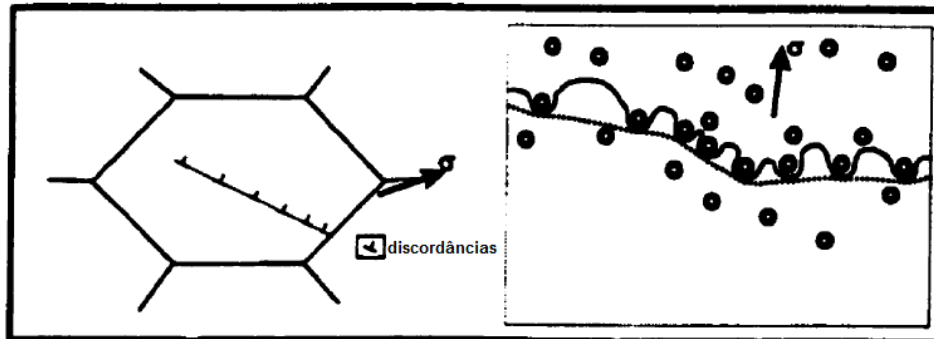
Figura 14: Representação esquemática do modelo composto.



Fonte: (HAUS,2011)

c) Teoria do deslocamento: sugere que durante a pré-deformação, uma larga faixa de tensões é construída através da formação de empilhamentos de discordâncias nas barreiras. A Figura 15 demonstra discordâncias empilhadas nos obstáculos que são definidos como barreiras (HAUS,2011).

Figura 15: 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).

Conforme a deformação plástica é aumentada, a densidade de discordâncias e a interação entre elas também aumenta. Mas, como novas discordâncias sempre são geradas durante a deformação plástica, um valor de saturação será atingido quando houver uma fração constante de discordâncias móveis e imóveis no material. Portanto, espera-se que um valor de saturação do efeito Bauschinger ocorra após certa deformação plástica ser obtida (HAUS,2011).

## 4. MATERIAIS E METODOLOGIA

Neste trabalho foram realizados ensaios de tração e de efeito Bauschinger a fim de caracterizar um aço API 5L X70 quanto às propriedades. Análises metalográficas poderão ser consultadas em Sorrija, 2011, por exemplo, que caracterizou o material como ferrítico-perlítico.

### 4.1 Materiais

Para realizar todos os ensaios, foram utilizadas amostras feitas com o aço API 5L X70. Este aço foi cedido pela Tenaris Confab S.A., ele apresenta alta resistência, baixa concentração de elementos de liga, excelente tenacidade e boa soldabilidade, características imprescindíveis na aplicação em tubos de condução de petróleo e gás. A composição desse aço pode ser observada na Tabela 4.

Tabela 4: Composição química do tubo de aço API X70

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

Fonte: (SANTOS, 2014)

A forma na qual o material foi cedido pode ser observada na Figura 16. O diâmetro externo desse anel é de cerca de 700mm e a espessura é de 15,8mm. Além disso, esse anel possui dois cordões de solda feita pelo processo de arco submerso já que foi conformado pelo processo UOE.

Figura 16: Oxiorte do anel feito com o aço API 5L X70



Fonte: (SORRIJA)

Os corpos de prova dos ensaios de tração e de Bauschinger foram confeccionados após a retirada do material dos anéis do tubo, que foram feitas de acordo com a norma API 5L. Esses corpos de prova foram então submetidos à técnicas de usinagem para a obtenção das dimensões dos corpos de prova finais.

Após essa usinagem, os corpos de prova passaram por um torno de lixamento para evitar possíveis falhas durante os ensaios advindas de algum risco grosseiro. O procedimento de lixamento é descrito na Tabela 5.

Tabela 5: Procedimento de lixamento para ensaios de tração.

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

Fonte: (SANTOS, 2014)

De acordo com a norma ASTM E606, os corpos de prova devem apresentar uma rugosidade em torno de  $0,2\mu\text{m}$  para a realização dos ensaios. A rugosidade final foi medida por um rugosímetro portátil modelo Surftest 301, através do parâmetro Ra com um comprimento de amostragem de  $0,8\text{mm}$  e percurso total de  $4\text{mm}$  (*cut-off*). Esse aparelho está ilustrado na Figura 17.

Figura 17: Rugosímetro Surftest 301



Fonte: (SANTOS, 2014)

## 4.2 Métodos

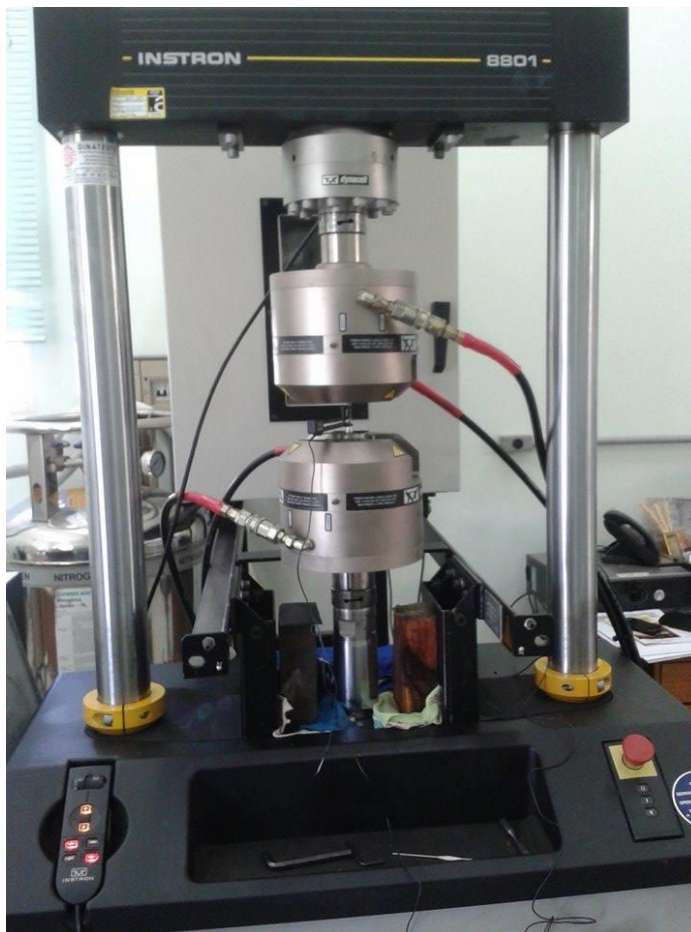
Para caracterizar o material do estudo, foram utilizados 2 ensaios: o ensaio de tração e o ensaio de efeito Bauschinger.

### 4.2.1 Ensaio de Tração

Os ensaios de tração foram conduzidos de acordo com a norma ASTM E8M, em uma máquina Instron 8801, com  $100\text{kN}$  de de força máxima e velocidade de ensaio de 2

mm/min. O ensaio foi auxiliado também por um extensômetro de comprimento útil de 25 mm, o qual permite medir deformações de 0% até 50%.

Figura 18: Máquina Instron 8801



Fonte: (PRÓPRIO AUTOR)

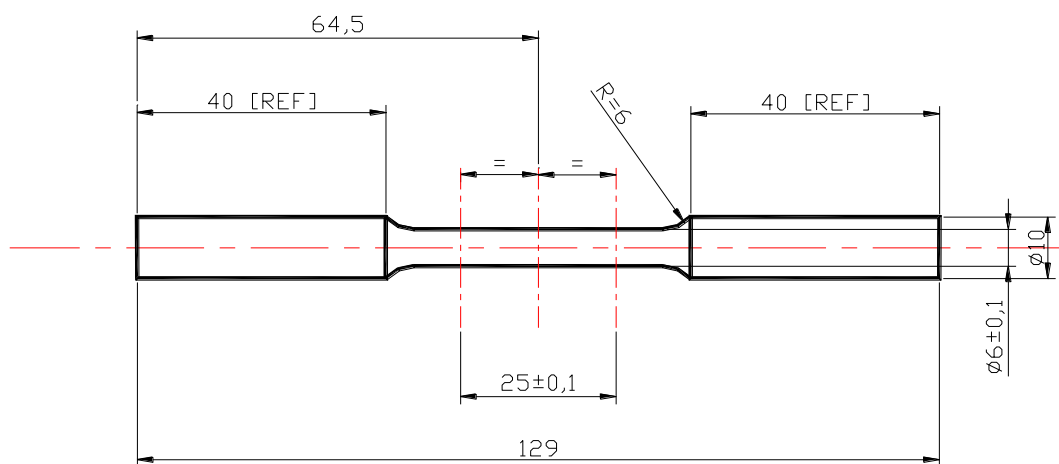
Os 3 corpos de prova desse ensaio de tração foram confeccionados também de acordo com a norma ASTM E8M. Estes apresentam um formato cilíndrico e foram obtidos em relação à direção longitudinal do tubo. As Figuras 19 e 20 ilustram o formato dos corpos de prova.

Figura 19: Foto de dois dos corpos de prova utilizados



Fonte: (PRÓPRIO AUTOR)

Figura 20: Representação das medidas dos corpos de prova



Fonte: (SANTOS, 2014)

Com os dados desse ensaio, foi possível obter os valores de tensão limite de escoamento convencional, tensão limite de resistência convencional, tensão de fratura convencional, módulo de elasticidade, deformação verdadeira de fratura, deformação máxima convencional, coeficiente de resistência e coeficiente de encruamento.

#### **4.2.2 Ensaio de efeito Bauschinger**

Normalmente seria possível adaptar o mesmo equipamento utilizado no ensaio de tração para se fazer o ensaio de efeito Bauschinger. Porém, por causa de alguns problemas na máquina utilizadas nesses ensaios, o ensaio de efeito Bauschinger teve de ser feito no Centro Universitário FEI, em São Bernardo do Campo.

Os ensaios foram conduzidos de acordo com a norma ASTM E606, auxiliados por um extensômetro de comprimento útil de 25 mm, que permite quantificar deformações de -10 a 25%. Cada corpo de prova foi ensaiado separadamente no sentido de tração-compressão. Primeiramente, o corpo de prova foi tracionado até 1% de deformação e depois o carregamento foi revertido para compressão até uma deformação de -1%. A taxa de deformação utilizada nos ensaios foi de 0,35%/min.

Através desses ensaios, foram obtidos valores de tensão limite de escoamento na reversão e a tensão limite de escoamento na compressão para assim poder compará-los com os dados obtidos nos ensaios convencionais de tração. Por fim, foram calculados o BE e o BEF, conforme já definidos pelas equações (8) e (9), páginas 30 e 31, respectivamente.



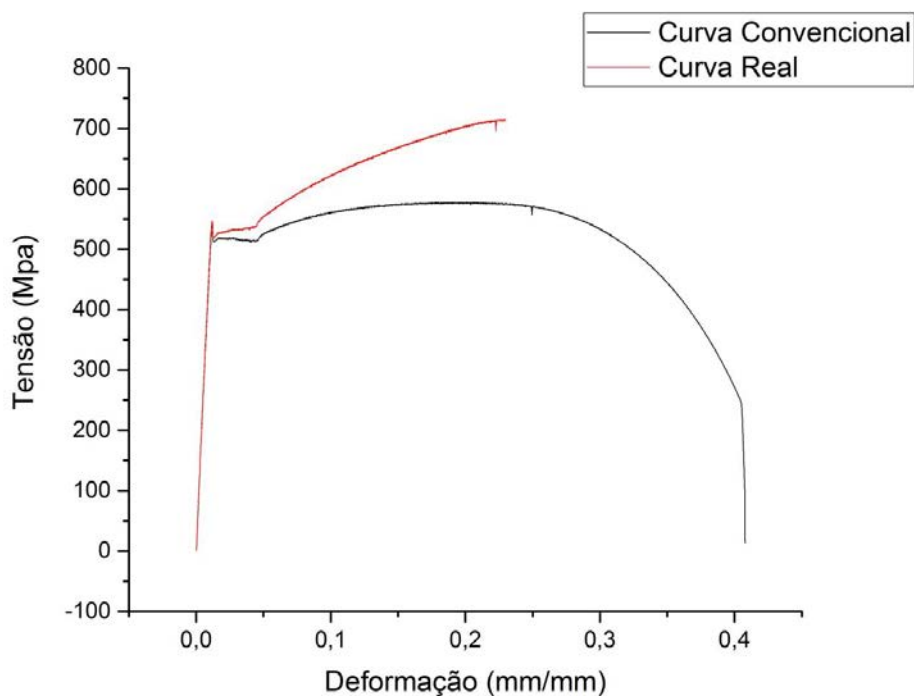
## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Ensaio de Tração

Após efetuados os ensaios de tração com as 3 amostras do aço API 5L X70, foram traçadas as curvas de tensão-deformação convencional e real, a curva da zona elástica para obtenção do módulo de elasticidade (E) e a linearização da curva convencional de tensão-deformação para se obter o coeficiente de encruamento (n) e o coeficiente de resistência (K).

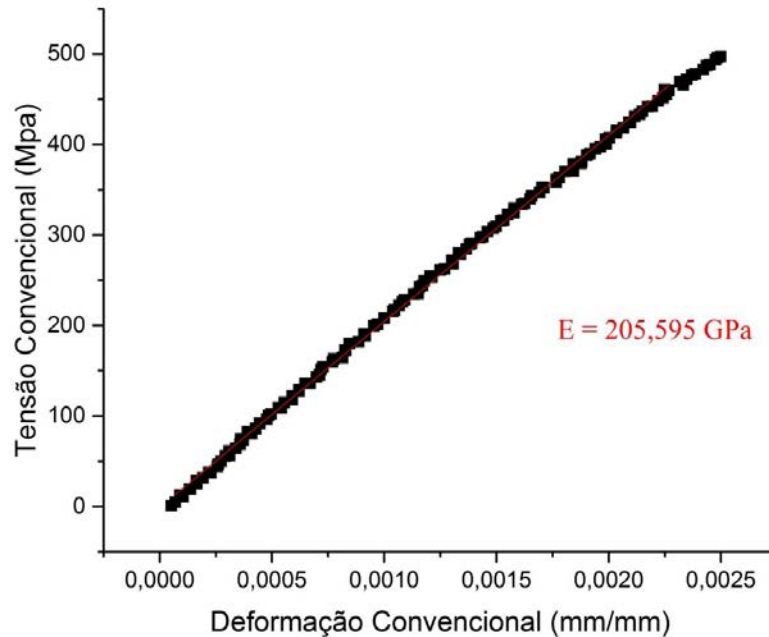
As Figuras 21 a 29 representam as curvas obtidas através do *software* OriginPro 2015 para os 3 ensaios.

Figura 21: Curva Tensão-Deformação Convencional e Real da amostra 1



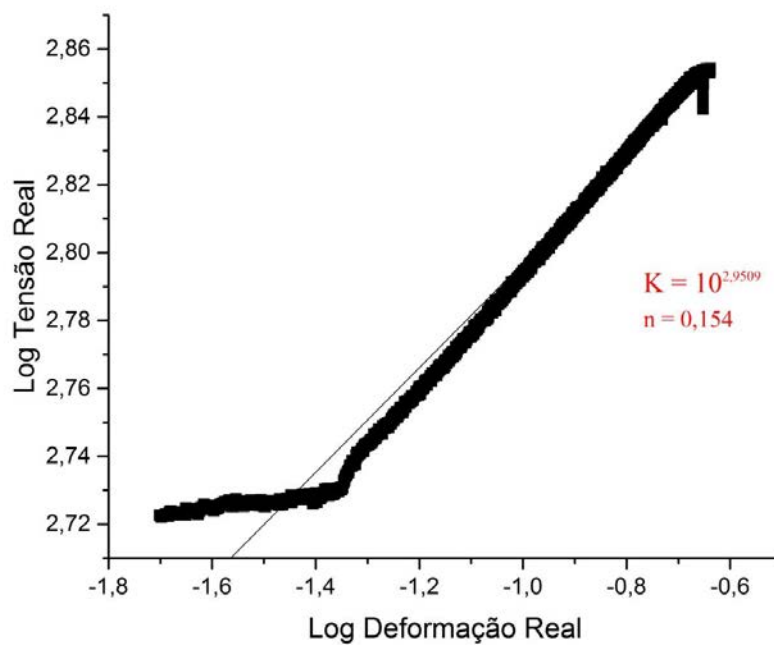
Fonte: (PRÓPRIO AUTOR)

Figura 22: Curva Tensão-Deformação da zona elástica da amostra 1 para a obtenção do módulo de elasticidade (E)



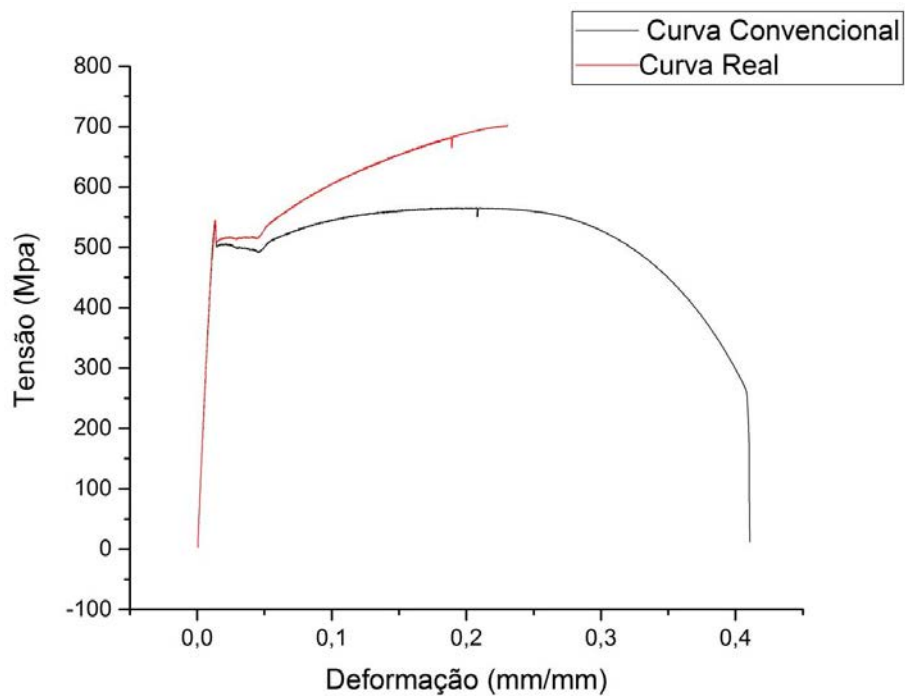
Fonte: (PRÓPRIO AUTOR)

Figura 23: Curva log da Tensão Real x log da Deformação Real da zona plástica da curva de Tensão-Deformação da amostra 1 para a obtenção do coeficiente de encruamento (n) e do coeficiente de resistência (K)



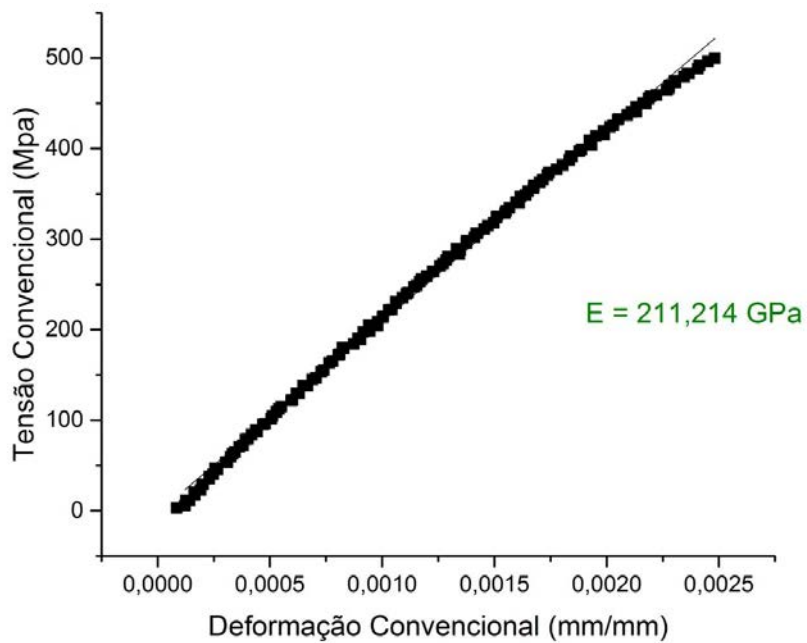
Fonte: (PRÓPRIO AUTOR)

Figura 24: Curva Tensão-Deformação Convencional e Real da amostra 2



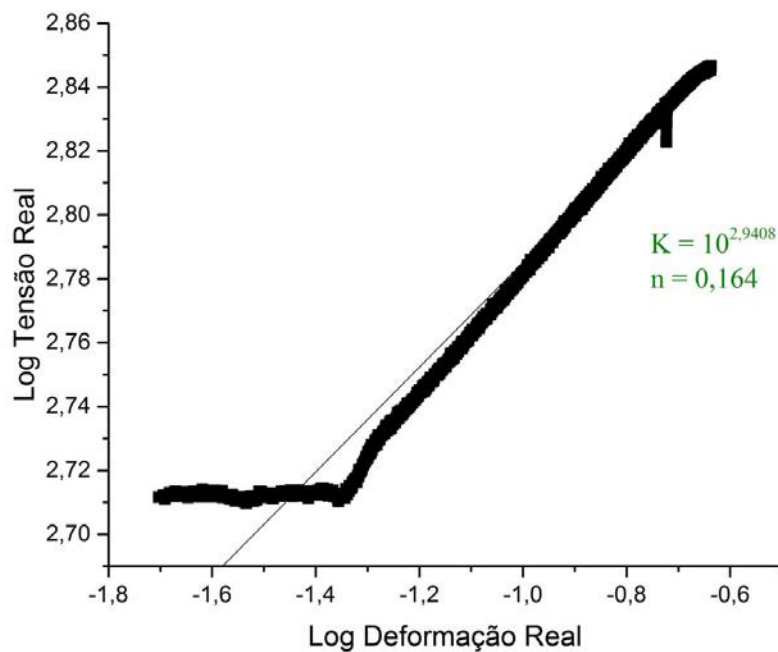
Fonte: (PRÓPRIO AUTOR)

Figura 25: Curva Tensão-Deformação da zona elástica da amostra 2 para a obtenção do módulo de elasticidade (E)



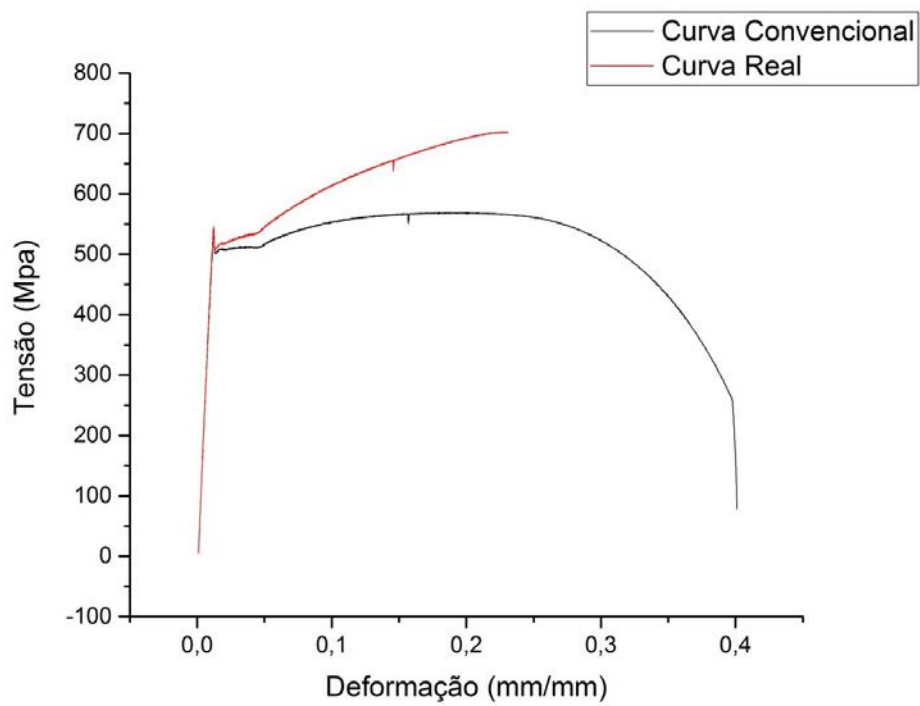
Fonte: (PRÓPRIO AUTOR)

Figura 26: Curva Log da Tensão Real x Log da Deformação Real da zona plástica da curva de Tensão-Deformação da amostra 2 para a obtenção do coeficiente de encruamento (n) e do coeficiente de resistência (K)



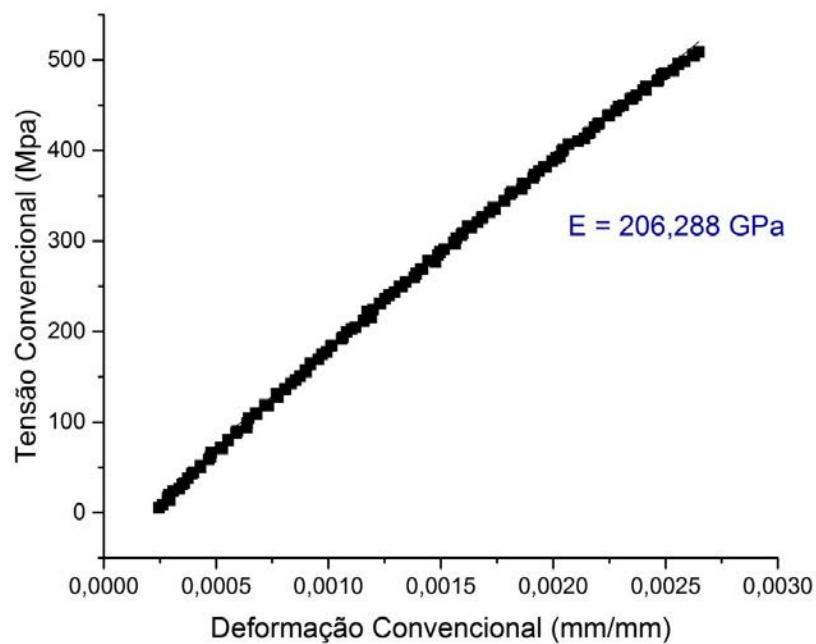
Fonte: (PRÓPRIO AUTOR)

Figura 27: Curva Tensão-Deformação Convencional e Real da amostra 3



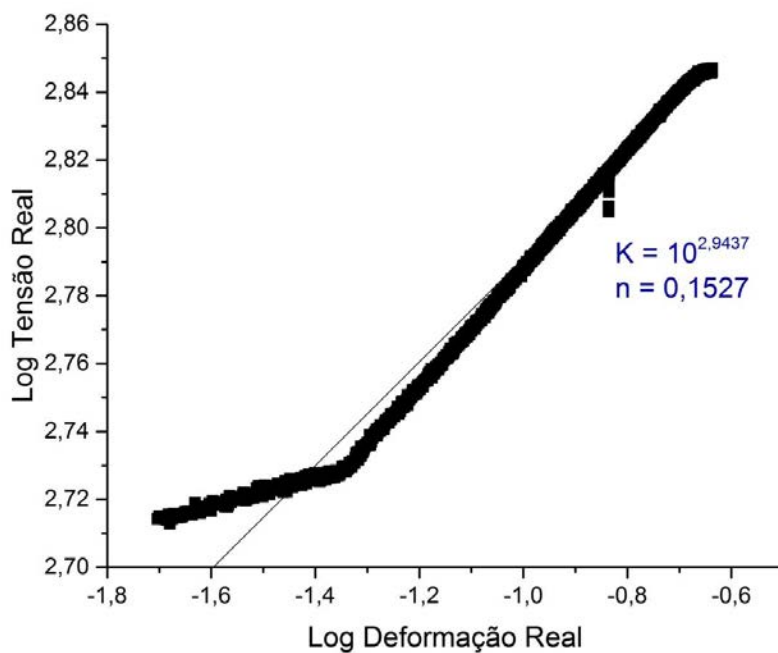
Fonte: (PRÓPRIO AUTOR)

Figura 28: Curva Tensão-Deformação da zona elástica da amostra 3 para a obtenção do módulo de elasticidade (E)



Fonte: (PRÓPRIO AUTOR)

Figura 29: Curva Log da Tensão Real x Log da Deformação Real da zona plástica da curva de Tensão-Deformação da amostra 3 para a obtenção do coeficiente de encruamento (n) e do coeficiente de resistência (K)



Fonte: (PRÓPRIO AUTOR)

Pelo formato das curvas das imagens 22, 25, 28, é possível identificar, além das tensões limite de escoamento as quais estão bem definidas, que o aço API 5L X70 é um material que suporta grande deformação, aproximadamente 40%, antes de se romper. Isto é muito importante para a aplicação em tubos de condução de petróleo e gás, pois esses tubos sofrem muitos esforços na forma que são aplicados e a sua falha resultaria em impactos econômicos e ambientais catastróficos.

Além disso, pelo fato do material ter essa grande capacidade de deformação, é possível concluir que antes do mesmo se romper efetivamente, as trincas causadas pelos esforços externos se propagariam até adquirirem um grande tamanho e, portanto, seriam de mais fácil identificação do que se o material fosse rígido, cujas trincas apresentam pequenos tamanhos antes da ruptura. Assim, as trincas dos tubos de aço API 5L X70 podem ser identificadas em processos de manutenção e tratadas antes que ocorra a ruptura nesses tubos.

Foram calculados parâmetros importantes para estudar as propriedades de um material. Esses parâmetros estão representados nas Tabelas 6 e 7.

Tabela 6: Tensões e deformações obtidas nos ensaios de tração

<b>Amostra</b>	<b>Tensão Limite de Escoamento (MPa)</b>	<b>Tensão Máxima Convencional (MPa)</b>	<b>Tensão Máxima Real (MPa)</b>	<b>Razão <math>T_e/T_m</math></b>	<b>Deformação Convencional</b>	<b>Deformação Real</b>
<b>1</b>	517,57	578,25	714,92	0,90	0,408	0,230
<b>2</b>	504,66	566,21	702,39	0,89	0,411	0,231
<b>3</b>	507,71	569,44	703,04	0,89	0,401	0,231
<b>Média</b>	509,98	571,30	706,79	0,89	0,41	0,23

Fonte: (PRÓPRIO AUTOR)

Tabela 7: Módulos de elasticidade e coeficientes obtidos nos ensaios de tração

Amostra	Zona Elástica	Zona Plástica	
	Módulo de Elasticidade (E) (MPa)	Coeficiente de Encruamento (n)	Coeficiente de Resistência (K)
1	205,596	0,15401	893,10
2	211,214	0,16399	889,36
3	206,288	0,15271	878,44
<b>Média</b>	207,70	0,16	886,97

Fonte: (PRÓPRIO AUTOR)

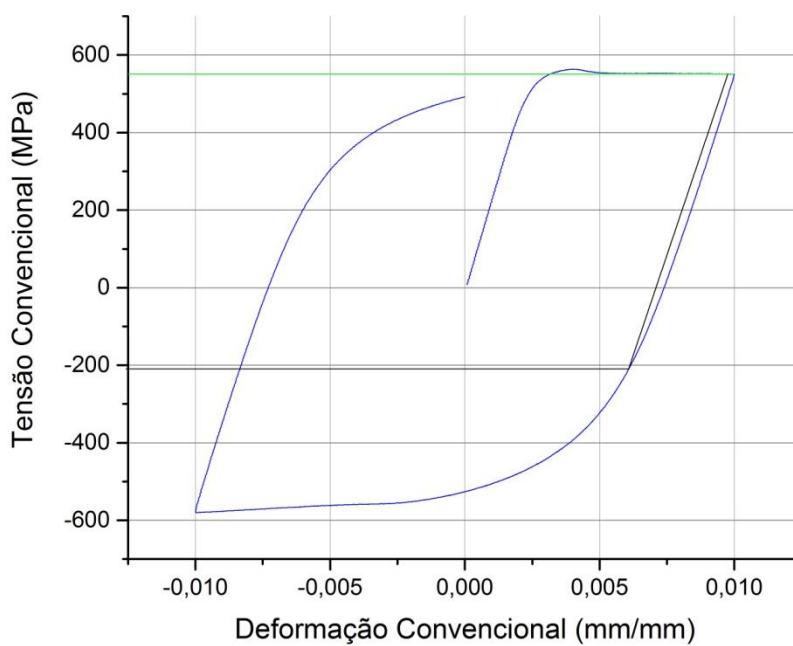
De acordo com a literatura, é possível comprovar matematicamente que o expoente de encruamento ( $n$ ) de um material metálico é numericamente igual à deformação verdadeira uniforme ( $\epsilon$ ) do mesmo (DOWLING, 1999). Porém, é possível observar nas Tabelas (6) e (7) que esses valores divergem, contrariando a literatura. Com isso, nota-se que a determinação exata do comportamento plástico de materiais metálicos depende da extrapolação de equações das curvas tensão-deformação reais, não sendo possível prever o valor do expoente de encruamento de um material metálico através da deformação verdadeira uniforme e do diâmetro médio espacial dos grãos (SOLOSANDO, 2007).

Pela norma API 5L, o aço X70 deve ter no mínimo 70 ksi de limite de escoamento, ou seja, ele deve apresentar uma tensão limite de escoamento de no mínimo 483 MPa. É possível observar na Tabela 6 que todas as amostras ensaiadas atendem esse limite mínimo. A norma ainda recomenda que a razão entre a tensão limite de escoamento e a tensão máxima convencional seja de 0,8. Na Tabela 6 é possível observar que nas amostras essa razão ficou na média em torno de 0,89, o que não é o recomendado pela norma mas ainda garante 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.

## 5.2 Ensaio de Efeito Bauschinger

As Figuras 30 a 38 ilustram as curvas obtidas nos ensaios de efeito Bauschinger nas 3 amostras, assim como as curvas utilizadas para se obter os respectivos coeficientes de encruamento e de resistência das 3 amostras.

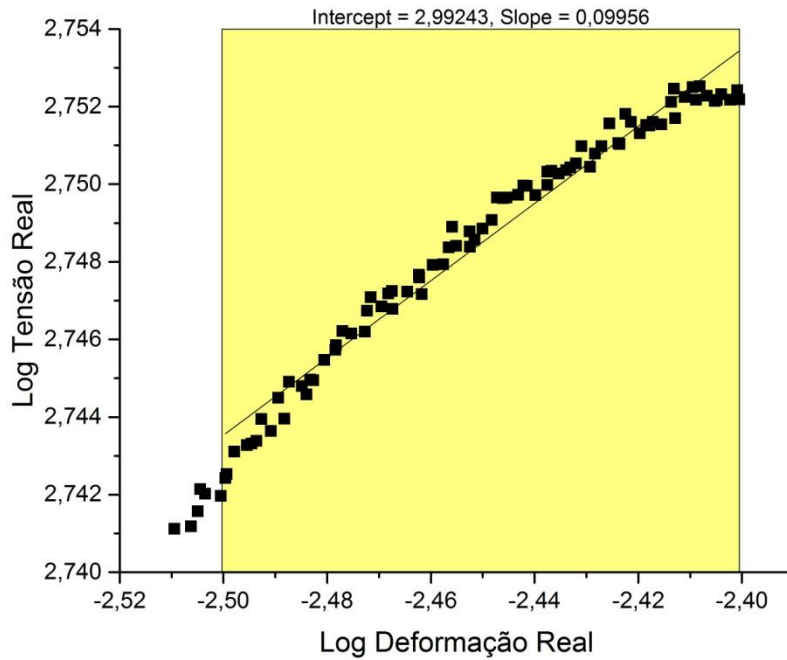
Figura 30: Curva do ensaio de efeito Bauschinger (tração-compressão de 1% de deformação) da amostra 1



Fonte: (PRÓPRIO AUTOR)

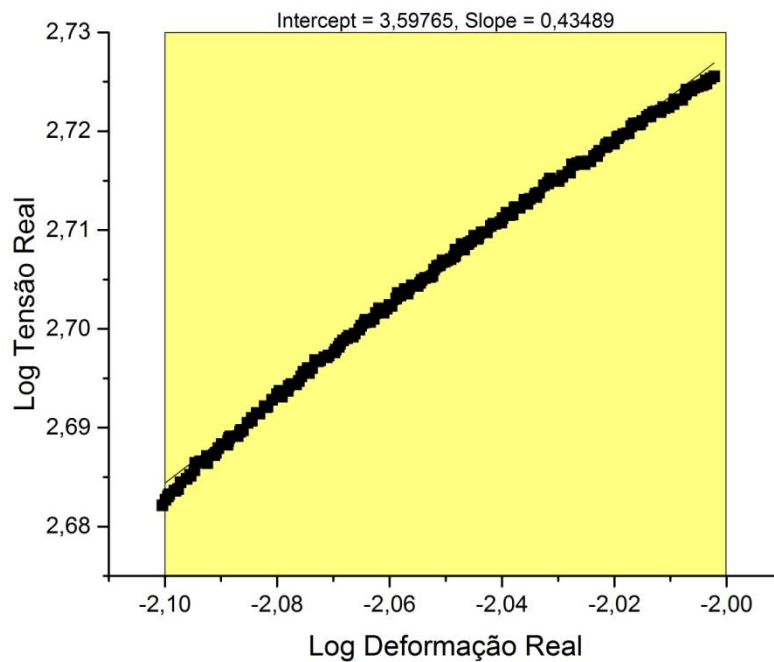


Figura 31: Gráfico de Log da tensão real por Log da deformação real da parte trativa do ensaio de efeito Bauschinger da amostra 1



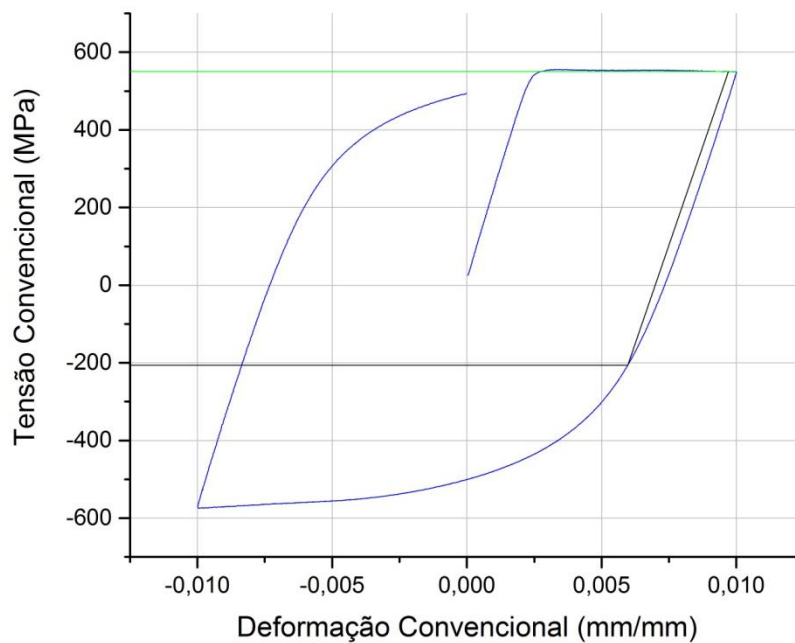
Fonte: (PRÓPRIO AUTOR)

Figura 32: Gráfico de Log da tensão real por Log da deformação real da parte compressiva do ensaio de efeito Bauschinger da amostra 1



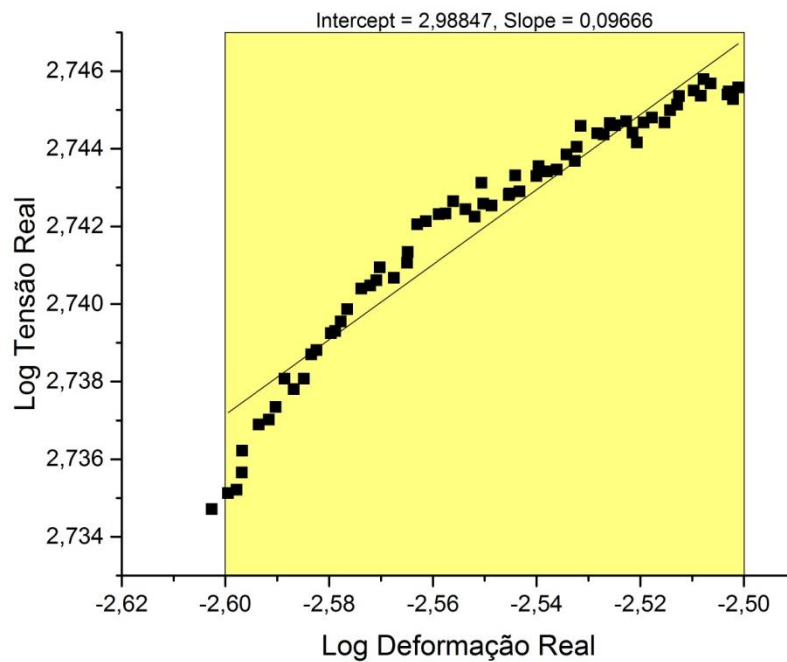
Fonte: (PRÓPRIO AUTOR)

Figura 33: Curva do ensaio de efeito Bauschinger (tração-compressão de 1% de deformação) da amostra 2



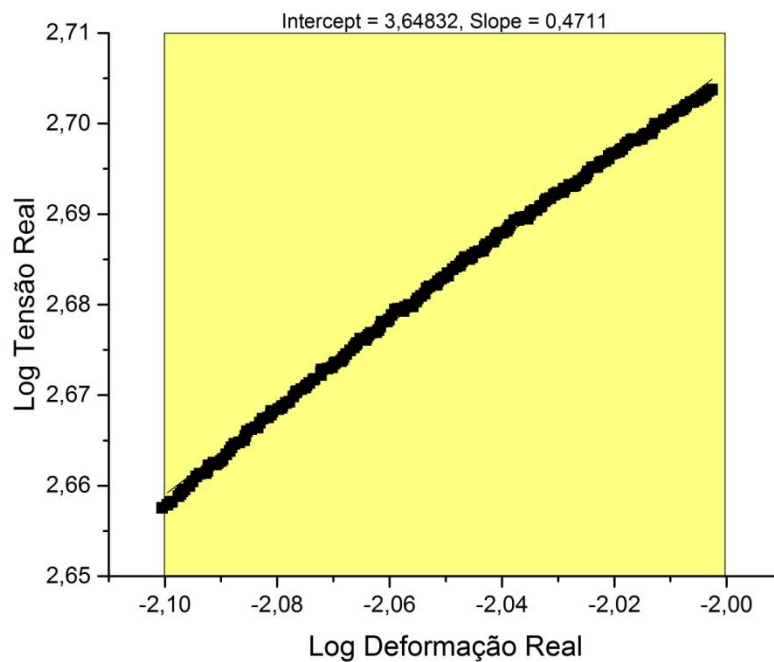
Fonte: (PRÓPRIO AUTOR)

Figura 34: Gráfico de Log da tensão real por Log da deformação real da parte trativa do ensaio de efeito Bauschinger da amostra 2



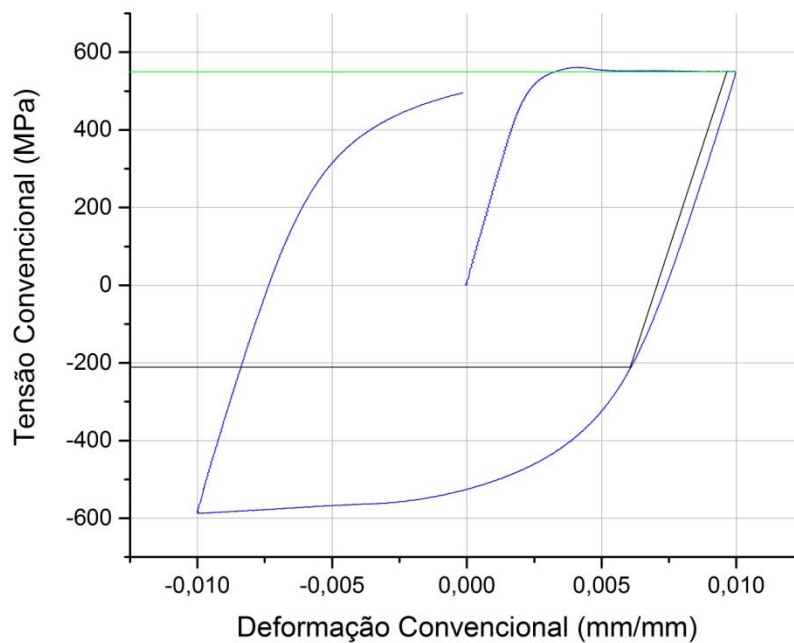
Fonte: (PRÓPRIO AUTOR)

Figura 35: Gráfico de Log da tensão real por Log da deformação real da parte compressiva do ensaio de efeito Bauschinger da amostra 2



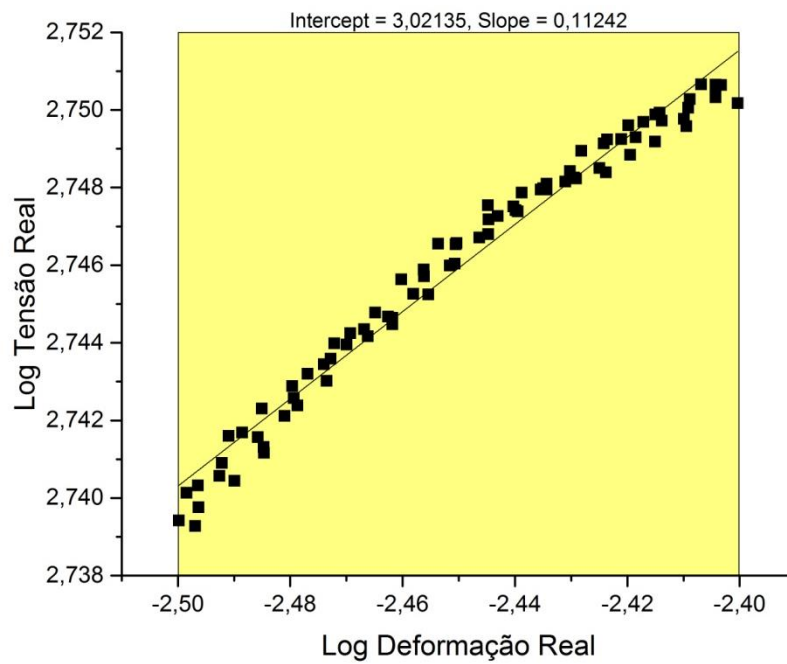
Fonte: (PRÓPRIO AUTOR)

Figura 36: Curva do ensaio de efeito Bauschinger (tração-compressão de 1% de deformação) da amostra 3



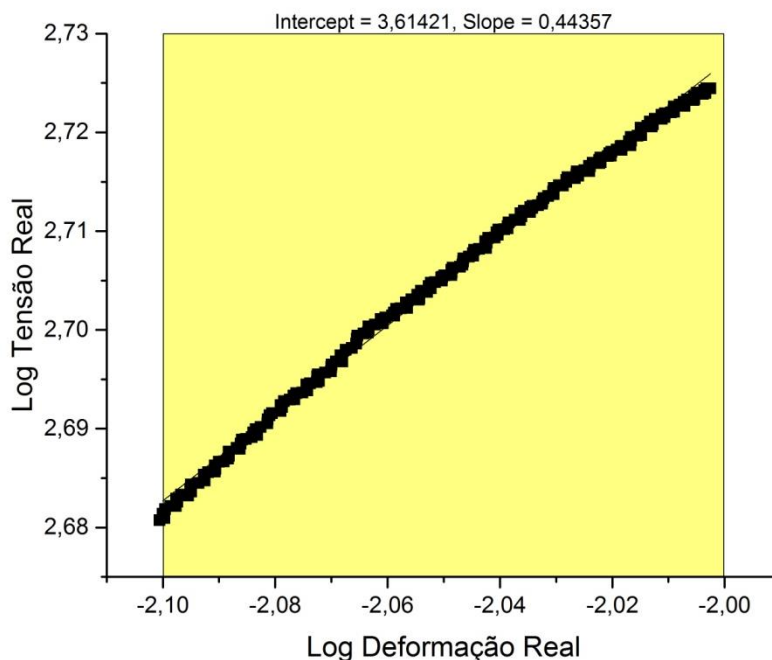
Fonte: (PRÓPRIO AUTOR)

Figura 37: Gráfico de Log da tensão real por Log da deformação real da parte tratativa do ensaio de efeito Bauschinger da amostra 3



Fonte: (PRÓPRIO AUTOR)

Figura 38: Gráfico de Log da tensão real por Log da deformação real da parte compressiva do ensaio de efeito Bauschinger da amostra 3



Fonte: (PRÓPRIO AUTOR)

Das curvas traçadas com os dados obtidos nos ensaios de efeito Bauschinger das 3 amostras, foram calculadas os valores de tensão de escoamento convencional na tração, de tensão limite de escoamento na reversão, de tensão limite de escoamento na compressão, os parâmetros  $BE_{T-C}$  e  $BEF_{T-C}$ , as % de redução dos valores de tensão limite de escoamento, assim como os coeficientes de encruamento e de resistência nas partes trativas e compressivas do ensaio. Esses valores estão ilustrados nas Tabelas 8 e 9.

Houve uma dificuldade na obtenção dos coeficientes de encruamento e de resistência no ensaio de efeito Bauschinger, pois as curvas logarítmicas apresentaram pontos muito distantes de uma parte da curva para a outra. Isso possivelmente ocorreu pelo fato de a velocidade de taxa de deformação no ensaio de efeito Bauschinger foi muito menor que no ensaio de tração convencional, no qual não houve a mesma dificuldade para se obter os coeficientes. Como o aço API 5L X70 é um material dúctil, na transição da zona elástica para a plástica da curva de tensão-deformação convencional, é possível observar um limite

de escoamento bem definido, o que não foi possível observar no ensaio de efeito Bauschinger. Na curva deste ensaio, a transição da zona plástica para a elástica foi de mais difícil identificação pois essa transição acabou sendo mais gradual e ainda houve uma oscilação que fez com que alguns valores de log de tensão ficassem não linearizados. Todavia, considerando pontos antes dessa oscilação, e obviamente após a parte elástica, foi possível obter os coeficientes de encruamento e de resistência do material.

Tabela 8: Tensão limite de escoamento, tensão limite na reversão, tensão limite na compressão e os parâmetros  $BE_{T-C}$  e  $BEF_{T-C}$

Amostra	Tensão Limite de Escoamento Convencional (MPa)	Tensão Limite de Escoamento na Reversão (Mpa)	Tensão Limite de Escoamento na Compressão (Mpa)	Parâmetro $BE_{T-C}$	Parâmetro $BEF_{T-C}$	% Redução em relação com o Limite de Escoamento Convencional	% Redução em relação com o Limite de Escoamento na Reversão
1	509,07	551,41	204,41	0,63	0,37	-59,8%	-62,9%
2	513,14	548,27	202,62	0,63	0,37	-60,5%	-63,0%
3	503,56	550,06	212,38	0,61	0,39	-57,8%	-61,4%
Média	508,59	549,91	206,47	0,62	0,38	-59%	-62%

Fonte: (PRÓPRIO AUTOR)

Tabela 9: Coeficientes de encruamento e coeficientes de resistência nos ensaios nas partes tratativas e compressivas do ensaio

Amostra	TRAÇÃO		COMPRESSÃO	
	Coefficiente de Encruamento (n)	Coefficiente de Resistência (K)	Coefficiente de Encruamento (n)	Coefficiente de Resistência (K)
1	0,09956	982,72	0,43489	3.959,59
2	0,09666	973,80	0,4711	4.449,59
3	0,11242	1.050,39	0,44357	4.113,49
Média	0,10	1.002,30	0,45	4.174,22

Fonte: (PRÓPRIO AUTOR)

Já pela Tabela 8 é possível observar que houve uma redução significativa na tensão limite de escoamento quando o aço API 5L X70 foi tracionado até 1% de deformação e logo

depois comprimido até -1% de deformação. Essa redução de limite de escoamento quando o sentido do carregamento é invertido é o chamado efeito Bauschinger. Além disso, foi possível observar um aumento significativo no coeficiente de encruamento e no coeficiente de resistência no sentido contrário, que nesse caso foi o de compressão, quando comparado com os coeficientes obtidos no sentido inicial do esforço, que nesse caso foi o de tração.

Conforme dito anteriormente, como o aparelho no qual seria possível realizar o ensaio de efeito Bauschinger dentro da FEG-UNESP estava com problemas técnicos, esses ensaios tiveram que ser feitos na FEI em São Bernardo do Campo. Devido aos recursos escassos, foi feito apenas o ensaio de 1% no sentido tração-compressão. Para poder tirar algumas conclusões à respeito dos resultados dos ensaios de efeito Bauschinger realizados nesse trabalho, irei à seguir relacioná-los com alguns parâmetros e discussões do trabalho de Solosando (2007).

Solosando (2007) realizou, em 3 tipos de aços inoxidáveis de diferentes, ensaios de tração convencional e também ensaios de efeito Bauschinger no sentido de tração-compressão e compressão-tração, com deformações de 1%, 3% e 5%, para estudar o comportamento desses aços. Com isso, foram feitas as seguintes conclusões:

- I. Os ensaios estavam balanceados, ou seja, os limites de escoamento são iguais, tanto na parte trativa do ensaio tração-compressão, quanto na parte compressiva do ensaio de compressão-tração. Os desvios de resultados, principalmente observados nos ensaios de deformação de 5%, seriam resultados de um erro de ajuste na célula de carga após a fixação do corpo de prova.
- II. Não há relação entre o aumento ou diminuição dos valores de coeficiente de encruamento e de resistência, dos aços em estudo, com o efeito Bauschinger, pois os valores dependem do módulo e sentido da deformação previamente imposta.
- III. Os parâmetros  $BE_{T-C}$  e  $BE_{T-C}$  devem ser usados com ressalvas, já que seus valores dependem, de uma forma imprevisível, do valor de deformação imposta antes da reversão.



Apesar da conclusão (I) ter relatado que os limites de escoamento são iguais nos ensaios realizados por Solosando (2007), isso só pode ser observado efetivamente nos ensaios de deformação de 1%. Portanto, apesar da diferença em composição dos aços inoxidáveis com o aço API 5L X70, que é um aço ARBL, é possível prever que os resultados de um ensaio de 1% de deformação feito no sentido compressão-tração seriam muito próximos dos resultados apresentados neste trabalho. Assim, a tensão limite de escoamento na reversão ( $S_{NA\_REVERSÃO}$ ) do ensaio no sentido compressão-tração de -1% de deformação deve ser muito próxima da obtida nos ensaio deste trabalho. Analogamente, os valores de tensão limite de escoamento na tração ( $S_{LE\_TRAÇÃO}$ ) também devem ser muito próximos dos valores obtidos de tensão limite de escoamento na compressão ( $S_{LE\_COMPRESSÃO}$ ), gerando parâmetros  $BE_{T-C}$  e  $BEF_{T-C}$  respectivamente iguais aos parâmetros  $BE_{C-T}$  e  $BEF_{C-T}$ .

Como não foi possível realizar os ensaios de efeito Bauschinger de deformação 3%, -3%, 5% e -5%, não é possível fazer nenhuma suposição sobre os mesmos, já que não os limites de escoamento na reversão, compressão e tração, os parâmetros BE e BEF, e também os coeficientes de encruamento e de resistência, dependem não só do sentido mas também do módulo da deformação previamente imposta.

Uma forma de poder analisar o efeito Bauschinger através dos parâmetros  $BE_{T-C}$ ,  $BE_{C-T}$ ,  $BEF_{T-C}$  e  $BEF_{C-T}$  seria analisá-los separadamente, pois, no caso do parâmetro BE, quanto mais próximo de 1 for o seu valor, maior será a diferença entre o limite de escoamento na reversão ( $S_{NA\_REVERSÃO}$ ) e o limite de escoamento na tração ( $S_{LE\_TRAÇÃO}$ ) ou limite de escoamento na compressão ( $S_{LE\_COMPRESSÃO}$ ), e portanto maior será o efeito Bauschinger que, como já foi dito anteriormente, é a diminuição da tensão limite de escoamento quando se aplica um esforço em um sentido e logo em seguida é aplicado um esforço em um sentido contrário. Já no caso do parâmetro BEF, quanto mais próximo de 0 for seu valor, maior será a diferença entre o limite de escoamento na tração ( $S_{LE\_TRAÇÃO}$ ) ou limite de escoamento na compressão ( $S_{LE\_COMPRESSÃO}$ ) em relação ao limite de escoamento na reversão ( $S_{NA\_REVERSÃO}$ ), e portanto maior é o efeito Bauschinger. Vale lembrar que valores menores que 0 para o parâmetro BE e maiores que 1 para BEF, retratam um efeito de aumento de tensão limite de escoamento quando se aplica um esforço em um sentido e logo em seguida é aplicado um esforço em um sentido contrário, o que não seria, por definição, o efeito Bauschinger. Além disso, os valores de BE e BEF são de certa forma complementares,

considerando um mesmo módulo de deformação previamente imposta, pois o resultado da soma dos dois será sempre 1.

Portanto, foi possível observar a ocorrência do efeito Bauschinger no aço API 5L X70, visto que houve uma redução de aproximadamente 60% no limite de escoamento quando aplicado um esforço em um sentido prévio e logo em seguida foi aplicado um esforço em um sentido contrário.

## 6. CONCLUSÕES

Com os resultados obtidos neste trabalho, foi possível concluir:

- I. O material apresentou uma grande capacidade de deformar antes de sofrer ruptura. Além disso, seus valores de módulo de elasticidade e de limite de escoamento estão de acordo com a norma API 5L.
- II. Pelo ensaio de efeito Bauschinger, foi possível constatar que quando o aço API 5L X70 sofre um esforço em um sentido prévio e logo em seguida sofre um esforço em um sentido contrário, há uma significativa redução no limite de escoamento desse material.

Portanto, pelo fato do material atender todos os requisitos da norma API 5L, ele teria plenas condições de ser aplicado em tubos de condução de petróleo e gás natural.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

AL-MANSOUR, M.; ALFANTAZI, A. M.; EL-BOUJDANI, M. Sulfide stress cracking resistance of API-X100 high strength low alloy steel. **Materials and Design**, v. 30, n. 10, dez. 2009. p. 4088-4094.

API 5L. **Specification for Line Pipe Steel.** Estados Unidos, 42ed., New York, 2004.

BARBOSA, V. S. **Avaliação da integridade estrutural em um tubo de aço API 5L X70 através da propagação de trincas por fadiga.** 2014. 198f. Dissertação (mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2014.

CIPRIANO, G. L. **Determinação do coeficiente de encruamento de metais através da morfologia das impressões de dureza na escala macroscópica** 2008. 106f. Dissertação (mestrado, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba 2008.

DONG, C. F.; LIU, Z. Y.; LI, X. G.; CHENG, Y. F. Effects of hydrogen-charging on the susceptibility of X100 pipeline steel to hydrogen-induced cracking, **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 34, n. 24, dez. 2009. p. 9879-9884.

FREIRE, J. L. F. **Engenharia de dutos.** Rio de Janeiro: ABCM, 2009. 528 p.

HAUS, S. A. **Influência do efeito baushinger no retorno elástico em aços avançados de elevada resistência.** 2011. 92f. Dissertação (mestrado em Engenharia Mecânica) Universidade Federal do Paraná, Curitiba 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.** 2004. 143f. Tese (doutorado em Engenharia Naval), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

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

PETRÓLEO. Disponível em <<http://www.suapesquisa.com/geografia/petroleo/>> Acesso em: 20 set. 2015.

PROTECAO-CATODICA. Disponível em: <<http://www.cathodicprotection101.com/protecao-catodica.htm>> Acessado em 20/10/2015

OMRPUBLIC. Disponível em: <<https://www.iea.org/oilmarketreport/omrpublic/>> Acessado em 20/09/2015

SANTOS, D. P S.; MACIEL, M. G. **Características do aço api x70 utilizado em tubos de transporte de petróleo e gás.** 2014.xxf. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia de Materiais)-Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista-UNESP, Guaratinguetá, 2014.

SOLOSANDO, S. G. **Efeito Bauschinger em aços inoxidáveis.** Relatório final do projeto de iniciação científica. São Paulo: 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. 5.ed. 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.** 2012. 103f. Dissertação (mestrado em Engenharia Metalúrgica), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

ZILIO, J. L. **Avaliação da resistência à corrosão-fatiga no aço API 5L X60 em meio aquoso salino.** 2013. 70f. Dissertação (mestrado Engenharia Química), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.