

UNESP
Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá

Guaratinguetá
2012

GUSTAVO DE SOUZA CINTRA

ESTUDO DO COMPORTAMENTO EM FADIGA DE UMA CHAPA DE
AÇO MICROLIGADO, GRAU API 5L X70.

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

Orientador: Prof. Dr. Marcelino Pereira do Nascimento

Guaratinguetá
2012

C493e Cintra, Gustavo de Souza
Estudo do comportamento em fadiga de uma chapa de aço
microligado, grau API 5L X70 / Gustavo de Souza Cintra – Guaratinguetá
: [s.n], 2012.
56 f : il.
Bibliografia: f. 55-56

Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade
Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2012.
Orientador: Prof. Dr. Marcelino Pereira do Nascimento

1. Aço – fadiga I. Título

CDU 620.178.3

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO EM FADIGA DE UMA CHAPA DE AÇO
MICROLIGADO, GRAU API 5L X70**

GUSTAVO DE SOUZA CINTRA

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 MECÂNICA

Prof. Dr. MAURO HUGO MATHIAS
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


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


Eng. MSc. SANDRO LOMBARDO
Membro Externo


Eng. VITOR SCARABELI BARBOSA
Membro Externo

Dezembro de 2012

De modo especial dedico este trabalho aos meus pais, que sempre me incentivaram e apoiaram nessa jornada vitoriosa.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, pela minha vida, minha saúde, minha inteligência e sabedoria, minha família e meus amigos, pessoas que foram fundamentais durante minha formação;

aos meus pais, *Francisco (in memoriam) e Jupira (in memoriam)*, que sempre me deram todo apoio e muita força em momentos de dificuldades, por meio de um amor incondicional;

às minhas avós, *Fíica e Marina (in memoriam)*, por suas constantes orações e pela bondade e sabedoria compartilhadas;

à minha noiva *Emanuelle Damaris*, por todo incentivo, pelo amor e respeito demonstrados;

aos *amigos de república*, por terem sido meus irmãos durante tanto tempo, proporcionando grandes momentos de descontração e alegria;

à TENARIS CONFAB S.A., na pessoa do *Eng. Sérgio Kojima*, pela disponibilização das amostras de chapa de aço API 5L X70 e à USIMINAS pelas informações técnicas;

às alunas *Deborah Yasuda e Desirée de Moura Branco*, pela colaboração nos ensaios de microdureza e microscopia óptica;

ao *Engenheiro Sandro Lombardo* pela sua amizade e companheirismo, e pela sua participação em minha banca examinadora de graduação;

ao técnico do Departamento de Materiais e Tecnologia, *Manoel Francisco dos Santos Filho*, pela realização dos ensaios de fadiga e de tração;

ao Prof. Dr. Luis Rogério de Oliveira Hein pela realização da microscopia eletrônica de varredura;

ao *orientador Prof. Dr. Marcelino Pereira do Nascimento* por todo apoio, pela sua paciência e dedicação para confecção deste trabalho.

CINTRA, G. S. **Estudo do comportamento em fadiga de uma chapa de aço microligado, grau API 5L X70**. 2012. 56f. Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012.

RESUMO

Na engenharia, para um dimensionamento correto de componentes estruturais solicitados por tensões cíclicas, faz-se necessária a determinação de um limite de resistência à fadiga, que é a máxima amplitude de tensão aplicada sob a qual a falha por fadiga não ocorre após um determinado número de ciclos. O ambiente marinho é um ambiente hostil, não só pela alta pressão, pela corrosão, como também pelas baixas temperaturas. As unidades de extração de petróleo, compostas pelos *risers* (dutos que ligam o poço de petróleo ao navio), são dimensionadas para permanecer instaladas por períodos de 20 a 30 anos, e devem, portanto, estar preparadas para suportar os mais variados esforços, como das marés, vento, correntezas e tudo o que estiver relacionado. Este trabalho focaliza um estudo sobre o comportamento em fadiga de um aço microligado, grau API 5L X70, utilizado em linhas dutoviárias para transporte de petróleo e gás. Para análise, foram obtidas as curvas S-N (tensão *versus* número de ciclos) através de dados laboratoriais coletados de corpos-de-prova cilíndricos longitudinais e transversais utilizados nos ensaios de fadiga axial, em conformidade com a norma ASTM E466. Os ensaios de tração e microdureza Vickers foram realizados para caracterização das propriedades mecânicas das amostras, e foi constatado que os valores obtidos atendem as especificações da norma API 5L. Para caracterizar microestruturalmente o material, também foi feita a análise metalográfica do aço em estudo, e a origem da trinca de fadiga foi investigada com o auxílio do microscópio eletrônico de varredura (MEV).

PALAVRAS-CHAVE: ARBL, MEV, Petróleo e Gás, Integridade Estrutural.

CINTRA, G. S. **Study of fatigue behavior of a microalloyed steel sheet, API 5L Grade X70** 2012. 56p. Graduation Work in Mechanical Engineering – Engineering College of Guaratinguetá Campus, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012.

ABSTRACT

In engineering, for correct designing the structural components required for cyclical stresses, it is necessary to determine a limit of resistance to fatigue, which is the maximum amplitude of the applied tension under which the fatigue failure does not occur after a certain number of cycles. The marine environment is hostile, not only by the high pressure, corrosion, but also by low temperatures. Oil Production units, composed of the risers (pipelines connecting the oil well to the ship), are dimensioned to remain installed for periods of 20 up to 30 years, and must therefore be prepared to support various efforts, such as tidal, wind currents and everything that is related. This paper focuses on a study on the fatigue behavior of microalloyed steel, API 5L Grade X70, used to transport oil and gas by pipelines. For analysis, we obtained the curves S-N (stress vs. number of cycles) using laboratory data collected from cylindrical longitudinal and transverse specimens used in axial fatigue test in accordance with ASTM E466. The tensile tests and microhardness were performed to characterize the mechanical properties of the samples, and it was found that the values meet the specifications of the standard API 5L. To characterize microstructurally the material, it was also made a metallographic analysis of the steel under study, and the origin of the fatigue crack was investigated with the support of a scanning electron microscope (SEM).

KEYWORDS: HSLA, SEM, Oil and Gas, Structural Integrity

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema mostrando a sequência de deformação durante a laminação controlada.....	21
Figura 2 – Ilustração esquemática do processo de laminação controlada com resfriamento acelerado durante o 2° e 3° estágios de laminação.....	21
Figura 3 – Efeito do resfriamento acelerado na microestrutura dos aços produzidos por laminação controlada	22
Figura 4 – Rota de fabricação U-O-E de tubos com costura.....	26
Figura 5 – Prensagem em “U”	27
Figura 6 – Equipamento para expansão a frio “E”	28
Figura 7 – Carregamento cíclico	29
Figura 8 – Bandas de deslizamento na superfície promovidas por deformação: (a) Unidirecional e (b) Alternada.	30
Figura 9 – Curva S-N, de tensão por número de ciclos	32
Figura 10 – Curva $a \times N$, de crescimento do tamanho da trinca contra vida, para vários níveis de tensão cíclica	35
Figura 11 – Representação esquemática do comportamento da taxa de propagação de trinca de fadiga em função do logaritmo da faixa do fator de intensidade de tensão.....	36
Figura 12 – Dimensões dos corpos-de-prova de tração cilíndricos, no sentido longitudinal e transversal de laminação da chapa de aço API 5L X70	41
Figura 13 – Dimensões dos corpos-de-prova cilíndricos de fadiga, no sentido longitudinal e transversal de laminação da chapa de aço API 5L X70...41	41
Figura 14 – Curva de tração obtida com o primeiro corpo-de-prova de aço API 5L X70 retirado na direção longitudinal da chapa.....	43
Figura 15 – Curva de tração obtida com o segundo corpo-de-prova de aço API 5L X70 retirado na direção longitudinal da chapa	44
Figura 16 – Zona de propagação da trinca originada na superfície da amostra, identificada através da microscopia de varredura com aumento de 300x.45	45

Figura 17 – Zona de propagação da trinca originada na superfície da amostra, identificada através da microscopia de varredura com aumento de 500x45	
Figura 18 – Região de propagação da trinca de fadiga com ampliação de 40x	46
Figura 19 – Região de propagação da trinca de fadiga com ampliação de 45x	46
Figura 20 – Curva de tração obtida com o primeiro corpo-de-prova de aço API 5L X70 retirado na direção longitudinal da chapa	47
Figura 21 – Curva de tração obtida com o segundo corpo-de-prova de aço API 5L X70 retirado na direção longitudinal da chapa	47
Figura 22 – Curva de tração obtida com o terceiro corpo-de-prova de aço API 5L X70 retirado na direção longitudinal da chapa	48
Figura 23 – Curva de tração obtida com o quarto corpo-de-prova de aço API 5L X70 retirado na direção longitudinal da chapa	48
Figura 24 – Curva de tração obtida com o primeiro corpo-de-prova de aço API 5L X70 retirado na direção transversal da chapa	48
Figura 25 – Curva de tração obtida com o segundo corpo-de-prova de aço API 5L X70 retirado na direção transversal da chapa	49
Figura 26 – Curva de tração obtida com o terceiro corpo-de-prova de aço API 5L X70 retirado na direção transversal da chapa	49
Figura 27 – Curva de tração obtida com o quarto corpo-de-prova de aço API 5L X70 retirado na direção transversal da chapa	49
Figura 28 – Curva S-N, de tensão por número de ciclos, obtida através dos corpos-de- prova cilíndricos longitudinal e transversal.	51
Figura 29 – Curva S-N, de tensão por Log número de ciclos, obtida através dos corpos-de-prova cilíndricos longitudinal e transversal.	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Representação da composição química do aço API 5L X65 em % em massa.....	38
Tabela 2 - Propriedades mecânicas do aço API 5L X70, retirado na direção longitudinal da chapa	48
Tabela 3 – Propriedades mecânicas do aço API 5L X70, retirado na direção transversal da chapa.....	48

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Vida em fadiga.....	30
Equação 2 – Fator de intensidade de tensões	34
Equação 3 – Paris-Erdogan	34
Equação 4 – Taxa de propagação de trincas.....	37

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Simbologia adotada para classificação da microestrutura de aços

ARBL.....24

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BRICS – Brasil, Rússia, Índia, China e África do Sul

EIA – *Energy Information Administration*

OCDE – Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico

OPEP – Organização dos Países Exportadores de Petróleo

ANP – Agência Nacional do Petróleo

ARBL – Alta Resistência e Baixa Liga

API – *American Petroleum Institute*

API 5L – *Specification for Line Pipe Steel*

ASME – *American Society of Mechanical Engineers*

TMCP – *Thermomechanical-controlled Processing*

ISIJ – *The Iron and Steel Institute of Japan*

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

MAG – *Metal Active Gas*

ISO – *International Standardization Organization*

HV – *Hardness Vickers*

S-N – Tensão *versus* número de ciclos

CDP – corpo-de-prova

TL – Laminação na direção transversal da chapa

LT – Laminação na direção longitudinal da chapa

DP- Desvio Padrão

LISTA DE SÍMBOLOS

H_2S – Ácido Sulfídrico

N_f – Vida em Fadiga

N_i – Número de ciclos para a iniciação da trinca

N_p – Propagação da Trinca

N – número de ciclos

α – Velocidade de propagação da trinca

ΔK – solitação cíclica no extremo da trinca

K – fator intensidade de tensão

c – fator geométrico da trinca

σ – tensão uniaxial atuante perpendicular ao plano da trinca

a – comprimento da trinca

W – largura do corpo-de-prova de propagação de trincas

$K_{\text{máx}}$ - fator intensidade de tensão máximo

$K_{\text{mín}}$ - fator intensidade de tensão mínimo

C – Carbono

Mn – Manganês

P – Fósforo

S – Enxofre

Nb – Nióbio

V – Vanádio

Fe – Ferro

R_a – Rugosidade Média

R – Razão de carga

σ_{LE} – limite de escoamento

σ_{LR} – limite de resistência

ϵ_{LR} – deformação na tensão máxima

ϵ_{Frat} – deformação na fratura

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
1.1. OBJETIVO	17
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1. AÇOS DE ALTA RESISTÊNCIA E BAIXA LIGA (ARBL).....	18
2.2. LAMINAÇÃO CONTROLADA	19
2.3. MICROESTRUTURA DOS AÇOS ARBL.....	22
2.4. PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE TUBOS DE AÇO API 5L X70 ...	24
2.5. FADIGA	28
2.5.1 Conceitos Básicos	28
2.5.2 Curva S-N	32
2.5.3 Propagação de trincas de fadiga.....	33
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	34
3.1. MATERIAL	38
3.2. MÉTODOS.....	39
3.2.1 Microscopia Óptica (MO).....	39
3.2.2 Microscopia de Varredura (MEV).....	40
3.2.3 Ensaio de Microdureza Vickers (HV).....	40
3.2.4 Ensaio de Tração.....	40
3.2.5 Ensaio de Fadiga	41
3.2.6 Rugosidade.....	41
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	43
4.1. MICROSCOPIA ÓPTICA (MO)	43
4.2. MICROSCOPIA DE VARREDURA (MEV).....	44

4.3. MICRODUREZA VICKERS (HV).....	46
4.4. ENSAIO DE TRAÇÃO.....	47
4.5. ENSAIO DE FADIGA.....	51
4.6. RUGOSIDADE	52
5. CONCLUSÃO.....	53
REFERÊNCIAS.....	55

1. INTRODUÇÃO

Os países desenvolvidos, que tradicionalmente se apresentavam como os maiores consumidores de petróleo no mundo, já não vêm registrando crescimento significativo em sua demanda. Em contrapartida, os países emergentes – os BRICS (Brasil, Rússia, Índia, China e África do Sul) e outros países em desenvolvimento – começam a ganhar destaque no cenário internacional, alterando a geopolítica global de energia (PETROBRAS MAGAZINE. Rio de Janeiro: ed.62, 2012).

Segundo levantamento feito pelo *United States Energy Information Administration* (EIA), o consumo de petróleo nos países emergentes subiu 2,76% nos dois últimos anos e a perspectiva é de nova alta para 2012 (de 42,45 milhões de barris por dia para 43,87 milhões). Outro estudo, divulgado pela Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE), estima que os países em desenvolvimento devam responder por 68% do aumento na demanda por petróleo até 2020.

Mas não é apenas a retração do consumo de petróleo nos países desenvolvidos e o aumento nos países em desenvolvimento que estão alterando os fluxos mundiais de comércio, já que a queda de produção do produto em algumas regiões e o crescimento da oferta em outras também colaboram para alteração deste mercado.

De acordo com as projeções da Organização dos Países Exportadores de Petróleo (Opep) e do Departamento de Energia do governo dos Estados Unidos sobre o mercado de energia, a redução do fornecimento convencional de petróleo em determinados países desenvolvidos será compensada pelo aumento da produção decorrente da exploração em águas profundas na Rússia e no Brasil.

O sucesso da Petrobrás na última década, principalmente com a camada do pré-sal, coloca o Brasil em posição de liderança no ranking mundial das descobertas de novas reservas de petróleo.

O termo pré-sal refere-se a um conjunto de rochas localizadas nas porções marinhas de grande parte do litoral brasileiro, com potencial para geração e acúmulo de

petróleo. É chamado de pré-sal porque forma um intervalo de rochas que se estende por baixo de uma extensa camada de sal, que em certas áreas da costa atinge espessuras de até 2.000m (PETROBRAS MAGAZINE. Rio de Janeiro: e.61, 2012, p43).

As descobertas do pré-sal podem colocar o Brasil entre os principais produtores mundiais de petróleo e gás natural. “Somente a Petrobrás tem planos de produzir 3,95 milhões de barris de óleo por dia no Brasil em 2020, sendo 1,078 milhão de barris provenientes do pré-sal” (PETROBRAS MAGAZINE. Rio de Janeiro: ed.61, 2012). Porém, como grande parte das descobertas do pré-sal ainda não foram contabilizadas entre as atuais reservas provadas, o Brasil, que atualmente encontra-se em uma posição distante dos países árabes no que diz respeito à produção de petróleo, caminha a passos largos em direção às primeiras colocações.

Segundo avaliação da certificadora *Gaffney, Cline & Associates*, contratada pela Agência Nacional do Petróleo (ANP) para avaliar as acumulações do pré-sal, o volume total estimado só dos campos de Libra e Franco pode chegar a 13 bilhões de barris.

Estima-se um total de 7,9 bilhões de barris apenas para o prospecto de Libra, considerado o maior achado petrolífero já encontrado no Brasil. Algumas áreas descobertas, como as de Lula e Cernambi (reservas estimadas de 5 a 8 bilhões de barris), Iara (estimativa de 3 a 4 bilhões) e Guará (cerca de 1 bilhão a 2 bilhões), assim como algumas áreas do pré-sal localizadas na Bacia de Campos (com estimativas entre 1 e 2 bilhões), tiveram apenas uma pequena parte de seus números contabilizados entre as atuais reservas provadas (PETROBRAS MAGAZINE. Rio de Janeiro: e.61, 2012).

Em função desta significativa expansão do setor, observa-se um crescimento de novas instalações de linhas dutoviárias de gás e petróleo no país. Grandes companhias exploradoras, assim como os fabricantes de tubos para linhas dutoviárias, têm como desafio a busca incessante pelo aumento dos níveis de segurança e confiabilidade operacional no transporte dos produtos de fontes cada vez mais remotas para os grandes centros urbanos. Os principais objetivos são redução de custos, aumento da eficiência operacional e, mais importante, a eliminação de acidentes causadores de danos ambientais e acidentes potencialmente perigosos em áreas densamente urbanizadas (SILVA, M. C., 2009).

De acordo com Júnior (2004), o crescimento da malha dutoviária no país também é estimulada pelo envelhecimento e necessidade de renovação das atuais linhas instaladas, além, é claro, do aumento da demanda do consumo de petróleo e derivados no país.

Segundo Silva (2004), novas pesquisas e desenvolvimentos de metodologias voltadas à integridade estrutural promovem a utilização de aços de alta resistência e baixa liga (ARBL), de classificação API (*American Petroleum Institute*), para aplicação em sistemas dutoviários com alta pressão e vazão, visando menores custos construtivos, operacionais e de fabricação.

Os aços ARBL empregados em sistemas dutoviários possuem alta resistência a esforços, boa tenacidade e boa soldabilidade, características obtidas devido ao baixo teor de carbono e processos termodinâmicos de fabricação.

Porém, segundo Nuñez (2006), não basta os dutos de gás e petróleo apenas suportarem grandes pressões, mas também devem ser resistentes à corrosão interna, corrosão sob tensão, entre outras; provenientes das altas concentrações de impurezas como o CO₂ e H₂S.

Em meio a este cenário, a indústria nacional fomenta o desenvolvimento de novas tecnologias para a fabricação de tubos, buscando uma maior vida útil de operação das tubulações, através da diminuição dos riscos de falhas dos materiais empregados no processo construtivo das mesmas. Tais materiais devem suportar as mais severas condições de trabalho encontradas no processo de transporte do petróleo e seus derivados, levando em consideração as altas temperaturas de trabalho e, principalmente, a composição química variada do petróleo (mistura complexa de hidrocarbonetos gasosos, líquidos e sólidos, constituído de átomos de carbono e hidrogênio, associados a pequenas quantidades de oxigênio, nitrogênio, enxofre e metais pesados). A corrosão, a fragilização por hidrogênio e às tensões residuais oriundas do processo de fabricação dos tubos são apontadas como os principais fatores causadores de falhas nas tubulações. Muitas das falhas prematuras e catastróficas em dutos de aço estão relacionadas à propagação de trincas e ao aumento da taxa de corrosão, originadas das reações de adsorção e posteriormente absorção dos átomos de

hidrogênio no metal quando o H₂S entra em contato com as paredes dos tubos (SANT'ANNA, 2010).

O grande interesse das indústrias de petróleo e gás no uso de aços microligados de alta resistência para construção de linhas dutoviárias de transmissão e distribuição de petróleo e gás é uma já consolidada tendência no mundo. O emprego desses tipos de aços, contendo altos valores de resistência mecânica e tenacidade, baixas temperaturas de transição frágil-dúctil e baixo carbono equivalente, oferecem potenciais benefícios em termos de maior pressão na linha sem aumento da espessura da parede, resultando em menor custo na fabricação dos tubos, na sua instalação e no transporte do produto.

No entanto, “pressões elevadas geram um estado de tensões bastante severo sobre um defeito (ou trinca) potencialmente presente no material do tubo”. A extensão deste defeito, em paredes de espessura mais reduzida, pode levar à falha da estrutura. Desta forma, são de suma importância para operação de sistemas dutoviários, o controle e o monitoramento dos defeitos (JÚNIOR, 2004).

Segundo Godoy (2008), trincas em tubos também são geradas durante o seu transporte, do local de fabricação até o local de instalação. Os altos custos para o reparo de tubulações com estas falhas, geralmente identificadas durante o teste hidrostático realizado antes da liberação para operação, estimulam pesquisas para se obter um melhor controle no processo de transporte e manuseio dos tubos antes de sua instalação.

O investimento em equipamentos de alta tecnologia e alto rigor à qualidade são pré-requisitos para fabricação de tubos. O controle em todos os estágios de produção, assim como os testes destrutivos e não destrutivos realizados, são itens mandatórios da especificação API 5L (*Specification for Line Pipe Steel*), atualmente feitos através de um sistema integrado, o qual engloba todos os estágios de fabricação, desde a chapa na siderúrgica, até a instalação dos tubos. A rastreabilidade é um requisito indispensável para qualificação da fabricante perante agências certificadoras e clientes finais. Os aços utilizados especificamente na fabricação de tubos para linhas de condução seguem a classificação API 5L (GODOY, 2008).

1.1.OBJETIVO

Este projeto de pesquisa tem por objetivo qualificar mecânica e microestruturalmente uma placa de aço microligado grau API 5L X70, empregada na fabricação de dutos e *risers* (dutos que ligam o poço de exploração à plataforma de exploração) para sistemas de condução de gás e petróleo, conforme as recomendações da norma API 5L (*Specification for Line Pipe Steel*). Considerando que 80% da produção de óleo e gás são transportados por dutos submarinos, os quais são submetidos a esforços cíclicos provenientes de correntes marítimas, movimentação da plataforma na superfície, etc., especial ênfase será atribuída à análise do comportamento em fadiga do aço em questão, com base nas recomendações da norma ASTM E466.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. AÇOS DE ALTA RESISTÊNCIA E BAIXA LIGA (ARBL)

A preocupação da engenharia com os projetos de tubulação para transporte de produtos de petróleo começou antes do início do século 20. O desenvolvimento dos tubos de aços e métodos de união de tubos associados ao início do uso de gás natural impulsionaram as primeiras instalações de gasodutos e oleodutos a partir de 1930. Neste mesmo contexto, surgiram novas pesquisas visando obter materiais com alta resistência e boa soldabilidade para fabricação de tubos que suportassem maiores pressões internas e com menores espessuras de parede (GODOY, 2008).

Os aços ARBL são aços microligados que apresentam em sua forma original mais simples, microestrutura típica de ferrita-perlita. Apesar de possuir uma composição química similar a de um aço de baixo-carbono, as microadições de elementos de liga proporcionam a este tipo de aço, propriedades mecânicas superiores (SILVA, M. C., 2004).

Ainda segundo Silva (2004), o avanço da tecnologia na produção destes aços, como as melhorias no processo de laminação, confere a estes materiais um tamanho de grão reduzido, que por sua vez proporciona um maior limite de escoamento aos mesmos. A adição de nióbio e vanádio possibilita uma diminuição gradual do teor de carbono nestes aços (o objetivo da redução do teor de carbono é o aumento da soldabilidade e tenacidade), já que os mesmos compensam a diminuição da resistência devido à redução deste elemento.

Segundo a API (*American Petroleum Institute*), os aços a serem utilizados na indústria do petróleo são classificados em função da aplicação, composição química e resistência mecânica. Os aços utilizados especificamente na fabricação de tubos para linhas de condução seguem a classificação API 5L (*Specification for Line Pipe Steel*).

De acordo com Sant'Anna (2010), a especificação API 5L foi criada para normatizar a fabricação de tubos de aço (ARBL) destinados à construção de linhas de

oleodutos e gasodutos, estabelecendo os valores mínimos das propriedades mecânicas e seus respectivos empregos na construção das mesmas.

Segundo Júnior (2004), os vários graus de aço especificados pela norma API 5L fornecem uma gama de materiais com diferentes valores de resistência mecânica, tenacidade e resistência de fragilização por hidrogênio. Os aços microligados são comumente utilizados em aplicações estruturais em tubos devido a sua característica de deformar plasticamente antes da ruptura. Desta forma, através de inspeções periódicas nas tubulações, estas deformações podem ser identificadas antes que se ocorra uma falha catastrófica. Além da utilização em dutos e tubulações, os aços ARBL são empregados na fabricação de vasos de pressão, reatores, componentes estruturais na indústria automobilística, estruturas navais e *offshore*, entre outros.

De acordo com Silva (2004), a laminação controlada tem sido uma das práticas mais utilizadas na fabricação dos aços ARBL. Tal processo utiliza as mais variadas combinações entre temperatura e quantidade de deformação a quente, objetivando altos valores de resistência e tenacidade através dos efeitos do refino do grão e da precipitação de carbonetos e nitretos dos elementos microligantes.

2.2. LAMINAÇÃO CONTROLADA

Nos últimos anos foi notável o avanço na tecnologia utilizada para fabricação de aços para serem utilizados na fabricação de tubos. Foi obtido um considerável aumento no valor de tenacidade à fratura desses materiais a partir da década de 1960 através da microadição de elementos de liga e novas tecnologias de fabricação. Esta evolução culminou com o desenvolvimento de novos métodos tecnológicos, como os processos de laminação controlada e resfriamento acelerado na prática do processamento termomecânico de aços microligados (*thermomechanical-controlled processing TMCP*) (JÚNIOR, 2004).

De acordo com Silva (2009), “O objetivo básico da laminação controlada é deformar os grãos de austenita durante o processo de laminação para obtenção de

grãos de ferrita finos durante o resfriamento”. Para conseguir obter grãos finos de ferrita, a austenita é laminada em temperaturas onde não ocorra recristalização. Durante a laminação a quente, a precipitação do nióbio na austenita proporciona maior intervalo de temperatura na qual não há recristalização, e desta forma o aço pode ser mais bem trabalhado a quente para obtenção da austenita com alto grau de deformação.

Segundo Núñez (2006), o processo de laminação controlada proporciona melhores propriedades mecânicas aos aços microligados, quando os mesmos são comparados com outros aços com o mesmo teor de elementos de liga. Além disso, o processo de laminação controlada confere boa tenacidade e soldabilidade aos mesmos.

O processo de laminação controlada é composto basicamente por dois estágios: desbaste e acabamento. O objetivo do estágio de desbaste, primeiro a ser realizado (temperaturas entre 950°C e 1100°C), é o refino de grão através da completa recristalização da austenita depois de cada passe de laminação, conforme Fig.1. Já no estágio de acabamento, posterior ao desbaste, a recristalização estática da austenita é retardada (temperaturas inferiores a 900°C) devido ao efeito estabilizador dos elementos de liga. Ao final do processo (ver Fig.1), grãos finos de ferrita são obtidos a partir da transformação dos grãos de austenita, muito deformados e alongados (*pancake*), provenientes da deformação progressiva conseguida no intervalo entre passes (SILVA, M. C., 2009).

Segundo Núñez (2006), a alta densidade de discordâncias presente nesta ferrita promove um aumento de resistência e tenacidade na chapa, com microestrutura ferrítica-perlítica.

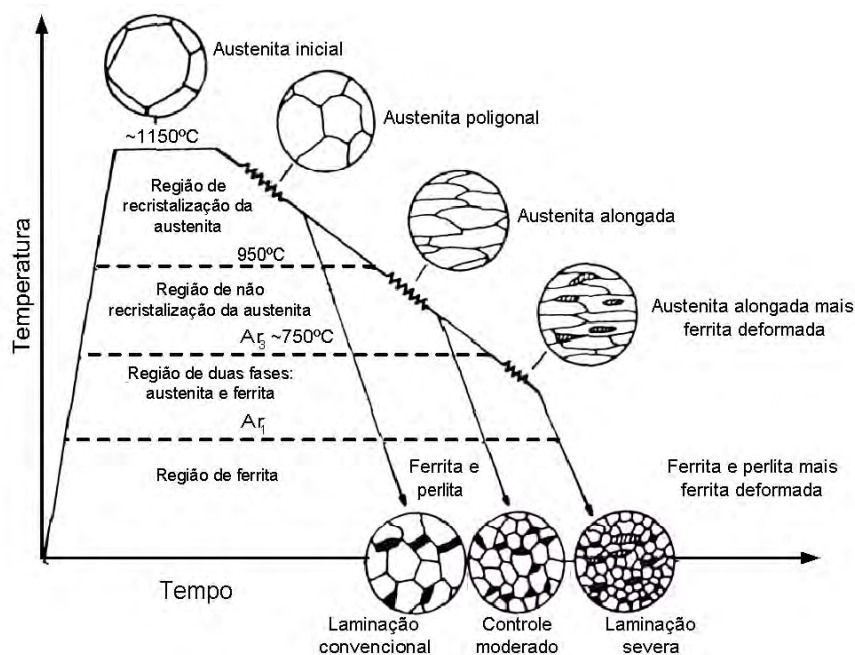


Figura 1: esquema mostrando a sequência de deformação durante a laminação controlada (Shiga, 1981).

Através de processos de resfriamento acelerado, é possível se produzir aços com grãos mais finos e com melhores propriedades de tenacidade à fratura, resistência à tração e resistência à corrosão. As etapas de resfriamento acelerado estão ilustradas na Figura 2 (SILVA, E. S., 2010).

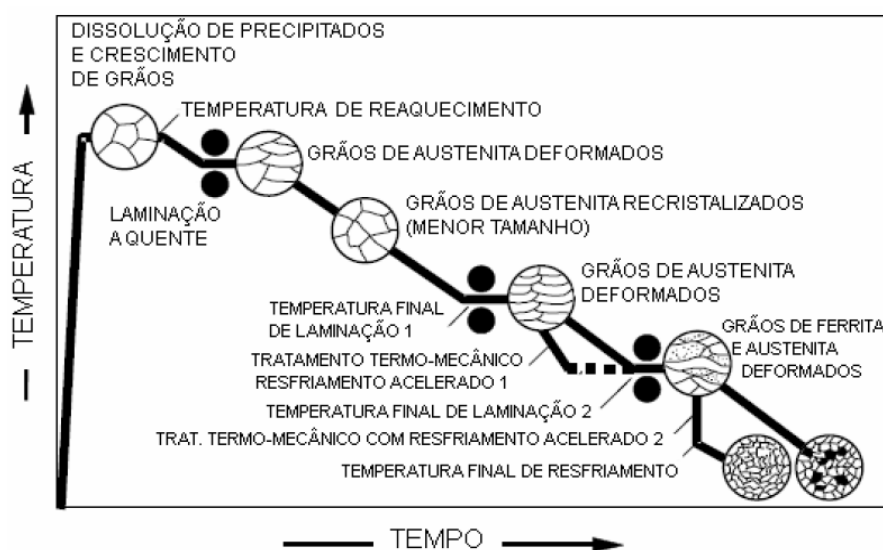


Figura 2: Ilustração esquemática do processo de laminação controlada com resfriamento acelerado durante o 2º e 3º estágios de laminação

Através do primeiro resfriamento realizado no processo de laminação controlada com resfriamento acelerado, obtém-se o refino dos grãos de ferrita. Já o segundo

resfriamento previne a formação da perlita, formando a bainita. A Figura 3 mostra a comparação entre a microestrutura final do mesmo aço resultante do processo de laminação controlada com e sem resfriamento acelerado (SILVA, E. S., 2010).

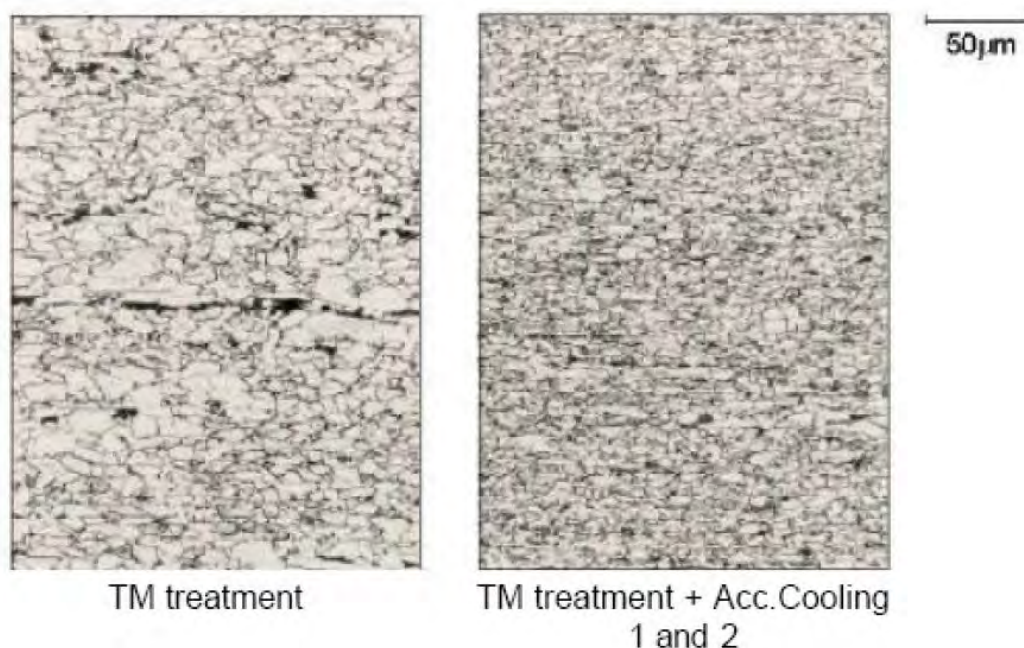


Figura 3: Efeito do resfriamento acelerado na microestrutura dos aços produzidos por laminação controlada (SILVA, E. S., 2010).

A Figura 3 mostra regiões com ilhas de perlita presentes principalmente no centro da imagem do aço que não sofreu resfriamento acelerado. Já o aço proveniente do processo de laminação com resfriamento acelerado mostra uma microestrutura mais homogênea (propicia melhores propriedades de resistência mecânica e tenacidade ao aço) com maior refino de grão e substituição da estrutura ferrítica pela bainítica (SILVA, E. S., 2010).

2.3. MICROESTRUTURA DOS AÇOS ARBL

Em decorrência da coexistência de diferentes constituintes microestruturais, os aços ARBL apresentam uma apreciável resistência mecânica, combinada com boa tenacidade e soldabilidade, quando comparado com outros aços que os mesmos substituem. Parte da microestrutura dos novos aços estruturais ARBL é formada

através da transformação bainítica, juntamente com outros produtos de decomposição da austenita. A análise metalográfica é uma ferramenta importante para observação do efeito da microestrutura sobre as propriedades físicas e mecânicas dos aços ao carbono (SILVA, M. C., 2004).

Segundo Godoy (2008), é necessário um rigoroso controle da microestrutura durante a deformação a quente e no resfriamento subsequente do aço para que possa ser obtida uma microestrutura final condizente com as propriedades mecânicas requeridas em cada caso. Portanto, para que haja o domínio da tecnologia de produção dos aços de alta resistência mecânica, faz-se necessário o entendimento do efeito das variáveis de processamento e da relação microestrutura-propriedades.

Inúmeras discussões relacionadas à nomenclatura dos aços ARBL foram originadas devido à dificuldade de identificação das fases e microconstituintes dos mesmos (BARBOSA, V. S., 2011). Em busca de uma solução em torno da complexa microestrutura dos aços ARBL, um estudo foi desenvolvido pelo Comitê de Bainita (*Bainite Committee*) do ISIJ (*The Iron and Steel Institute of Japan*) (KRAUSS; THOMPSON⁴, 1995 apud SILVA, 2009). O Quadro 1 apresenta as possíveis fases microestruturais do estudo citado anteriormente.

KRAUSS, G.; THOMPSON, S. W. Ferritic microstructures in continuously low-and ultralow-carbon steels. **ISIJ International**, v.35, n.8, p.937-945, 1995. *apud* SILVA, 2009.

Quadro 1 – Simbologia adotada para classificação da microestrutura de aços ARBL
 Fonte: Krauss e Thompson, 1995; Ferrer, 2003; Ramirez, 2008. *apud* SILVA, 2009.

Símbolo	Nomenclatura
α_p ou PF	Ferrita poligonal
α_q ou QF	Ferrita quase-poligonal
α_w ou AF	Ferrita de Widmanstätten = Ferrita acicular
α_B^0 ou BF	Ferrita Bainítica
α_B ou GF	Ferrita Bainítica Granular = Ferrita granular
γ_r	Austenita retida
MA	Constituinte martensita-austenita
α_M ou M	Martensita
B	B _U : Bainita superior
	B _L : Bainita inferior
P	Perlita
P'	Perlita degenerada

2.4. PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE TUBOS DE AÇO API 5L X70

A fabricação de tubulações pressurizadas é normatizada, desde 1935, pela *American Society of Mechanical Engineers* (ASME), que determina vários requisitos de segurança nos projetos e nas operações de dutos industriais de petróleo e seus derivados.

Devido a menor relação custo por resistência mecânica, aproximadamente 90% das tubulações utilizadas para o escoamento, a armazenagem e o transporte do petróleo e seus derivados são fabricadas com aços ARBL. Este tipo de aço possui características interessantes, como a fácil conformação mecânica e boa soldabilidade. O aumento percentual de carbono na composição do aço proporciona um aumento no limite de escoamento, na resistência, na dureza e em sua temperabilidade. Porém, este aumento diminui a tenacidade do material e reduz sua soldabilidade, dificultando o

processo de fabricação de tubos com costura. Devido a estas alterações nas características mecânicas do aço, provenientes da alteração do percentual de carbono, os aços utilizados na fabricação de tubos têm sua composição química limitada em 0,35%. Aços com até 0,25% em teor de carbono são denominados aços de baixo carbono, já os com percentuais superiores (até 0,60%), são denominados de médio carbono (SANT'ANNA, 2010).

Atualmente encontramos diversos processos industriais para produção de tubos. Segundo Júnior (2004), de acordo com a característica exigida para o produto final, podemos dividir estes processos em duas categorias: tubos com costura e tubos sem costura. No processo de fabricação de tubos sem costura (sem cordão de solda ao longo de seu comprimento), abre-se um orifício central ao longo do comprimento de uma barra circular maciça, que é conformada a quente através da utilização de uma lança com mandril, ajudada por roletes cônicos que geram um estado de compressão na barra. Evidentemente, tais tubos são produzidos em materiais dúcteis e em diâmetros externos reduzidos.

Na fabricação de tubos que envolvem soldagem, podem ser utilizadas diversas configurações de matéria-prima original em forma de planos.

Segundo Godoy (2008), neste processo de fabricação as chapas de aço são pré-formadas em três estágios de prensagem consecutivos e distintos. No primeiro estágio ocorre a prensagem de bordas (*Crimping plates edges*), no segundo estágio ocorre a prensagem em “U” (*U-ing press*) e o terceiro estágio a prensagem em “O” (*O-ing press*). Este processo também pode ser descrito como processo “U-O-E”, ou seja: prensagem em “U”, prensagem em “O” e expansão a frio “E” (*Expanding*).

Com este tipo de fabricação, torna-se possível a obtenção de tubos de maiores diâmetros. Chapas finas, grossas, bobinas e tiras metálicas são comumente utilizadas neste tipo de fabricação. Para tubos produzidos através de bobinas ou tiras metálicas, é realizada uma conformação através de uma matriz que flexiona as bordas da chapa dando à mesma a geometria final do tubo, ou através da calandragem da chapa em forma helicoidal. Já os tubos fabricados a partir de chapas frequentemente utilizam o processo U-O-E (vide Figura 4).

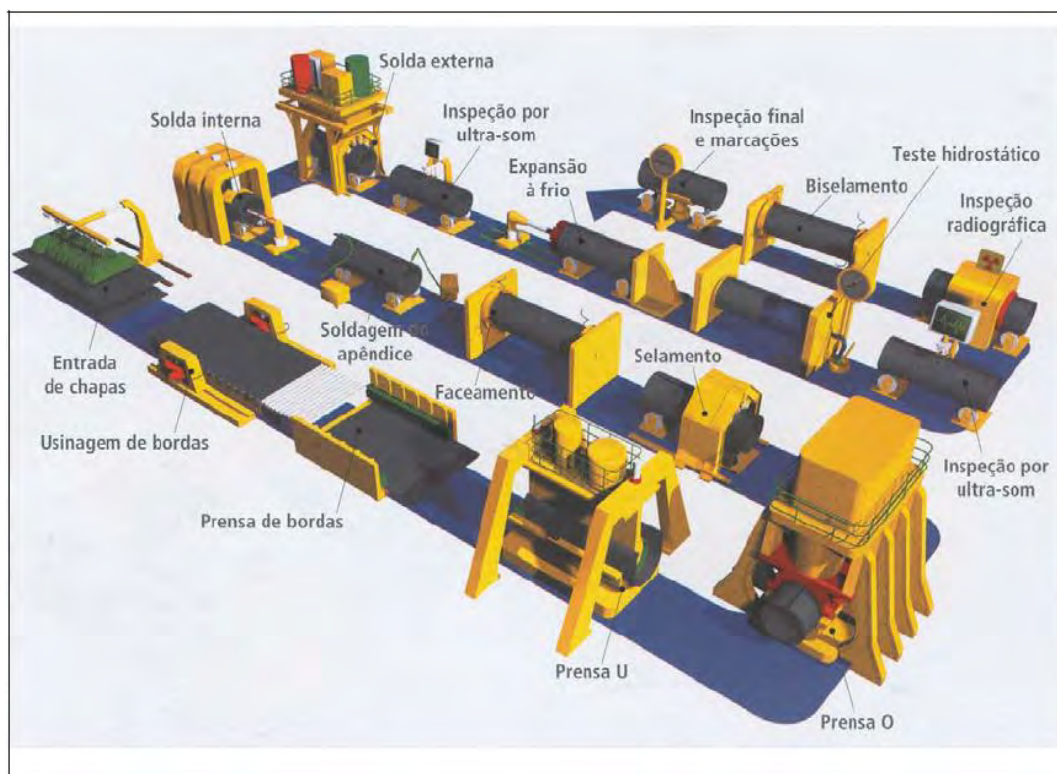


Figura 4: Rota de fabricação U-O-E de tubos com costura (Cortesia CONFAB S.A.)

No processo U-O-E, a chapa inicial é calandrada em forma de U, e a seguir, através de outro processo de conformação, obtêm-se um formato cilíndrico com chanfro longitudinal, com suas abas laterais fechadas (O). Através de um processo subsequente de soldagem ao longo de seu comprimento, o tubo é fechado, e posteriormente expandido (E) por meio da aplicação de pressão interna para ajuste das dimensões finais do produto (JÚNIOR, 2004).

Conforme mostrado na Figura 5, a prensagem “U” é realizada através de uma prensa hidráulica, a qual empurra a chapa entre dois suportes laterais, por meio de uma matriz e uma ferramenta circular (GODOY, 2008).



Figura 5: Prensagem em “U” (GODOY, 2008).

Depois de realizado o processo “U”, as chapas são direcionadas para prensa “O” através de uma mesa elevatória e posicionadora (*conveyor*). Segundo Godoy (2008), para que não ocorra algum desalinhamento de bordas com degrau maior que o especificado (*offset*) durante o processo de soldagem “MAG” provisório, os processos de deformação das etapas “U” e “O” devem ser coordenados para que o efeito “mola” não tenha maiores efeitos e altere a abertura do cilindro formado. Por isso, a etapa do processo de prensagem em “O” é fundamental para obtenção de requisitos dimensionais de diâmetro, ovalização, retilinidade (*empeno*) após a expansão a frio.

A expansão a frio (ver Fig.6) tem como objetivo conferir aos tubos produzidos as características dimensionais (diâmetro, ovalização e retilinidade) de acordo com as exigências especificadas.



Figura 6: Equipamento para expansão a frio “E” (GODOY, 2008).

De acordo com a norma API 5L X, no processo de fabricação de tubos de aço, deve-se sempre realizar testes hidrostáticos, inspeção por raios-X e ultrassom, além de ensaios para verificação de dimensões e peso. Para isso, são necessários eficientes equipamentos de fabricação e modernas tecnologias de controle de qualidade para que um determinado processo de fabricação de tubos cumpra com as exigências estabelecidas.

2.5. FADIGA

2.5.1 Conceitos Básicos

A fadiga é um problema sempre presente que assola qualquer estrutura submetida a um carregamento cíclico e/ou de carga variável. Um carregamento cíclico pode gerar um crescimento gradual da trinca ou até mesmo uma ruptura catastrófica da estrutura, podendo gerar consideráveis custos em termos de tempo, dinheiro e vidas. O incentivo ao estudo de propagação de trincas por fadiga é, portanto, muito alto. Engenheiros que

projetam as mais diversas estruturas devem compreender e serem capazes de prever o crescimento de fissuras de fadiga sob as condições de carga de serviço de tal modo que a estrutura não venha a falhar antes de sua inspeção ou substituição (RAMULU, M.; KOBAYASHI, A. S., 2001).

A fadiga é definida como um dano acumulativo, localizado e permanente, causado por repetidas flutuações de tensão (ver Fig.7). A falha por fadiga é contabilizada como sendo maior que qualquer outro tipo de falha estudada pela engenharia (GODOY, 2008).

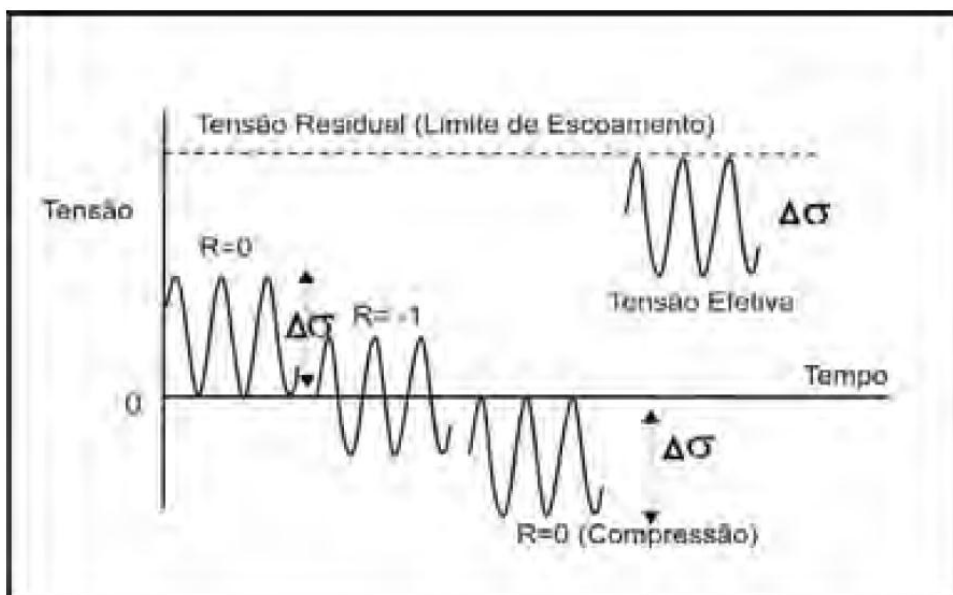


Figura 7: Carregamento cíclico (MADDOX, 2007).

A fadiga em metais ocorre quando o material é submetido a tensões oscilantes e pode falhar a tensões muito menores do que àquela necessária para o rompimento devido à aplicação de uma carga estática, como o que ocorre no ensaio de tração (CALLISTER JR., W., 2002).

De acordo com a Figura 8a, degraus provenientes das bandas de escorregamento surgem na superfície do material quando o mesmo sofre deformação em um único sentido. Quando submetido ao efeito do carregamento cíclico, ocorre inversão periódica do sentido da deformação, e as bandas de escorregamento que atingem a superfície formam reentrâncias, denominadas intrusões e extrusões, mostradas na Figura 8b. Os sulcos superficiais se tornam mais profundos na medida em que se

aumenta o número de ciclos, e as intrusões adquirem a forma de uma trinca (SILVA, E. S., 2010).

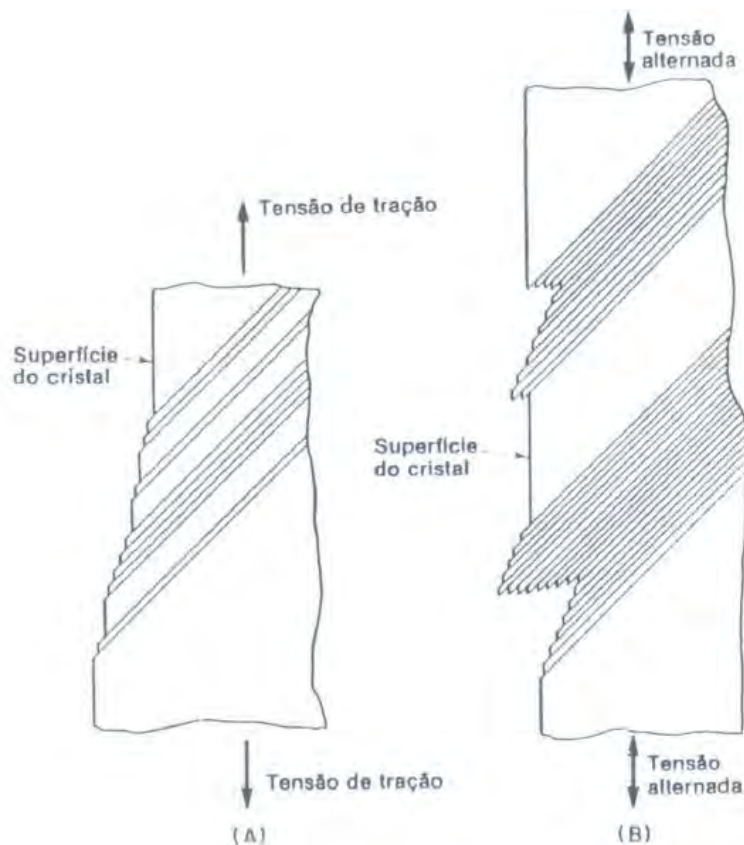


Figura 8: Bandas de deslizamento na superfície promovidas por deformação. (a) Unidirecional e (b) Alternada.

Os três estágios no qual ocorre o processo de fadiga são: nucleação, propagação e ruptura final da estrutura. Geralmente, as trincas de fadiga são nucleadas na superfície livre, porém sempre há uma interface envolvida quando as mesmas se dão no interior do material (SILVA E. S., 2010).

A vida em fadiga (N_f), ou seja, a quantidade de ciclos até a ocorrência da fratura pode ser considerada como sendo a soma do número de ciclos para a iniciação da trinca (N_i) e a propagação da trinca (N_p) (CALLISTER, 2002):

$$N_f = N_i + N_p \quad (1)$$

Como a etapa de fratura final ocorre muito rapidamente, sua contribuição é insignificante para duração total da fadiga (GODOY, 2008).

A resistência à fadiga do componente deve ser analisada de forma diferente para o período de nucleação da trinca e para o período de propagação, pois os fenômenos

envolvidos são distintos. Devido a defeitos provenientes, por exemplo, do processo de fabricação, principalmente para componentes de grandes dimensões, o material não pode ser considerado homogêneo. Neste caso, como a nucleação da trinca é imediata a partir do defeito, a vida de fadiga depende apenas da resistência do material à propagação dos defeitos.

Segundo Godoy (2008), os sítios de nucleação de trincas incluem riscos superficiais, ângulos vivos, porosidades em solda, inclusões, concentradores macroscópicos de tensão, assim como regiões de não uniformidade microestrutural e química. A partir do momento em que uma trinca estável tenha se nucleado, ela então começa a se propagar muito lentamente na estrutura do material. Dependendo do tipo do material envolvido, a fratura final pode ter características frágeis ou dúcteis. A fratura dúctil apresenta apreciável deformação plástica antes e durante a propagação da trinca; já a fratura frágil, apresenta rápida propagação da trinca, nenhuma deformação macroscópica e uma pequena micro-deformação.

Os limites de tensão e tempo de uso de uma peça ou elemento de máquina são especificados através do ensaio de resistência à fadiga. Este ensaio também é utilizado para definir aplicações de materiais. De um modo geral, é sempre preferível utilizar a própria peça de aplicação, em condições normais de produção, para realização do ensaio de fadiga. Porém, quando não é possível a realização do ensaio no próprio produto, ou quando se deseja comparar materiais, o ensaio é feito em corpos-de-prova padronizados. Os aparelhos de ensaio de fadiga são constituídos por um sistema de aplicação de cargas, que permite alterar a intensidade e o sentido do esforço, e por um contador de número de ciclos. O teste é interrompido assim que o corpo de prova se rompe. O ensaio é realizado de diversas maneiras, de acordo com o tipo de sollicitação que se deseja aplicar: torção, tração-compressão, flexão ou flexão rotativa (ESCOLA PROFISSIONAL DE CAPELAS – Ensaio de Fadiga).

2.5.2 Curva S-N

Através de estudos iniciais efetuados por Wöhler (1870), componentes estruturais foram submetidos a esforços cíclicos de flexão, torção e carregamentos axiais. Desta forma, resultou-se a caracterização do comportamento à fadiga em termos de amplitude de tensão versus vida à fadiga, onde os resultados do ensaio de fadiga são representados através da curva “tensão-número de ciclos”, ou simplesmente curva S-N. A curva S-N relaciona um valor de tensão alternada S (*Stress*) ao número de ciclos (N) que pode levar a peça, sob ensaio, à ruptura (SOUZA, E. D.).

Supondo que, para uma determinada tensão S_1 , o corpo de prova se rompa em um certo número de ciclos N_1 , e para uma solicitação S_2 se rompa em N_2 ciclos, e assim por diante, pode-se construir o diagrama S-N (ver Figura 9), com a tensão no eixo das ordenadas e o número de ciclos no eixo das abscissas.

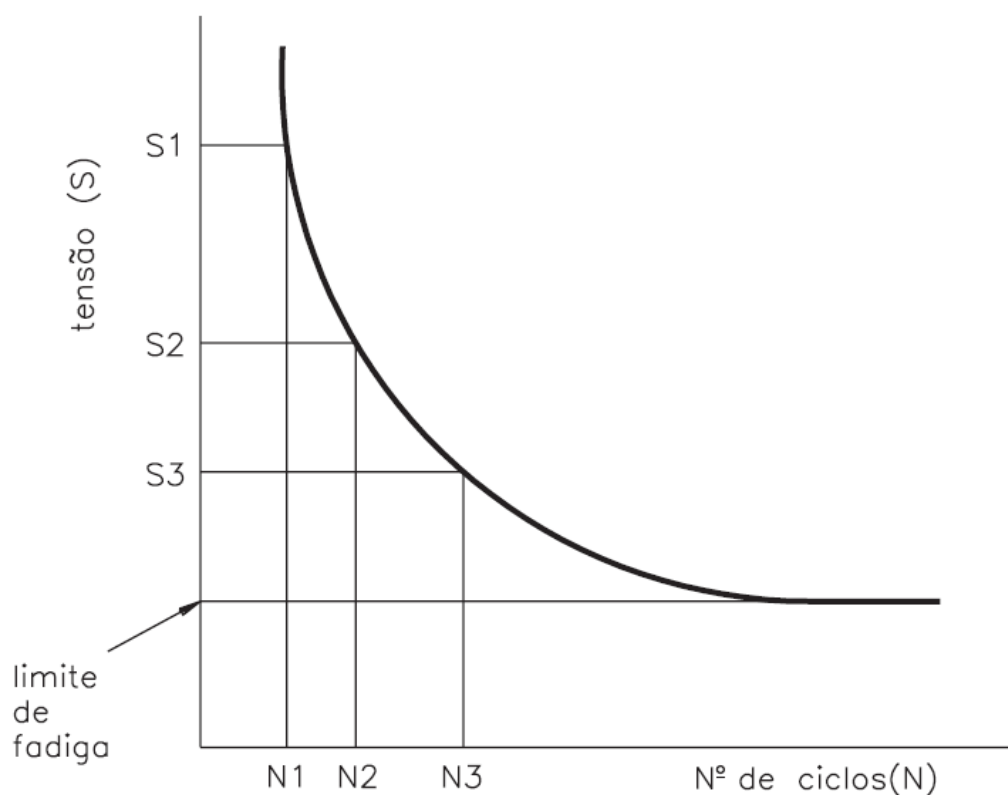


Figura 9: Curva S-N, de tensão por número de ciclos

Observando a curva da Figura 9, nota-se que, à medida que se diminui a tensão aplicada, o corpo de prova resiste a um maior número de ciclos. Nota-se, também, que

diminuindo a tensão a partir de um determinado nível, em que a curva se torna horizontal, o número de ciclos para o rompimento do corpo de prova torna-se praticamente infinito. Esta tensão máxima, que praticamente não provoca mais a fratura por fadiga, chama-se limite de fadiga ou limite de resistência à fadiga, típico de metais ferrosos. Segundo Silva (2010), para a maioria das ligas não ferrosas, onde este limite não é observado, estima-se o valor de tensão na qual a vida em fadiga seja aproximadamente 10^8 ciclos.

2.5.3 Propagação de trincas de fadiga

A previsão de vida de um determinado componente depende diretamente da velocidade de propagação da trinca, da/dN , ou α , a qual é função da sollicitação cíclica no extremo da trinca, caracterizada por ΔK .

Durante o processo de fabricação do material, as discontinuidades mais comuns são originadas das marcas de laminação, dupla-laminação, defeitos superficiais, etc. Defeitos como a porosidade, mordedura, falta de penetração, entre outros, são originados dos processos de soldagem do material. Por fim, as discontinuidades mais comuns resultantes da construção de uma determinada linha dutoviária são decorrentes da corrosão sob tensão, trincas induzidas por hidrogênio, cavas, amassamentos (mossas), desalinhamento e ovalização, etc. Atualmente, o tamanho do defeito no sólido ou na estrutura foi incorporado pela Mecânica da Fratura como uma variável adicional no estudo dos materiais estruturais, considerando que os mesmos não são contínuos. Desta forma, definiu-se a propriedade tenacidade, a qual representa a capacidade de um determinado material em absorver energia mecânica sem fraturar, ou a resistência do material à propagação de um defeito (tipo trinca). Para os materiais metálicos, quanto maior a área sob a curva tensão-deformação, maior é a tenacidade do material (JÚNIOR, 2004).

A descrição do campo de tensões que atua na ponta de uma determinada trinca é feita através da mecânica da fratura linear elástica com a equação (2) do fator de intensidade de tensões.

$$K = C.\sigma.\sqrt{\pi.a} \quad (2)$$

onde:

K é o fator de intensidade de tensões (MPa m);

$C = f(a/W)$ é o fator geométrico da trinca;

σ é a tensão uniaxial atuante perpendicular ao plano da trinca (MPa)

a é o comprimento da trinca;

W é a largura do corpo de prova

Os pesquisadores Paris e Erdogan (1963) observaram, através do estudo de propagação de trincas, que o crescimento da trinca por carregamento cíclico era uma função da diferença entre $K_{\text{máx}}$ e $K_{\text{mín}}$ atuando na ponta da trinca, ou seja, da amplitude do fator intensidade de tensão ΔK . Devido à alternância da tensão aplicada através de carregamento cíclico, o valor de K varia a cada instante. Quando um corpo-de-prova trincado é submetido a uma variação de tensão constante $\Delta\sigma$, corresponde a uma variação entre um $K_{\text{máx}}$ e um $K_{\text{mín}}$. Portanto:

$$\Delta K = K_{\text{máx.}} - K_{\text{mín.}} = \Delta\sigma.C.\sqrt{\pi.a} \quad (3)$$

As curvas de comprimento de trinca (a) por número de ciclos (N) representam a evolução do comprimento de trinca durante o carregamento cíclico e são obtidas experimentalmente. A Figura 10 mostra um gráfico de $a \times N$ com três curvas de um mesmo material com iguais tamanhos de trinca inicial e com diferentes níveis de

tensões $S_1 > S_2 > S_3$. Pode-se observar que quanto maior o nível de tensão aplicado, menor é o número de ciclos do material até a sua ruptura (a ruptura do material é representada com um “x” na figura) (CALLISTER JR., W., 2002).

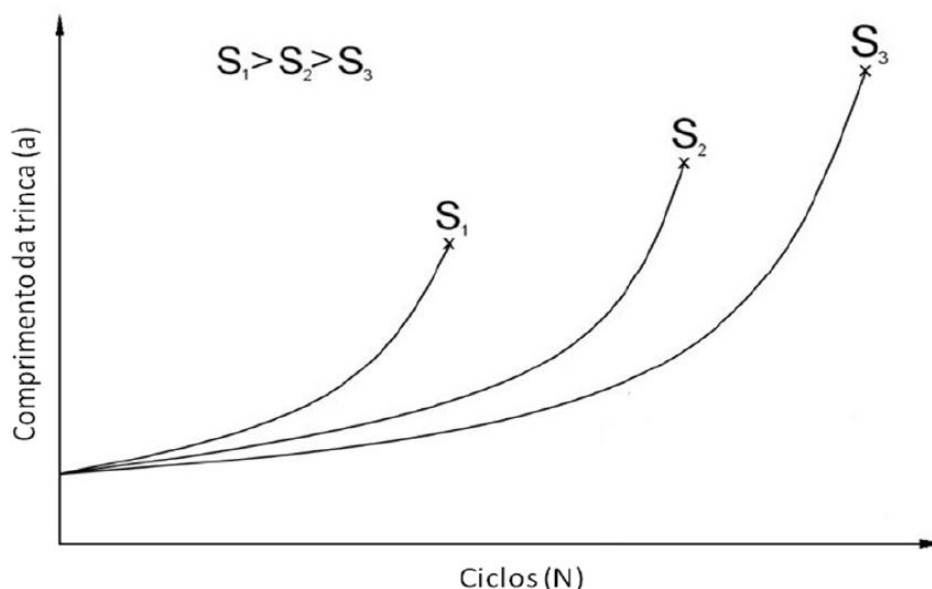


Figura 10: Curva $a \times N$, de crescimento do tamanho da trinca contra vida, para vários níveis de tensão cíclica.

Derivando cada ponto da curva representada na Figura 10, podemos calcular a taxa de propagação das trincas de fadiga (da/dN). Nota-se que o fator de intensidade de tensões (K), assim como a taxa de propagação de trincas de fadiga (da/dN) aumentam com o crescimento de a . A Figura 11 representa a relação existente entre o logaritmo da taxa de propagação (da/dN) e o logaritmo do fator de intensidade de tensões (ΔK) (CALLISTER JR., W., 2002).

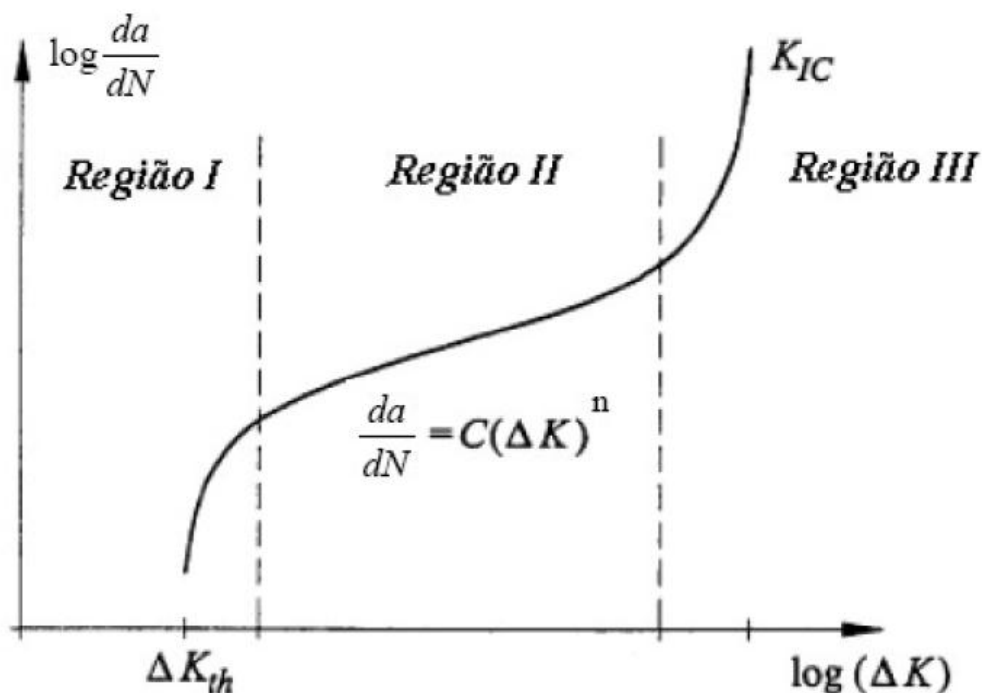


Figura 11: Representação esquemática do comportamento da taxa de propagação de trinca de fadiga em função do logaritmo da faixa do fator de intensidade de tensão.

Através do conhecimento da curva $\alpha \times \Delta K$ do material, pode-se obter a vida de propagação de um dado componente mecânico. Tal procedimento pode ser feito utilizando a equação de Paris-Erdogan (vide Eq. (4)), ou mais precisamente por via experimental, onde o registro do tamanho da trinca contra a vida, durante o ensaio e o simultâneo cálculo de ΔK para cada N , permite o cálculo da curva $\alpha \times \Delta K$. Desta forma, a partir do monitoramento de trincas provenientes de defeitos iniciais, e/ou microtrincas nucleadas durante o carregamento cíclico anterior, e sendo conhecida a curva $\alpha \times \Delta K$ do material nas condições de uso (em função do meio ambiente, espessura, microestrutura, orientação dos defeitos, etc.), é possível determinar a vida de um determinado componente.

$$\alpha = \frac{da}{dN} = C.(\Delta K)^n \quad (4)$$

onde:

(da/dN) é a taxa de propagação da trinca de fadiga;

C e n são constantes que dependem da tensão média e das condições ambientais (matematicamente, são os coeficientes linear e angular da reta, respectivamente).

As trincas podem tomar diversas formas e ter várias causas de origem e, por isso, são defeitos preocupantes em dutos. Nenhuma norma de fabricação de tubos, nenhum código de projeto, construção ou soldagem de linhas de dutos permite trincas na especificação de material. Defeitos como o desalinhamento das bordas das chapas ao longo da solda longitudinal para a altura do cordão depositado são exemplos de defeitos aceitos pela norma API 5L (quando dentro dos limites especificados) mesmo sabendo que os mesmos sejam sítios preferenciais para nucleação de trincas. Porém, nenhum defeito tipo trincas é aceito pela norma API (JÚNIOR, 2004).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. MATERIAL

O material utilizado neste estudo é uma chapa de aço microligado, também denominado aço de alta resistência e baixa liga (ARBL), grau API 5L X70, obtido por processamento termomecânico de laminação controlada. O aço em questão foi fabricado pela USIMINAS e fornecido ao projeto pela empresa TENARIS-CONFAB S.A.

A composição química do aço utilizado no estudo está representada na Tabela 1.

Tabela 1 – Representação da composição química do aço API 5L X70 em % em massa
Fonte: CORDEIRO et al., 2009 apud. BARBOSA, 2011.

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

A quantidade dos ensaios requeridos pela norma API 5L e demais normas de ensaio, o tamanho das amostras e os equipamentos utilizados estão descritos abaixo:

Microscopia Óptica (MO): uma amostra, API 5L / ASTM E3 / ASTM E112 / ASTM E45 51, 19,05 x 15 x 10 mm, policorte e politriz.

Microscopia de Varredura (MEV): o estudo microestrutural do metal base foi realizado a partir de um MEV pertencente ao laboratório de análise de imagens LAIMat do DMT/FEG/UNESP. O MEV utilizado é da marca ZEISS, modelo EVO/LS15 equipado com detector de elétrons secundários E/T (Everhart/Thornley) e detector de elétrons retroespalhados de semicondutores de quatro pólos.

CORDEIRO, W. R., et al., 2009. Desenvolvimento de Tubos de Alta Resistência Grau API 5L X70 PSL2 Offshore pelo Processo de Soldagem HFIW (High Frequency Induction Welding). In: 64º Congresso Anual da ABM – Belo Horizonte, MG, 2009, pp. 1-12.

Microdureza: uma amostra, ISO 6508-1, 19,05 x 15 x 10 mm, Microdurômetro Vickers.

Tração: quatro amostras cilíndricas longitudinais e quatro transversais, ASTM E8M, servo-hidráulica modelo Instron 8801 de 100 kN de capacidade.

Fadiga: foram realizados ensaios de fadiga axial em corpos-de-prova cilíndricos, sendo 12 confeccionados nos sentidos transversal e dez no sentido longitudinal de laminação da placa de aço API 5L X70. Os ensaios foram realizados na máquina servo-hidráulica de ensaios dinâmicos Instron 8801, de 100 kN de capacidade.

Rugosidade: a rugosidade (Ra) das superfícies dos corpos-de-prova foi determinada por meio do equipamento Mitutoyo 301, pertencente ao Departamento de Materiais e Tecnologia da FEG/UNESP, utilizando *cut-off* de 0,8mm (5x).

3.2. MÉTODOS

3.2.1 Microscopia Óptica (MO)

A análise por microscopia óptica com ataque químico foi realizada com o objetivo de observar a microestrutura do metal de base.

A amostra foi embutida a frio, lixada com papel de granulometria decrescente (de 100 até 1000) e polida por meio de alumina (1 μ m, 2 μ m e 3 μ m) e uma solução de sílica coloidal em suspensão, tipo OPU, em pano tipo DP PLUS. O reagente químico utilizado para revelação da microestrutura do material foi Nital a 2%, aplicado de três a cinco segundos. A amostra foi preparada conforme a norma ASTM E 3-01.

As imagens foram capturadas por meio de um microscópio óptico de marca NIKON, modelo EPIPHOT 200 e uma câmera do tipo SPOT *Insight* QE, utilizando os programas SPOT e Image – J.

3.2.2 Microscopia de Varredura (MEV)

As amostras utilizadas na análise por microscopia óptica foram observadas através do microscópio de varredura (MEV) do Departamento de Materiais e Tecnologia da FEG/UNESP, e através do mesmo, foram obtidas as imagens para análise da origem e propagação da trinca de fadiga, assim como a região de propagação.

3.2.3 Microdureza Vickers (HV)

As medições de microdureza foram realizadas por meio do equipamento MICROMET 2004 da BÜEHLER, com carga de 500g.

3.2.4 Ensaio de Tração

Para realização do ensaio de tração, foram utilizados quatro corpos-de-prova cilíndricos extraídos na direção longitudinal e quatro na direção transversal da chapa de aço, seguindo a norma ASTM E8M, com o objetivo de avaliar o grau de anisotropia do material.

Os ensaios foram realizados em conformidade com a norma ASTM E 8M, na temperatura ambiente e por meio de uma máquina servo-hidráulica modelo Instron 8801 de 100 kN de capacidade.

A Figura 12 apresenta as dimensões dos corpos-de-prova ensaiados:

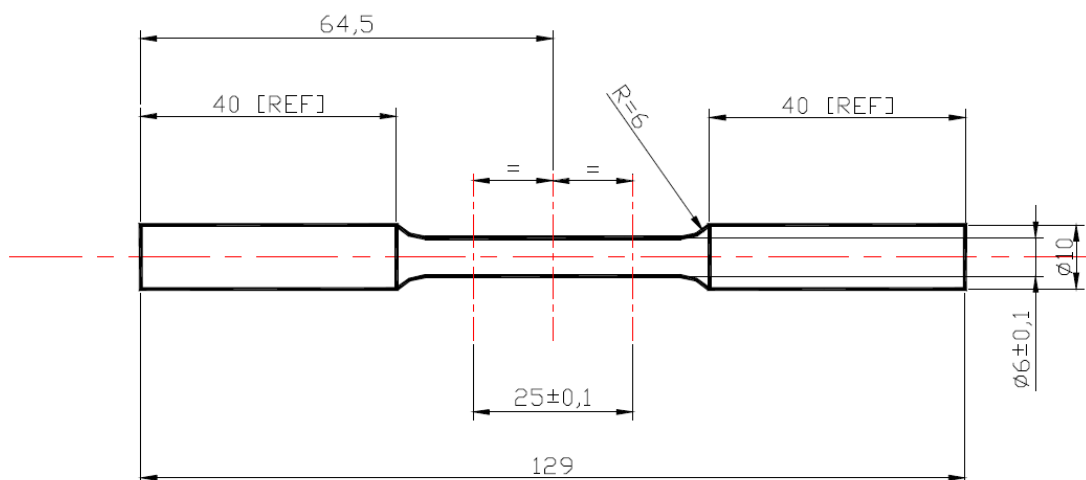


Figura 12: Corpo-de-prova de tração cilíndrico, na direção longitudinal e transversal de laminação da chapa de aço API 5L X70 [mm].

3.2.5 Ensaio de Fadiga

Os corpos de prova cilíndricos de fadiga axial foram confeccionados conforme a Figura 13, em atendimento à norma ASTM E466. Os ensaios foram realizados com razão de carga $R=0,1$, frequência de 20Hz, amplitude constante e na temperatura ambiente. Com os dados obtidos, foram confeccionadas as curvas S-N (Wöhler).

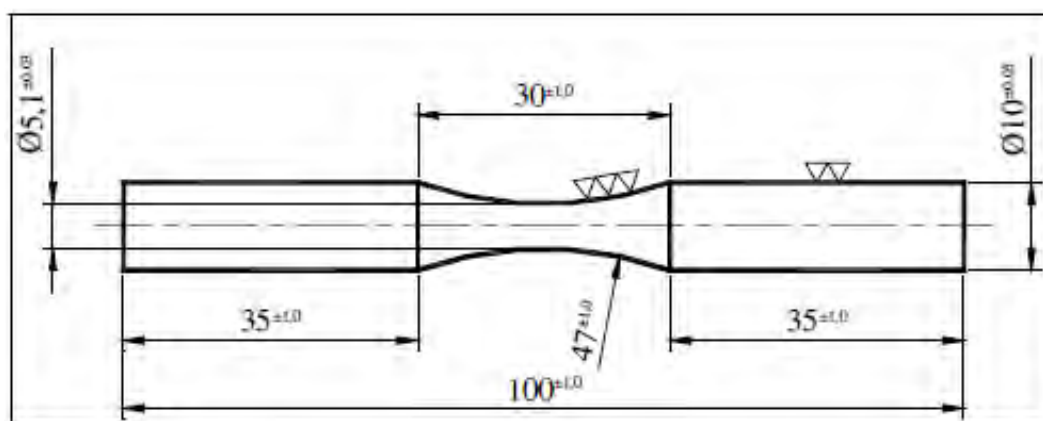


Figura 13: Dimensões dos corpos-de-prova cilíndricos de fadiga, na direção longitudinal e transversal de laminação da chapa de aço API 5L X70 [mm].

3.2.6 Rugosidade

Todas as amostras foram submetidas a acabamento superficial com lixa de granulometria 600 (máx.). Foram obtidos três valores de rugosidade para cada um dos

22 corpos-de-prova longitudinal e transversal utilizados no ensaio de fadiga axial. Foi calculada uma rugosidade média R_a para o conjunto de amostras longitudinal e outra para o de amostras transversal.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. MICROSCOPIA ÓPTICA (MO)

A análise micrográfica executada no metal base pode comprovar a caracterização do aço API 5L X70, como tendo sido laminado por processo de laminação controlada termomecânica. O estudo revela microestrutura bandeada (sentido longitudinal) e refinada, composta por ferrita (área clara) e colônias de perlita (área escura, identificada por círculos em vermelho nas Figuras 14 e 15). A Figura 14 é referente à amostra no sentido longitudinal de laminação, enquanto que a Figura 15 corresponde à amostra no sentido transversal.

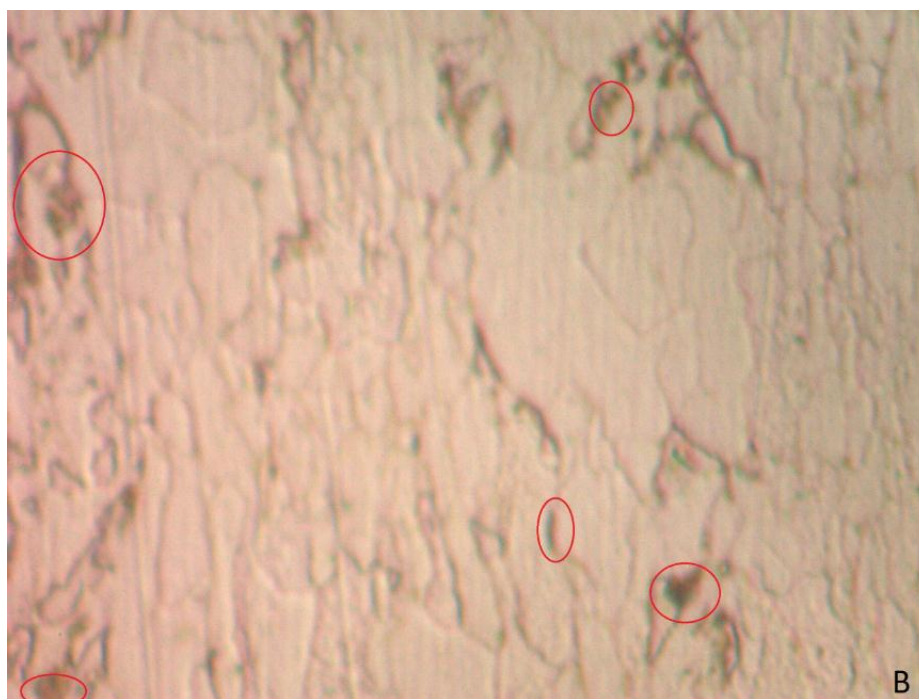


Figura 14: Análise metalográfica conduzida no aço API 5L X70 em estudo revela microestrutura refinada composta por ferrita (área clara) e colônias de perlita (área escura) no sentido longitudinal

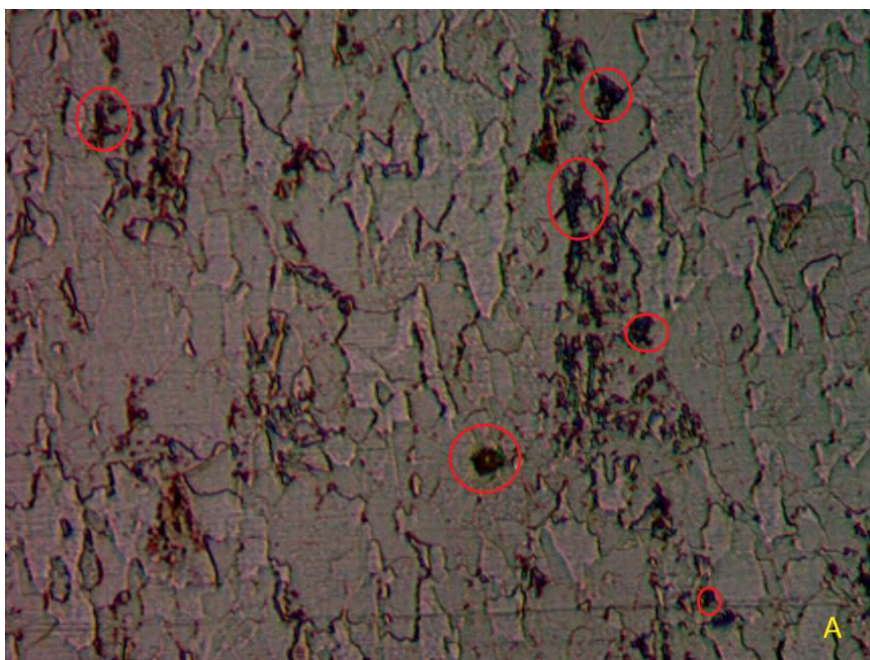


Figura 15: Análise metalográfica conduzida no aço API 5L X70 em estudo revela microestrutura refinada composta por ferrita (área clara) e colônias de perlita (área escura) no sentido transversal.

Constata-se, na Figura 14, que os grãos foram deformados no sentido de laminação da chapa. Por outro lado, constata-se na Figura 15 que os grãos apresentam uma morfologia equiaxial, considerando que não há deformação no sentido transversal da chapa no processo de laminação.

A estrutura refinada dos grãos ferríticos é resultado do processo de laminação controlada, que traz como consequência a obtenção de melhores propriedades de resistência e tenacidade, simultaneamente, devido ao mecanismo de endurecimento pela redução do tamanho de grão.

4.2. MICROSCOPIA DE VARREDURA (MEV)

A análise através da microscopia de varredura realizada na amostra fraturada mostra que a trinca foi originada na superfície do material. A zona de propagação da trinca, originada na superfície, pode ser observada nas Figuras 16 e 17.

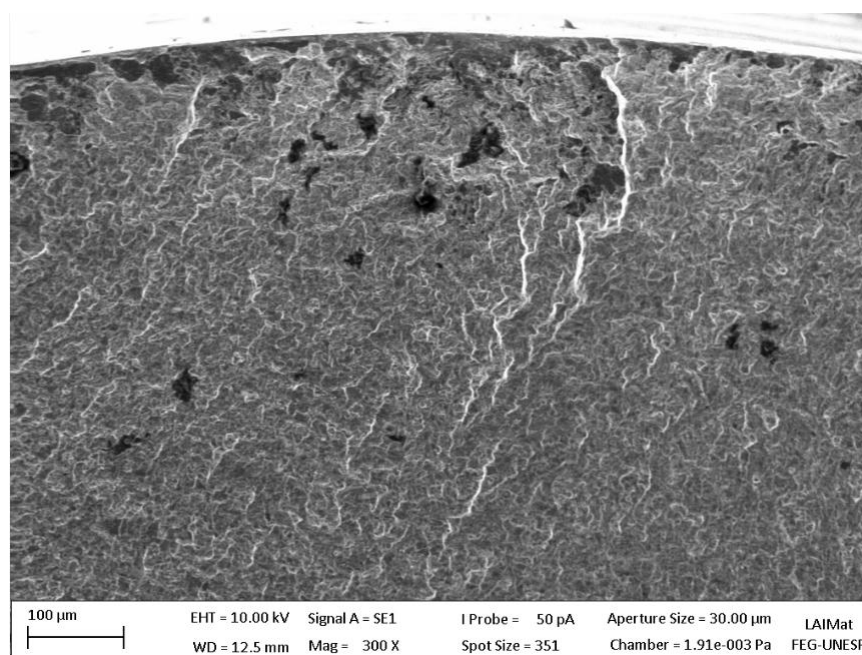


Figura 16: Zona de propagação da trinca originada na superfície da amostra, identificada através da microscopia de varredura com aumento de 300x.

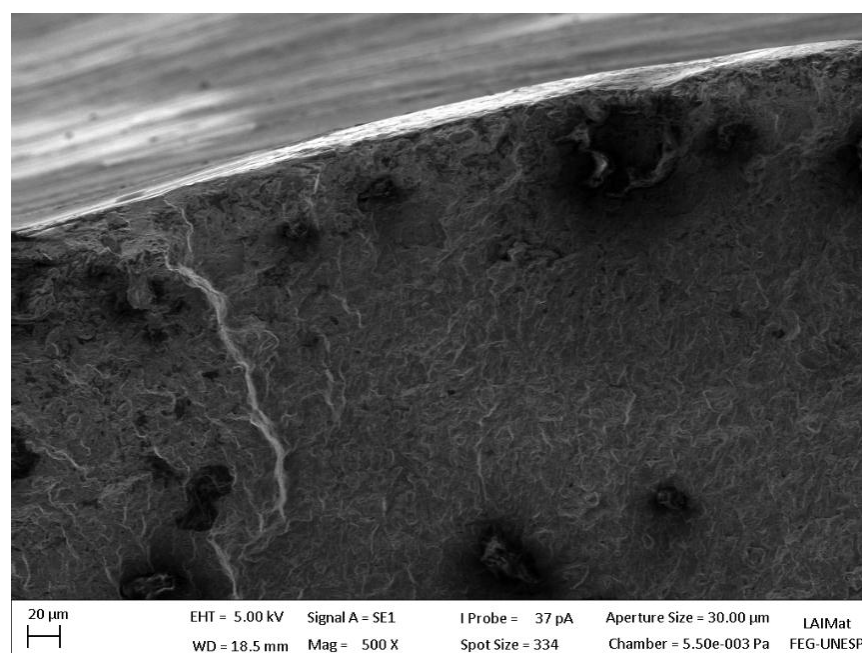


Figura 17: Zona de propagação da trinca originada na superfície da amostra, identificada através da microscopia de varredura com aumento de 500x.

Podemos observar através das Figuras 18 e 19, obtidas com o auxílio da microscopia de varredura, que a região de fadiga (área lisa na secção transversal da amostra) é pequena, o que nos leva a concluir que houve uma propagação rápida da trinca de fadiga (região de baixo ciclo/alta tensão aplicada da curva S-N).

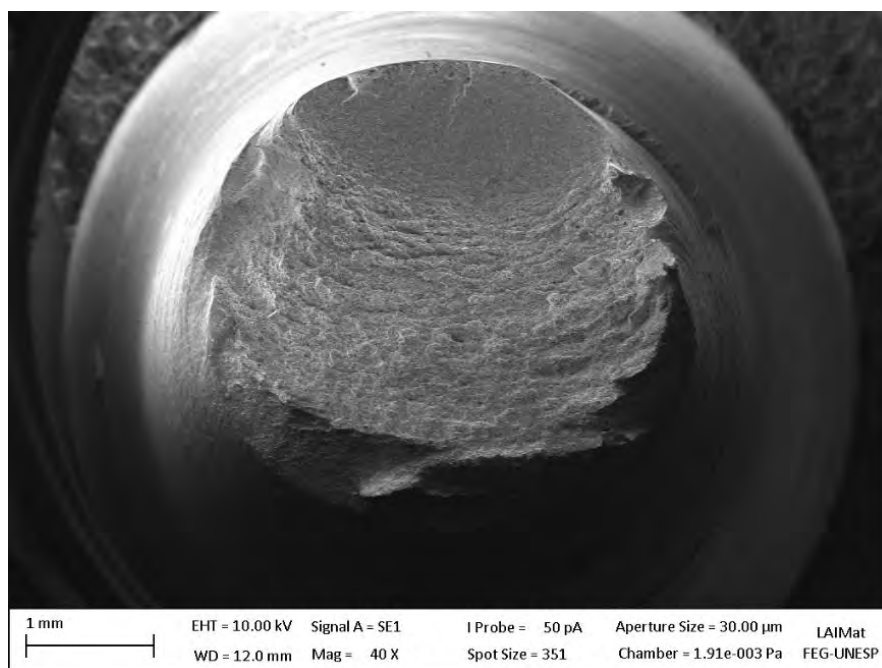


Figura 18: Região de propagação da trinca de fadiga com ampliação de 40x.

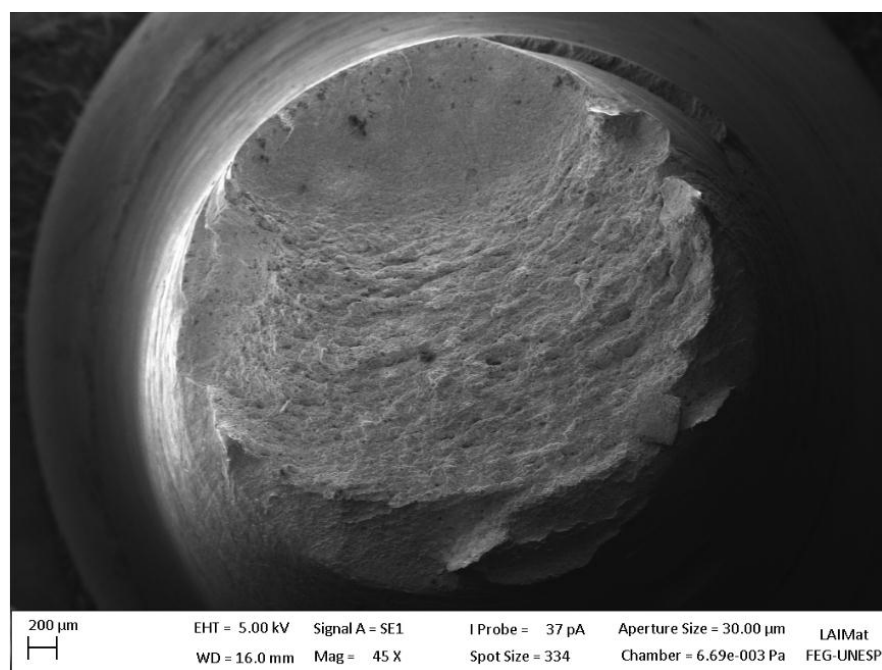


Figura 19: Região de propagação da trinca de fadiga com ampliação de 45x.

4.3. MICRODUREZA VICKERS (HV)

O ensaio de microdureza foi realizado em quatro regiões das amostras que caracterizam a chapa de aço API 5L X70 utilizado no estudo. A Tabela 2 apresenta os valores de microdureza Vickers obtidos:

Tabela 2 – Dados de dureza do aço API 5L X70, retirado no sentido transversal de laminação da chapa.

Fonte: Dados do ensaio

DUREZA VICKERS (HV)						
Região	1	2	3	4	Média	DP
HV	212,6	211,8	209,4	212,6	211,6	±1,51

4.4. ENSAIO DE TRAÇÃO

Os gráficos de tensão nominal *versus* deformação nominal, obtidos através dos ensaios de tração para os corpos-de-prova retirados respectivamente nas direções longitudinal e transversal da chapa de aço API 5L X70, estão apresentados nas Figuras 20 a 27.

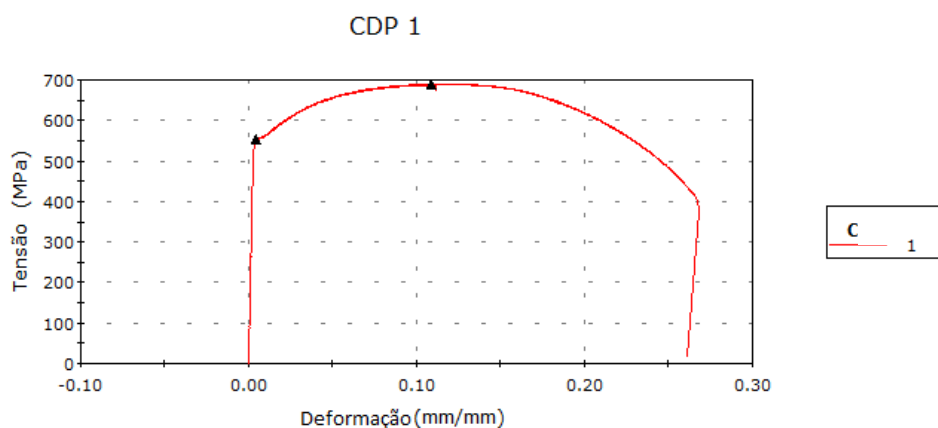


Figura 20: Curva de tração obtida com o primeiro corpo-de-prova de aço API 5L X70 retirado na direção longitudinal da chapa.

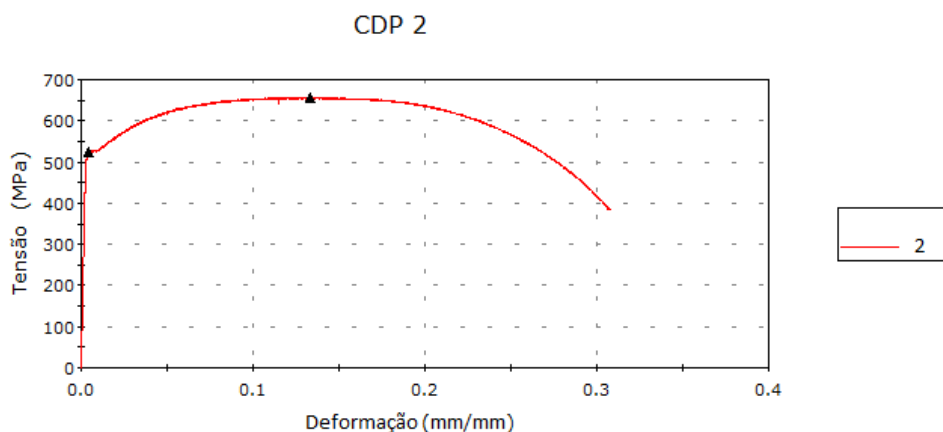


Figura 21: Curva de tração obtida com o segundo corpo-de-prova de aço API 5L X70 retirado na direção longitudinal da chapa.

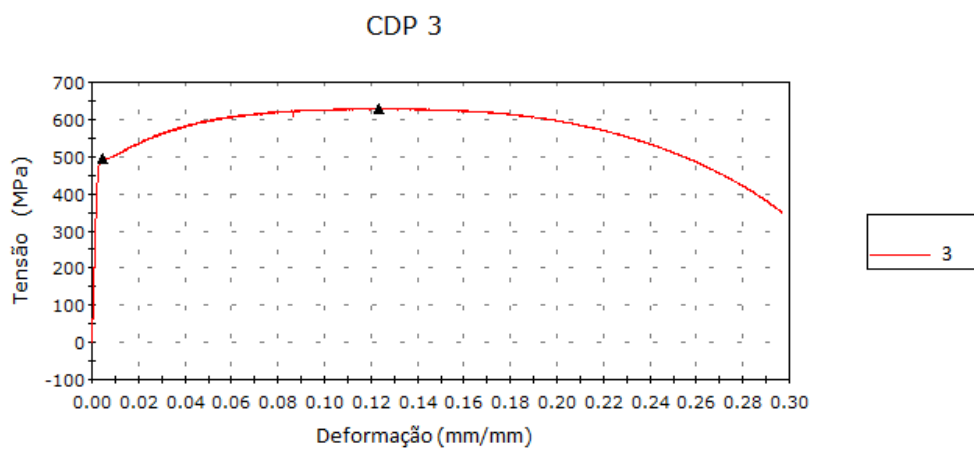


Figura 22: Curva de tração obtida com o terceiro corpo-de-prova de aço API 5L X70 retirado na direção longitudinal da chapa.

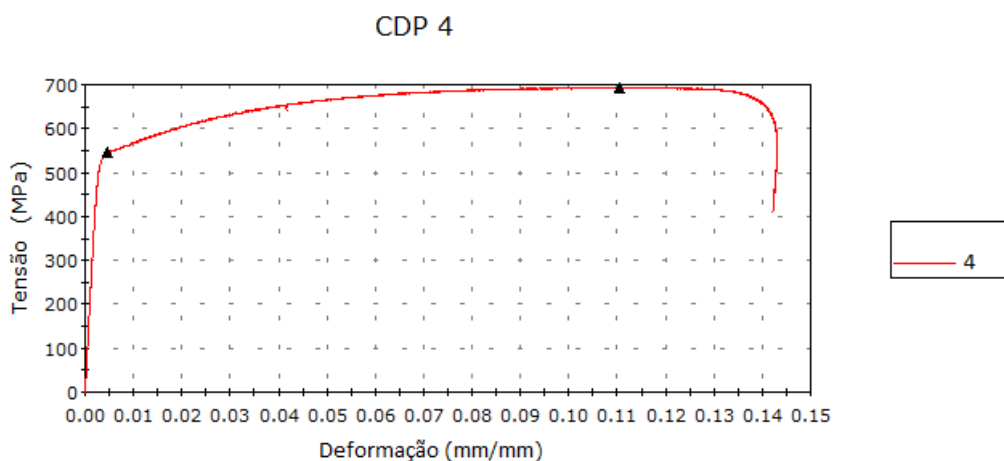


Figura 23: Curva de tração obtida com o quarto corpo-de-prova de aço API 5L X70 retirado na direção longitudinal da chapa.

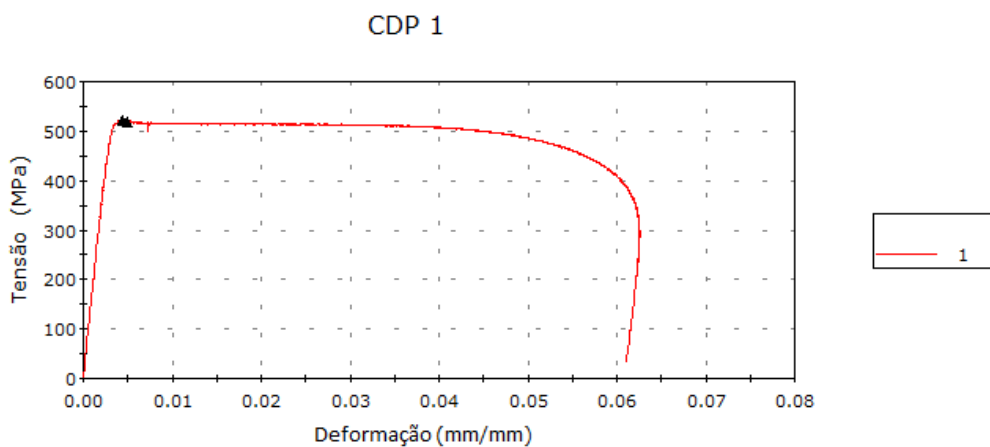


Figura 24: Curva de tração obtida com o primeiro corpo-de-prova de aço API 5L X70 retirado na direção transversal da chapa.

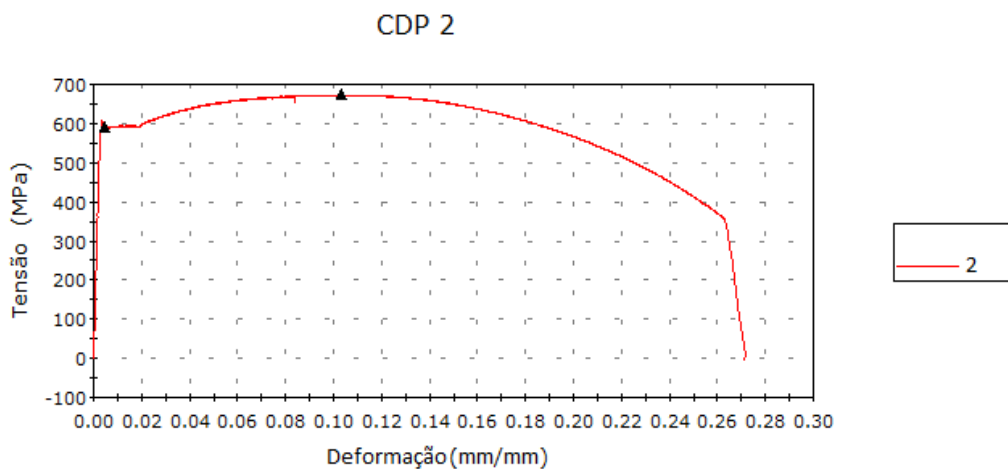


Figura 25: Curva de tração obtida com o segundo corpo-de-prova de aço API 5L X70 retirado na direção transversal da chapa.

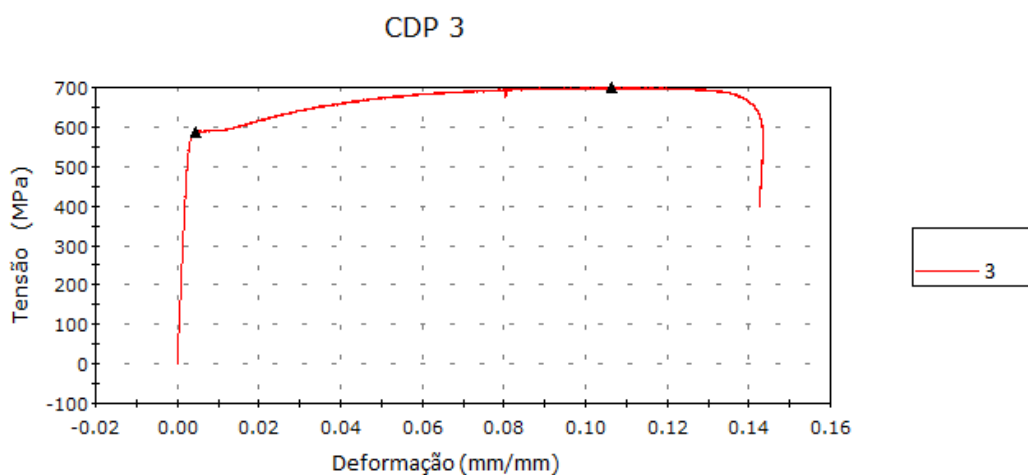


Figura 26: Curva de tração obtida com o terceiro corpo-de-prova de aço API 5L X70 retirado na direção transversal da chapa.

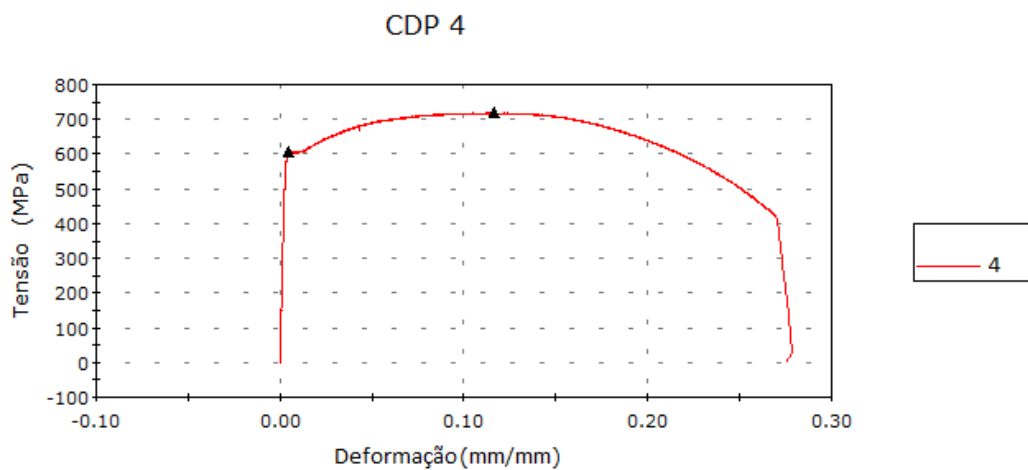


Figura 27: Curva de tração obtida com o quarto corpo-de-prova de aço API 5L X70 retirado na direção transversal da chapa.

As propriedades mecânicas obtidas através dos dados do ensaio de tração, para os corpos de prova na direção longitudinal e transversal são apresentadas nas Tabelas 2 e 3, respectivamente, onde σ_{LE} é o limite de escoamento, σ_{LR} é o limite de resistência, ϵ_{LR} é a deformação na tensão máxima e AL é o alongamento total.

Tabela 3 – Propriedades mecânicas do aço API 5L X70, retirado no sentido longitudinal de laminação da chapa.

Fonte: Dados do ensaio

CDP	σ_{LE} (MPa)	σ_{LR} (MPa)	ϵ_{LR} (mm/mm)	AL
1	553,84	689,9	0,125	27%
2	523,82	655,69	0,130	31%
3	493,41	628,61	0,122	30%
4	545,68	693,47	0,112	14%
Média	529,19	666,92	0,122	25,5%
Desvio Padrão	27,01	30,70	0,008	±7,7%

Tabela 4 – Propriedades mecânicas do aço API 5L X70, retirado no sentido transversal de laminação da chapa.

Fonte: Dados do ensaio

CDP	σ_{LE} (MPa)	σ_{LR} (MPa)	ϵ_{LR} (mm/mm)	AL
1	518,58	520,42	0,005	6,2%
2	589,64	672,89	0,102	26,2%
3	588,22	699,25	0,108	14,3%
4	604,79	718,11	0,120	27,5%
Média	575,31	652,67	0,084	18,6%
Desvio Padrão	38,55	90,09	0,053	±10,2%

A norma API 5L estabelece o valor mínimo de 485 MPa para o limite de escoamento do aço API 5L X70. De acordo com os valores demonstrados nas Tabelas 2 e 3, os corpos-de-prova longitudinal e transversal utilizados neste estudo atendem à norma API 5L com valores médios de limite de escoamento de 529,19 MPa e 575,31 MPa, respectivamente.

Os corpos-de-prova confeccionados na direção transversal ao sentido de laminação (TL) apresentaram valores de limite de escoamento um pouco maiores que aqueles confeccionados na direção longitudinal ao sentido de laminação (LT), o que caracteriza baixa anisotropia entre as propriedades do aço estudado ($\approx 9\%$).

4.5. ENSAIOS DE FADIGA

As curvas S-N, de tensão nominal *versus* número de ciclos, e tensão nominal *versus* Log do número de ciclos, obtidas através do ensaio de fadiga axial em corpos-de-prova cilíndricos retirados na direção longitudinal (LT) e transversal (TL) do sentido de laminação da chapa de aço API 5L X70, estão representadas nas Figuras 28 e 29, respectivamente. Os ensaios foram realizados com razão de carga $R=0,1$, frequência de 20 Hz, amplitude constante e na temperatura ambiente, em conformidade com a norma ASTM E466.

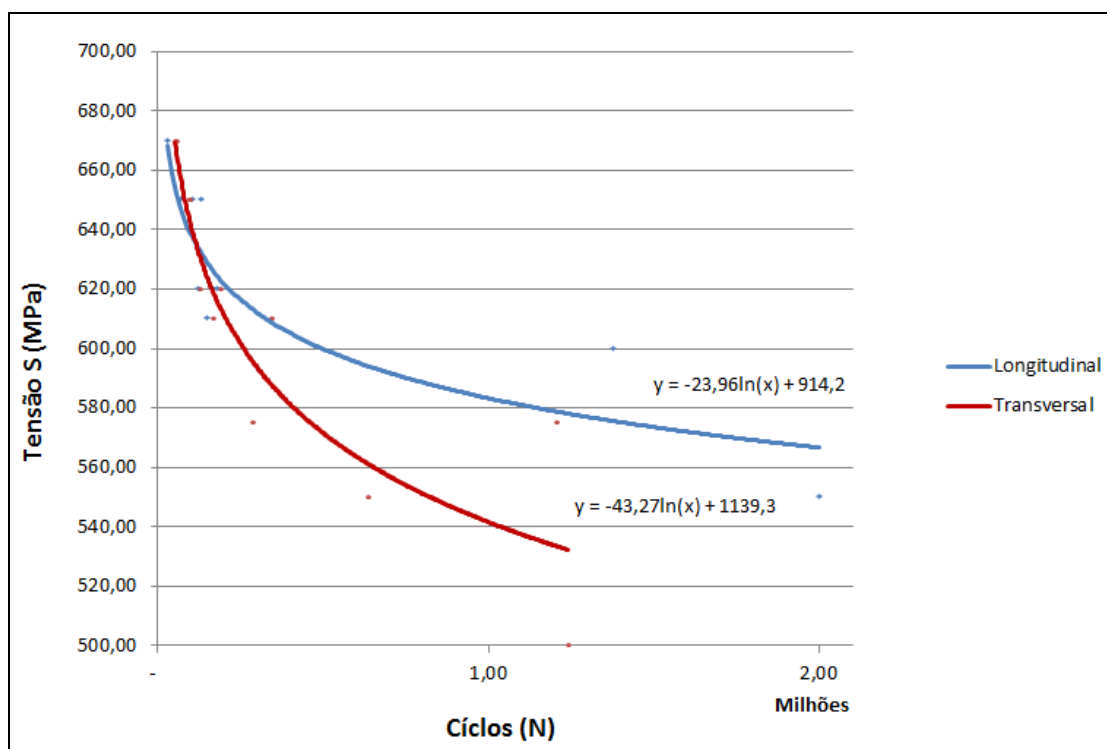


Figura 28: Curva S-N, de tensão por número de ciclos, obtida através dos corpos-de-prova cilíndricos longitudinal e transversal.

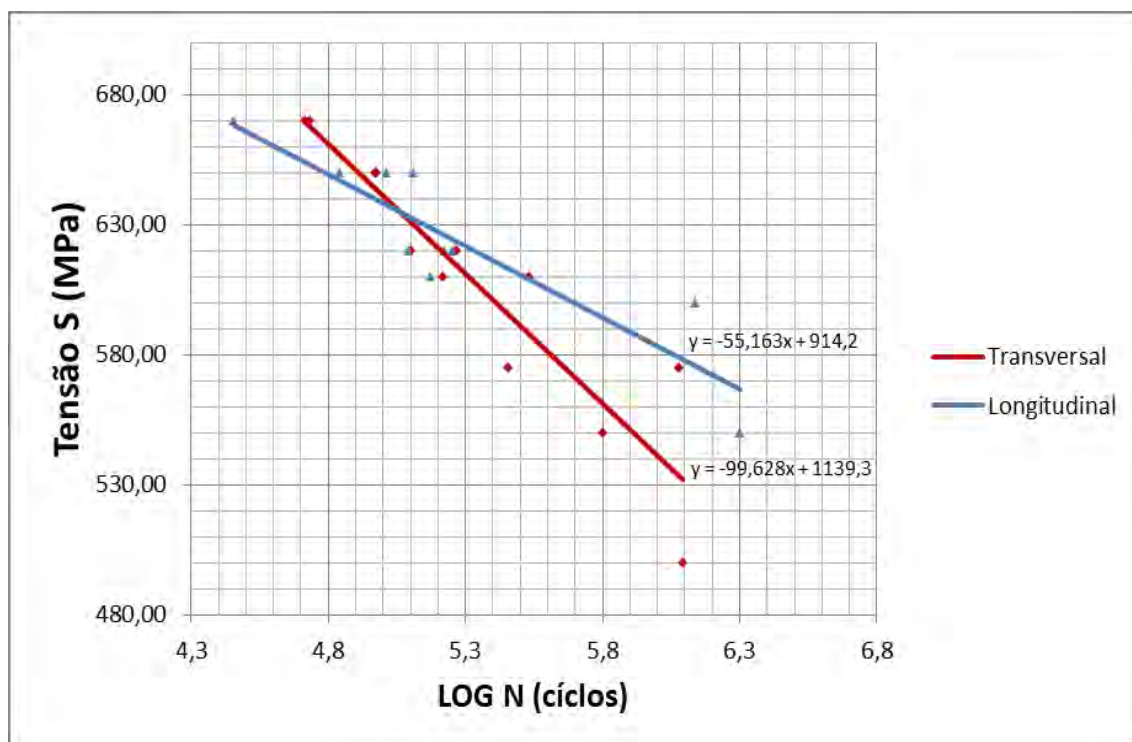


Figura 29: Curva S-N, de tensão por Log do número de ciclos, obtida através dos corpos-de-prova cilíndricos longitudinal e transversal.

Através da comparação entre as curvas representadas nas Figuras 28 e 29, foi constatado que os corpos-de-prova cilíndricos longitudinais apresentaram maior resistência à fadiga quando comparados com os transversais.

4.6. RUGOSIDADE

Outro fator importante é a influencia do acabamento superficial na vida em fadiga, pois a grande parte dos defeitos de fadiga se inicia na superfície do material. Um bom acabamento superficial aumenta o tempo para nucleação de uma trinca na superfície, aumentando, conseqüentemente, a vida em fadiga. As rugosidades médias calculadas para as amostras longitudinais e transversais foram $Ra = 6,01 \pm 1,46$ (LT), e $Ra = 6,67 \pm 1,03$ (TL), respectivamente. Através dos valores de rugosidade média obtidos, constatamos que não há grande diferença no acabamento superficial entre as amostras transversais e longitudinais.

5. CONCLUSÃO

A exploração de petróleo em águas profundas envolve muitos desafios. Desde a pesquisa geológica e análise sísmica da perfuração do poço, até o início da produção, emprega-se sempre a mais avançada tecnologia. Em um sistema de exploração como o do pré-sal, de águas muito profundas ou ultra profundas, não é possível estabelecer uma estrutura fixada ao fundo do mar. Portanto, são utilizadas plataformas flutuantes, ancoradas com diversas linhas de ancoragem, e com dutos chamados *risers*, indo do poço de petróleo para plataforma carregando óleo e gás. Em alto mar, navios e plataformas conectados a poços de petróleo são castigados incessantemente por ondas, ventos e correnteza. Na exploração do pré-sal, a 300 km da costa brasileira, o ambiente é ainda mais extremo. Os componentes estruturais solicitados por tensões cíclicas no ambiente de extração e transporte do petróleo e seus derivados exigem tal dimensionamento que leve em consideração o limite de resistência à fadiga dos materiais solicitados no projeto.

Sabendo-se que o API 5L X70 é um tipo de aço muito utilizado em dutos para transporte de petróleo e gás e, portanto, submetido a condições de esforços cíclicos em seu ambiente de aplicação, este estudo vem a contribuir através da análise do comportamento em fadiga deste aço, assim como a caracterização mecânica e metalográfica para uma chapa do mesmo.

Através dos procedimentos realizados em laboratório, foram obtidas as curvas S-N (tensão *versus* número de ciclos) para as amostras transversais e longitudinais submetidas ao ensaio de fadiga axial, em conformidade com a norma ASTM E466. Por meio da comparação entre as curvas S-N obtidas através nos ensaios de fadiga, foi constatado que os corpos-de-prova cilíndricos longitudinais apresentaram maior resistência à fadiga que quando comparados com os transversais. Por meio das medições de rugosidade dos corpos-de-prova utilizados nos ensaios de fadiga, foi calculada também a rugosidade média (R_a) para cada conjunto de amostra, observando-se que não houve diferença significativa entre os resultados das amostras transversais e longitudinais. Portanto, pode-se observar que o acabamento superficial

não teve influência significativa para uma maior resistência à fadiga das amostras longitudinais.

Os ensaios de tração e microdureza Vickers foram realizados para caracterização das propriedades mecânicas das amostras, e foi constatado que os valores obtidos atendem às especificações da norma API 5L. Através do ensaio de tração, constatou-se que os corpos-de-prova confeccionados na direção transversal ao sentido de laminação (TL) apresentaram valores de limite de escoamento um pouco maiores que aqueles confeccionados na direção longitudinal ao sentido de laminação (LT), caracterizando baixa anisotropia entre as propriedades do aço estudado.

As imagens da amostra do aço API 5L X70, obtidas com o auxílio da microscopia óptica, revelaram microestrutura bandeada e refinada, composta por ferrita e colônias de perlita, o que caracteriza o aço como tendo sido laminado por processo de laminação controlada termomecanicamente. A origem da trinca de fadiga foi investigada com o auxílio do microscópio eletrônico de varredura (MEV) e, através das imagens obtidas, foi constatado que a mesma originou-se na superfície do material. Observou-se também, que a trinca de fadiga propagou-se rapidamente pela rede cristalina do material, já que a área de propagação da trinca de fadiga observada através das imagens foi pequena.

REFERÊNCIAS

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. *Specification for line pipe steel API 5L*, 44th. Ed, Washington D. C., 2008

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials [Metric]*. **ASTM: E8M**. New York, 2004.

BARBOSA, V. S., **Investigação Experimental da Tenacidade em Tubos de Aço API 5L X70 soldados pelo processo HF/ERW**. 2011. 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.

CALLISTER JR., W., **Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução**. 5 ed. Rio de Janeiro, LTC, 2002.

ESCOLA PROFISSIONAL DE CAPELAS - "**Ensaio de Fadiga**", disponível em: http://www.epcapelas.com/dados/index.php?dir=Material_Pedagogico%2FEnsaio+Materiais%2F - acesso em: 06/11/12

GODOY, J. M. **Estudo da Ocorrência de Trinca por Fadiga em Tubos de Aço Soldados, devido ao Transporte**. 2008. Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica. Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista, Campus Guaratinguetá. São Paulo.

JÚNIOR, E. H. **Investigação experimental do comportamento dúctil de aços API-X70 e aplicação de curvas de resistência J-a para previsão de colapso em dutos**. 2004. Tese apresentada para obtenção do Título de Doutor em Engenharia. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo.

NÚÑES, M. M. G. **Avaliação do comportamento em corrosão dos aços API 5LX70 e API 5LX80 em meio contendo CO2 por técnicas de análises superficiais e eletroquímicas**. 2006. Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais e Metalurgia da PUC-Rio.

PARIS, P., ERDOGAN, F.. **A Critical Analysis of Crack Propagation Laws**, Journal of Basic Engineering, Transactions of the ASME, V. 85, pp. 528-534, 1963.

PETROBRAS MAGAZINE. Rio de Janeiro: e.60, 2012

PETROBRAS MAGAZINE. Rio de Janeiro: e.61, 2012

PETROBRAS MAGAZINE. Rio de Janeiro: e.62, 2012

RAMULU, M.; KOBAYASHI, A. S. **Fatigue**. 2001. *Academic Press from University of Washington*, Seattle, WA, USA.

SANT'ANNA, A. M. S. **Efeito da Hidrogenação em Solução NS4 Nas Propriedades do Aço API 5L X-65**. 2010. Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais do Instituto Politécnico, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

SILVA, M. C. **Caracterização das propriedades mecânicas e metalúrgicas do aço API 5L-X80 e determinação experimental de curvas J-R para avaliação da tenacidade a fratura**. 2004. Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em Engenharia. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo.

SILVA, M. C. **Determinação Experimental da Tenacidade à Fratura da Zona Termicamente Afetada de Junta Soldada de Aço API 5L-X80**. 2009. Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em Engenharia. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo.

SILVA, E. S. **Propagação de Trincas de Fadiga em Juntas Soldadas Circunferenciais de Aços Para Risers Rígido da Classe API 5L Grau X80**. 2010. Projeto de Graduação apresentado ao curso de Engenharia Metalúrgica da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

SOUSA, E. E. **Análise do Comportamento em Fadiga do Fluoreto de Polivinilideno (PVDF)**. 2011. Resumo do Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFRJ, como parte da obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Materiais.

SOUZA, E. D., **Análise do Efeito da Tensão Média sobre a Resistência à Fadiga do Aço ASTM A743 CA6NM**. 2011. Relatório submetido como requisito para obtenção do grau de Engenheiro Mecânico da Universidade de Brasília.