



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

DEBORAH VENTURA YASUDA

**AVALIAÇÃO DA TENCIADADE EM UM AÇO MICROLIGADO,
GRAU API, PARA APLICAÇÃO EM LINHAS DUTOVIÁRIAS DE
PETRÓLEO E GÁS.**

Guaratinguetá
2012

DEBORAH VENTURA YASUDA

AVALIAÇÃO DA TENACIDADE EM UM AÇO MICROLIGADO, GRAU
API, PARA APLICAÇÃO EM LINHAS DUTOVIÁRIAS DE PETRÓLEO E
GÁS.

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

| | |
|------|--|
| Y29a | <p data-bbox="347 1480 687 1514">Yasuda, Deborah Ventura</p> <p data-bbox="347 1518 1238 1592">Avaliação da tenacidade em um aço microligado, grau API, para aplicação em linhas dutoviárias de petróleo e gás / Deborah Ventura</p> <p data-bbox="347 1592 831 1626">Yasuda – Guaratinguetá : [s.n], 2012.</p> <p data-bbox="405 1630 512 1664">58 f : il.</p> <p data-bbox="395 1668 675 1702">Bibliografia: f. 53-54</p> <p data-bbox="347 1740 1321 1812">Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2012.</p> <p data-bbox="395 1816 1110 1850">Orientador: Prof. Dr. Marcelino Pereira do Nascimento</p> <p data-bbox="405 1921 619 1955">1. Aço I. Título</p> <p data-bbox="1153 1995 1321 2029">CDU 669.14</p> |
|------|--|

**AVALIAÇÃO DA TENCIADADE EM UM AÇO MICROLIGADO,
GRAU API, PARA APLICAÇÃO EM LINHAS DUTOVIÁRIAS DE
PETRÓLEO E GÁS.
DEBORAH VENTURA YASUDA**

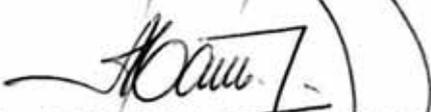
ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO
COMO PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
“GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA”

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. ANTONIO WAGNER FORTI
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


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


Prof. Dr. ANGELO CAPORALLI FILHO
UNESP-FEG


Eng. VITOR SCARAELE BARBOSA
UNESP-FEG

DADOS CURRICULARES

DEBORAH VENTURA YASUDA

| | |
|------------|--|
| NASCIMENTO | – 11.08.1989 SÃO PAULO / SP |
| FILIAÇÃO | Hélio Yasuda Marcia Ribeiro Ventura Yasuda |
| 2007/2012 | Curso de Graduação Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho – Campus de Guaratinguetá |

AGRADECIMENTOS

- Ao prof. Dr. Marcelinho Pereira do Nascimento pela a orientação.
- Aos meus pais e minha irmã pelo apoio e suporte de sempre.
- Aos meus amigos que sempre me ajudam e a República Puricanas que esteve comigo em todos os momentos.
- A empresa TenarisComfab pelo material.
- Aos técnicos dos laboratórios do departamento de materiais e tecnologia pela ajuda nos ensaios realizados.
- Aos professores que se disponibilizaram o tempo para avaliar meu trabalho.

“O verdadeiro conhecimento vem de dentro”

Sócrates

YASUDA, D. V. Avaliação da Tenacidade em um Aço Microligado, grau API, para Aplicação em Linhas Dutoviárias de Petróleo e Gás. 2012. 55 f. Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012.

RESUMO

Visando estudar as propriedades mecânicas do aço microligado API 5L X70, um material utilizado para a fabricação de tubulações para linhas dutoviárias de petróleo e gás natural, foi feito um estudo da tenacidade, resistência à tração, resistência ao impacto, dureza e microestrutura do aço. Para a realização deles foram feitos diversos ensaios onde se podem adquirir as características do material. Foram realizados na Universidade Estadual Paulista Campus Guaratinguetá no Departamento de Materiais e Tecnologia os ensaios de tração, ensaio de impacto por charpy, ensaio de dureza e a metalografia do material API 5L X70, todos os ensaios foram feitos com o auxílio dos técnicos dos laboratórios. Com esses dados pode-se ser feita uma análise do material sobre sua tenacidade, sua ductilidade ou fragilidade, sua dureza, seu limite de escoamento e a sua tensão máxima. Após os ensaios foram analisados e discutido os resultados que mostraram que o aço microligado API 5L X70 é um aço muito tenaz, ele absorve energia de impacto de 300 Joules sem que ocorra uma ruptura por completo do corpo de prova, mostrando sua tenacidade.

PALAVRAS-CHAVE:Aço microligado, API 5L X70, Ensaio de Impacto, Ensaio Charpy.

YASUDA, D. V. Evaluation of Toughness in a Microalloyed Steel, API grade, Pipeline Transportation Lines for use in Oil and Gas. 2012. 55 f. Work Undergraduate Mechanical Engineering - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012.

ABSTRACT

In order to study the mechanical properties of micro alloyed steel API 5L X70, a material used to manufacture pipes for pipeline transportation lines for use in oil and gas, a study was made of toughness, tensile strength, impact strength, hardness and microstructure steel. To perform these various tests were made where they can acquire the characteristics of the material. Were performed at the Faculty of Engineering in Guaratinguetá in the Department of Materials and Technology and the tensile tests, Charpy impact test, metallography and hardness testing of material API 5L X70, all tests were done with the help of technical laboratories. With these data can be an analysis of the material about his tenacity, his toughness and fragility, its hardness, its yield strength and its maximum voltage. After being asked the analyzes discussed the results showed that the micro alloyed steel API 5L X70 steel is a very tenacious, it absorbs impact energy of 300 Joules though without a break for the full body of evidence showing its tenacity.

KEYWORDS: Microalloyed steel, API 5L X70, Impact test, Charpy test.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| FIGURA 1.1: ACIDENTE DE EXPLOSÃO DE DUTOS NO MÉXICO. (IG, 2010) | 17 |
| FIGURA 3.1: GRÁFICO TENSÃO – DEFORMAÇÃO (CALLISTER,2002) | 23 |
| FIGURA3.2: GRÁFICO TENSÃO – DEFORMAÇÃO COM DEFORMAÇÃO PLÁSTICA_(SAMUEL,2008)..... | 24 |
| FIGURA3.3: DEMONSTRA UM CASO DE LIMITE DE ESCOAMENTO SUPERIOR E LIMITE DE ESCOAMENTO INFERIOR (CALLISTER,2002) | 25 |
| FIGURA3.4: DEMONSTRAÇÃO DA DEFORMAÇÃO DO CORPO DE PROVA (CALLISTER,2002) | 26 |
| FIGURA3.5: GRÁFICO TENSÃO – DEFORMAÇÃO DIFERENÇA DÚCTIL FRÁGIL (CALLISTER,2002)..... | 27 |
| FIGURA3.6: GRÁFICO TENSÃO – DEFORMAÇÃO EM DIFERENTES TEMPERATURAS (CALLISTER,2002) | 28 |
| FIGURA3.7: GRÁFICO DE TRANSIÇÃO DÚCTIL – FRÁGIL (CALLISTER,2002) | 31 |
| FIGURA3.8: NOTÍCIA DO ACIDENTE DO TITANIC (VITOR DIRAMI,2012) 31 | |
| FIGURA.4.1: CORPO DE PROVA DO ENSAIO DE IMPACTO CHARPY (ASTM E23 –SETEMBRO DE 2007) | 32 |
| FIGURA 4.2: EQUIPAMENTO DO ENSAIO CHARPY (CALLISTER,2002) | 33 |
| FIGURA 5.1: CORPO DE PROVA DO ENSAIO DE TRAÇÃO (HTTP://WWW.CIMM.COM.BR/PORTAL/MATERIAL_DIDATICO/6543-CORPOS-DE-PROVA-PARA-O-ENSAIO-DE-TRACAO#.UKXIKYDX2SO 12/12/2012) | 34 |

| | |
|---|----|
| FIGURA 5.2: EQUIPAMENTO DO ENSAIO DE TRAÇÃO (HTTP://WWW.EBAH.COM.BR/CONTENT/ABAAABNO8AF/ENSAIO-TRACAO-PMR-2202-ACO-1020 12/12/2012)..... | 35 |
| FIGURA 8.1: CORPO DE PROVA APÓS O ENSAIO CHARPY A 0°C. | 40 |
| FIGURA 8.2: CORPO DE PROVA APÓS O ENSAIO CHARPY A -21°C..... | 41 |
| FIGURA 8.3: CORPO DE PROVA APÓS O ENSAIO CHARPY A -78°C..... | 41 |
| FIGURA 8.4: CORPO DE PROVA APÓS O ENSAIO CHARPY A -170°C..... | 42 |
| FIGURA 8.5: CORPO DE PROVA APÓS O ENSAIO CHARPY A UMA TEMPERATURA QUE NÃO PODE SER DEFINIDA. | 42 |
| FIGURA 8.6: GRÁFICO DE ENERGIA DE IMPACTO POR TEMPERATURA DO MATERIAL. | 43 |
| FIGURA 8.7: GRÁFICO DE ENERGIA DE IMPACTO POR TEMPERATURA DO MATERIAL. | 44 |
| FIGURA 8.9: GRÁFICO TENSÃO – DEFORMAÇÃO CORPO DE PROVA TRANSVERSAL..... | 45 |
| FIGURA 8.10: GRÁFICO TENSÃO – DEFORMAÇÃO CORPO DE PROVA TRANSVERSAL..... | 45 |
| FIGURA 8.11: GRÁFICO TENSÃO – DEFORMAÇÃO CORPO DE PROVA LONGITUDINAL. | 45 |
| FIGURA 8.12: GRÁFICO TENSÃO – DEFORMAÇÃO CORPO DE PROVA LONGITUDINAL. | 46 |
| FIGURA 8.13: GRÁFICO TENSÃO – DEFORMAÇÃO CORPO DE PROVA TRANSVERSAL..... | 46 |
| FIGURA 8.14: GRÁFICO TENSÃO – DEFORMAÇÃO CORPO DE PROVA TRANSVERSAL..... | 46 |
| FIGURA 8.15: CORPO DE PROVA LONGITUDINAL APÓS O ENSAIO..... | 47 |

| | |
|---|----|
| FIGURA 8.16: CORPO DE PROVA LONGITUDINAL APÓS O ENSAIO..... | 47 |
| FIGURA 8.17: CORPOS DE PROVA TRANSVERSAL APÓS O ENSAIO E UM CORPO DE PROVA SEM SER ENSAIADO..... | 47 |
| FIGURA 8.18: CORPO DE PROVA LONGITUDINAL. | 48 |
| FIGURA 8.19: METALOGRAFIA DA AMOSTRA EM CORTE LONGITUDINAL. A FIGURA A MOSTRA OS CONTORNOS DE GRÃOS DA FERRITA E NA FIGURA B AS PARTE CIRCULADAS SÃO AS PERLITAS DO MATERIAL. | 49 |
| FIGURA 8.20: METALOGRAFIA DA AMOSTRA EM CORTE TRANSVERSAL. A FIGURA A AS PARTE CIRCULADAS SÃO AS PERLITAS DO MATERIAL E NA FIGURA B MOSTRA OS CONTORNOS DE GRÃOS DA FERRITA. | 50 |
| FIGURA 8.21: GRÁFICO DE TRATAMENTO TÉRMICO DO MATERIAL (TEMPERATURA POR TEMPO)(SPIVAKOV <i>ET AL.</i> , 2010)..... | 50 |
| FIGURA 8.22: ESCALA DE DUREZA (CALLISTER,2002)..... | 51 |
| FIGURA ANEXO.2 TABELA DE ENERGIA QUE O MATERIAL DEVE ABSORVER PARA SER ACEITO NA NORMA API 5L (API 5L -2008)..... | 58 |
| FIGURA ANEXO.3 TABELA DE COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO AÇO. (API 5L -2008) | 58 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 7.1- Composição química do aço X70. | 43 |
| Tabela 8.1 Dados do Ensaio Charpy para corpos de prova transversal..... | 47 |
| Tabela 8.2 Dados do Ensaio Charpy para corpos de prova do tubo transversal | 48 |
| Tabela 8.3 Tensão de escoamento para corpos de prova longitudinal..... | 52 |
| Tabela 8.4 Tensão de escoamento para corpos de prova transversal..... | 53 |
| Tabela 8.5 Dados do ensaio de dureza. | 55 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

API – American Petroleum Institute
ASMT – American Society for Testing and Materials
A – Área
Ao – Área Inicial
Af – Área no Ponto de Ruptura
CFC- Cubo de Face Centrada
CCC- Cubo de Corpo Centrado
HC – Hexagonal Compacta
MPa – Mega Pascal
F – Força
 σ – Tensão
 $\Delta L\%$ - Percentual de Alongamento
lo- Comprimento Útil Inicial
lf- Comprimento Útil após Fratura
RA% - Percentual de Redução da Área
U – Energia
 ϵ_1 – Deformação no Momento do Escoamento

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO..... | 17 |
| 2. OBJETIVO | 19 |
| 3.REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 20 |
| 3.1. AÇO MICROLIGADO..... | 20 |
| 3.2. AÇO API..... | 21 |
| 3.3. PROPRIEDADE MECÂNICA DOS MATERIAIS | 21 |
| 3.3.1. Deformação Elástica. | 22 |
| 3.3.2. Deformação Plástica..... | 23 |
| 3.3.3. Escoamento e Limite de Escoamento | 24 |
| 3.3.4. Limite de Resistência à Tração | 25 |
| 3.3.5. Ductilidade | 26 |
| 3.4. Resiliência | 28 |
| 3.5. Tenacidade..... | 29 |
| 3.6. Transição Dúctil – Frágil | 29 |
| 4. ENSAIO POR IMPACTO, ENSAIO CHARPY..... | 32 |
| 5. ENSAIO DE TRAÇÃO | 34 |
| 6. METALOGRAFIA. (ANALISE MICROESTRUTURAL)..... | 36 |
| 6.1. Microscopia óptica..... | 36 |
| 6.2. Preparação da Amostra. | 36 |
| 7. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL..... | 38 |
| 7.1. Ensaio Charpy..... | 38 |
| 7.2. Ensaio de Tração..... | 38 |

| | |
|---|-----------|
| 7.3. Metalografia. | 39 |
| 7.4. Ensaio de Dureza | 39 |
| 8. RESULTADOS E DISCUSSÃO. | 40 |
| 8.1. Ensaio Charpy | 40 |
| 8.2. Ensaio de Tração | 44 |
| 8.3. Metalografia. | 49 |
| 9. CONCLUSÕES | 51 |
| 10. REFERÊNCIAS | 53 |
| ANEXO I | 55 |

1. INTRODUÇÃO

O aumento da utilização do gás natural e a descoberta do pré-sal, há um aumento nas linhas dutoviárias de petróleo e gás natural. Assim há a necessidade de estudos para novos materiais que possuam uma melhor resistência mecânica, para que não haja um aumento nos acidentes com linhas dutoviárias. Um acidente de uma linha pode ter grandes proporções, pode causar morte de seres humanos, animais e de uma parte do ecossistema. Com o crescimento das linhas deve-se aumentar a confiabilidade do duto.

Pode-se ver que há necessidade de uma melhoria na resistência mecânica dos dutos para que tenha uma menor probabilidade de acidentes. Quantas mais linhas dutoviárias, maior o número de pessoas que podem estar perto das linhas.

Com a descoberta do pré-sal muitas linhas vão sair de Santos e irem para todo o país, assim fazendo com que elas sejam mais longas e fazendo com que a pressão de cada linha seja maior do que as possuídas no Brasil.

Pode-se ver que ao longo dos anos aconteceram acidentes, onde há mortos e feridos como no México no ano de 2010 que houve a explosão de um duto de transporte de petróleo devido a uma perfuração no duto provocada por ladrões, houve 22 mortes e 52 feridos. A figura a seguir mostra a destruição ocorrida no México devido a explosão de. (ig, 2010)

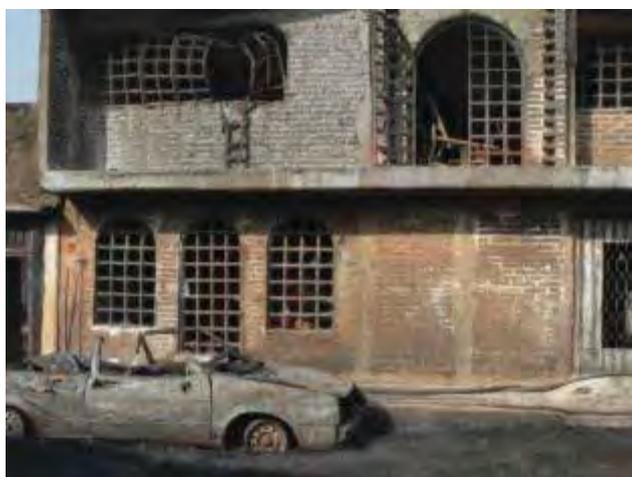


Figura 1.1: Acidente de explosão de dutos no México. (ig, 2010)

No Brasil em pouco tempo entre os anos de 2000 e 2001 houve cinco grandes acidentes de linhas de dutos da Petrobrás. Os acidentes ocasionaram grandes impactos ambientais, como em fevereiro de 2001 na região da Serra do Mar no Paraná um duto rompeu devido à movimentação de um bloco de solo, esse deslocamento causou um maior esforço sobre o duto fazendo com que ele rompesse. O impacto desse acidente foi o vazamento de óleo diesel que atingiu quatro rios da região. (http://www2.dbd.puc-rio.br/pergamum/tesesabertas/0311068_05_cap_04.pdf)

O estudo de novos materiais para a construção de dutos para transportes de petróleo e seus derivados está crescendo devido à necessidade de ter um material mais resistente mecanicamente onde os dutos possam ficar mais barato e com uma confiabilidade melhor. Este estudo foi realizado em parceria com a empresa TENARIS-CONFAB S.A. que proporcionou as chapas de API 5L para o estudo das resistências do material.

Com um novo material que possui uma maior resistência mecânica a espessura do duto pode ser diminuída sem que haja uma modificação na resistência de duto já utilizado em linhas dutoviárias.

O ensaio de tração estuda a resistência à tração do material e essa resistência tem grande importância devido à utilização da chapa de API 5L. O material sofrerá tensões quando for deformando para a contração de tubos.

O ensaio de impacto pode mostrar as diferentes resistências de um mesmo material em diferentes temperaturas. Assim podendo mostrar como a temperatura influencia na resistência do material.

Um exemplo de como o ensaio de impacto é importante é o acidente do Titanic, se o material fosse estudado a baixas temperaturas saberia que o material perderia resistência ao impacto. Assim poderia não ter ocorrido o acidente.

2. OBJETIVO

O trabalho tem como objetivo estudar e analisar a resistência mecânica de uma chapa de aço microligado. Para o estudo de resistência da chapa foi feito dois ensaios de resistência mecânica, o ensaio de tração e o ensaio de impacto. Com os resultados discutir se o material pode ser utilizado na produção de tubo para linhas dutoviárias.

3.REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.

3.1. AÇO MICROLIGADO

Aços microligas são conhecidos como aços de alta resistência e baixa liga (ARBL). Sua composição química é similar a de aço baixo-carbono com adição de elementos de liga como o Nióbio (Nb), Titânio (Ti) ou Vanádio (V). Essas adições são feitas para que o aço microligados possuam diferentes resistências mecânicas.

Eles são desenvolvidos através do aço de baixo carbono, nele é adicionada pequena porcentagem de elementos de liga para que as características mecânicas sejam modificadas de modo que o material suas devidas resistências. Uma característica importante do aço microligado é aumentar a resistência mecânica, em relação ao aço de baixo carbono, sem que a ductibilidade e a soldabilidade(acabar a frase).

“Os aços microligados (aços de alta resistência mecânica e baixa liga) utilizam vários elementos de liga em adição ao carbono para que possam atingir resistências mecânicas superiores; o limite de escoamento para estes aços está situado entre 290 e 450 MPa.” (Fabiano Souza)

O aumento da resistência mecânica ocorre devido à coexistência de diferentes constituintes microestruturais. Os aços microligados possuem uma grande complexidade em sua microestrutura, assim houve discussões de como iria ser feita a nomenclatura. Após um estudo mais aprofundado decidiu-se que a nomenclatura seria feita através da resistência mecânica do aço. Um exemplo é o aço ARBL-80 que se refere a um aço de alta resistência e baixa liga, seu limite de escoamento é de 80ksi(550 MPa). Porém essa nomenclatura não especifica o tipo de estrutura que o material possui, pode-se ter mais de um tipo de estrutura de um aço microligado que possui um limite de escoamento igual a 80ksi. Outro exemplo de nomenclatura de um aço microligado é a norma da API, que é feita em função da aplicação do material e sua resistência como, por exemplo, API 5L

é um aço utilizado em tubulações de transporte de gás natural e petróleo (Specification for line pipe). Quando se diz que um aço é API 5L X80 isso quer dizer que o material é um aço microligado utilizado na

3.2. AÇO API

A norma API (American Petroleum Institute) é utilizada para a nomenclatura de tubulações de indústrias petrolíferas. Ela classifica os aços por sua aplicação, composição e resistência. Os aços API 5L são utilizados nas linhas de transmissão (dutosviárias).

Na norma há dois níveis distintos de especificação de produto, o PSL1 e PSL2 suas diferenças são o rigor no detalhamento e nos rigores técnicos. O PSL1 é utilizado em aços API 5L entre A25 e X70. O PSL2 é utilizado para API de graus B a X80. Os tubos da especificação PSL2 possuem um maior controle da composição química do aço em especial o enxofre, o fósforo e o carbono equivalente máximo do material, eles também possuem valores mínimos de tenacidade e valores máximos de tensão de escoamento e resistência à tração. No anexo I se pode observar as resistências mecânicas e a composição química dos aços para tubos API 5L do nível PSL2, nelas estão especificados de acordo com cada tipo de aço API 5L. Assim o material testado deve estar dentro das exigências da norma.

3.3. PROPRIEDADE MECÂNICA DOS MATERIAIS

Os materiais, quando estão em serviço, estão sujeitos a forças quando aplicados em projetos. Assim tendo que estudar o comportamento do material em determinadas situações, para conhecer suas características, assim podendo escolher um material mais adequado para o projeto e sua funcionalidade.

“O comportamento mecânico de um material reflete a relação entre a sua resposta ou deformação a uma carga ou força que esteja sendo aplicada. Algumas

propriedades mecânicas importantes são a resistência, dureza, a ductilidade e a rigidez”. (Callister,2002)

As propriedades mecânicas dos materiais são definidas através de experimentos de laboratórios. Para que suas propriedades não sejam calculadas erroneamente os ensaios devem ser feitos com as devidas condições de serviços, como por exemplo, as cargas aplicadas e o meio ambiente que deve ser considerado para os cálculos. As cargas que são aplicadas podem ser de tração, a de compressão e a de cisalhamento, elas podem ser aplicadas em um determinado tempo, esse tempo influencia no ensaio do material, cada tempo tem uma determinada resposta do material.

Como várias áreas de estudo usam os ensaios para determinação das propriedades do material foram feitas algumas normas para ser seguidas, como por exemplo, a norma ASTM (American Society for Testing and Materials) que é a norma que é mais utilizada nos Estados Unidos. A norma ASTM determina o tamanho do corpo de prova, as cargas que devem ser aplicadas, entre outros. Esses dados são atualizados e publicados anualmente.

Quando há um ensaio de tração ocorre uma deformação no corpo de prova, essa deformação influencia na tensão que é aplicada no corpo de prova. A tensão é uma relação entre a área do corpo de prova e a força que é aplicada. Como a deformação ocorre na área de atuação da força a tensão aumenta sem que a força aplicada modifique. A seguir a equação da tensão:

$$\sigma = F/A \quad (1)$$

Assim quando há a deformação plástica de um material a força à tração que um material aguenta é menor devido à modificação da área.

3.3.1. Deformação Elástica.

A deformação elástica é a deformação que quando a carga aplicada é liberada a o material volta à forma original.

Através do gráfico da curva tensão – deformação pode-se determinar o modulo de elasticidade do material. O modulo de elasticidade é considerado como sendo uma rigidez ou resistência do material em relação à deformação elástica. Quanto maior o modulo de elasticidade maior será a resistência do

material a deformação, menor será a deformação elástica a uma determinada tensão.

O módulo de elasticidade é conhecido da lei de Hooke, que se refere à lei da elasticidade de um material. Tensão proporcional à deformação.

O módulo de elasticidade está relacionado diretamente com a temperatura do material, quanto mais alta a temperatura menor será o módulo de elasticidade e quando menor a temperatura do material maior será o módulo de elasticidade. Isso quer dizer que quanto maior a temperatura maior será a deformação elástica do material e o inverso ocorre com baixas temperaturas.

Pode-se observar no gráfico na curva tensão – deformação a tensão de escoamento e o módulo de escoamento do material.

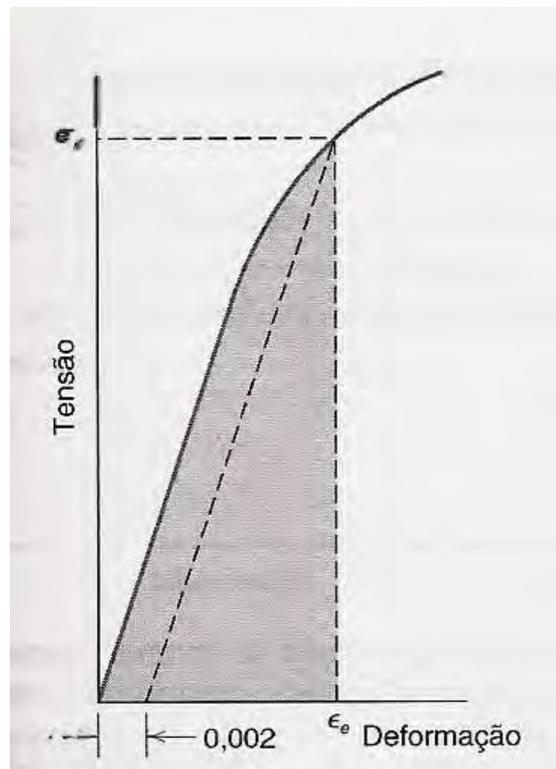


Figura 3.1: Gráfico Tensão – Deformação (Callister,2002)

3.3.2. Deformação Plástica

A deformação plástica ocorre quando a deformação do material é além do ponto da deformação elástica. O material não possui a proporção da tensão com a deformação. Neste momento a deformação é plástica, o material não volta à forma original, possui uma deformação permanente.

A transição do comportamento elástico plástico ocorre gradativamente para a maioria dos materiais. No gráfico a baixo é possível observar a transição elástico plástico.

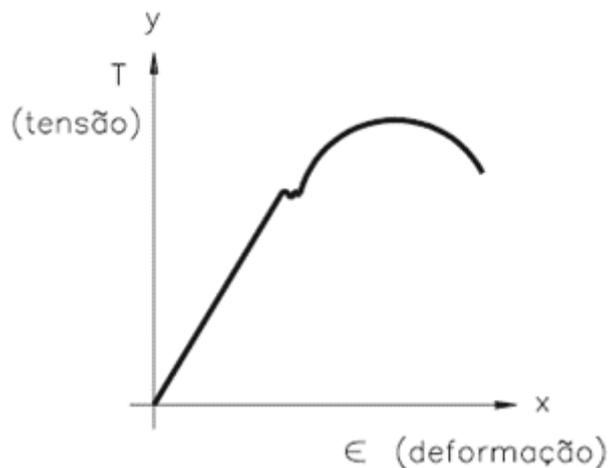


Figura3.2: Gráfico Tensão – Deformação com deformação plástica.

(Samuel,2008)

3.3.3. Escoamento e Limite de Escoamento

O estudo nos materiais tem como objetivo identificar a deformação elástica de um material, assim também é desejável identificar a tensão em que a deformação plástica ocorre. Essa deformação é chamada de escoamento, é o ponto onde ocorre o afastamento da linearidade da curva de tensão- deformação.

Como em alguns casos não é possível determinar o ponto em que há a deformação plástica foi estabelecido uma convenção onde uma linha reta é construída paralela à porção elástica da curva tensão – deformação, a partir de uma pré-deformação específica, normalmente de 0,002. A tensão que corresponde ao ponto no gráfico de tensão – deformação é denominada de tensão limite de escoamento.

Para os materiais que não possui região elástica linear não é possível usar o metido da linha de pré-deformação. Em alguns casos ocorre o fenômeno do pico do escoamento descontínuo como observado na figura 3.6. A tensão de escoamento flutua em torno de alguns pontos, assim a tensão de escoamento do

material é dada pela média do valor mais alto e do valor mais baixo em que a tensão de transição flutua.

Um exemplo é o gráfico a baixo, nele há uma área de transição com diferentes valores de tensões. Nesse caso pega-se o limite de escoamento superior e o limite de escoamento inferior e tira a media dos dois pontos.

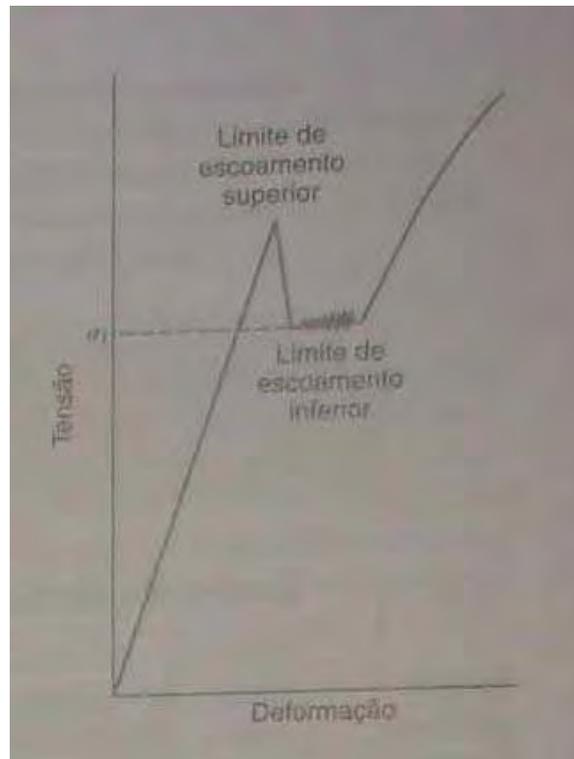


Figura3.3: Demonstra um caso de limite de escoamento superior e limite de escoamento inferior (Callister,2002)

3.3.4. Limite de Resistência à Tração

O limite de resistência à tração é o ponto máximo do gráfico tensão – deformação, o ponto mostra a tensão máxima que o material suporta antes de ocorrer a ruptura. Quando é aplicada essa tensão e por um tempo certamente irá ocorrer uma fratura. Antes da fratura ocorre à deformação plástica, ela ocorre uniformemente e em um ponto da região estreita de onde está encontrada sob tração. Na tensão máxima um pescoço, uma pequena deformação, ocorre e toda a deformação após a formação do pescoço ocorre nele. Este fenômeno é conhecido como empescoamento e a fratura ocorrem nele. A resistência a fratura é correspondente a tensão aplicada no momento em que ocorre a fratura.

Pode-se observar na figura 3.4 o gráfico tensão – deformação e nele os limites de resistência à tração, a resistência a fratura e o desenvolvimento de pescoço no corpo de prova.

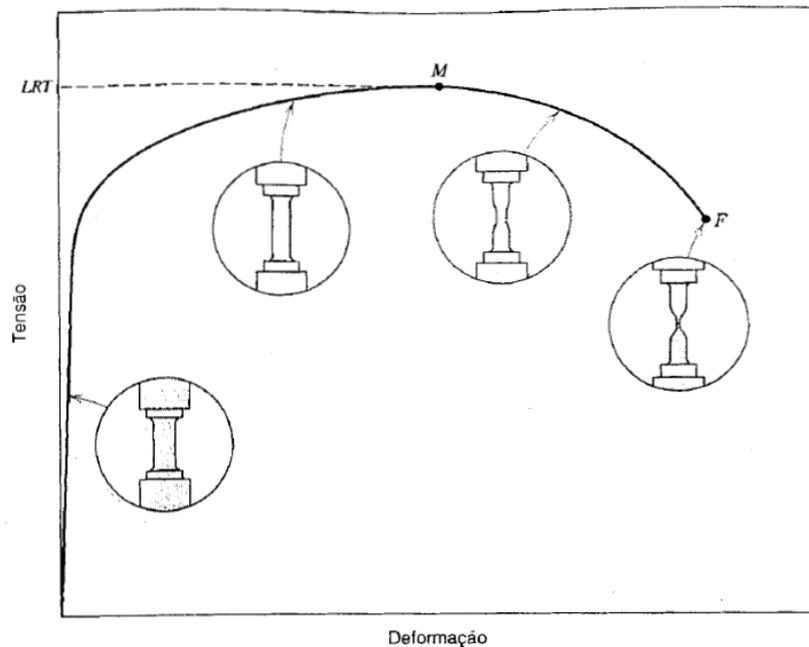


Figura3.4: Demonstração da deformação do corpo de prova (Callister,2002)

Existem diferentes limites de resistência a tração, eles podem variar entre 50MPa (para alumínio) e 3000MPa (aço de elevada resistência). Para o estudo de tensões em projetos a tensão de limite de escoamento que é utilizada, pois quando ocorre a tensão máxima do material, o limite de resistência à tração o material já foi deformado plasticamente e a estrutura estudada não é mais a mesma, já sofreu muitas deformações. A resistência à fratura não é utilizada para fins de engenharia, projetos.

3.3.5. Ductilidade

A ductilidade é uma propriedade mecânica muito importante. Ela representa o grau de deformação plástica que um determinado material suporta até que ocorra a fratura do corpo de prova. Um material que não possui deformação plástica, ou essa deformação é muito pequena, antes da fratura é chamado de material frágil, ele não avisa quando que irá romper, isso significa que assim que sofre uma determinada tensão ele já rompe. Um material dúctil é um material que

possui uma deformação plástica antes da ruptura. Pode-se observar na figura a seguir a diferença de curva entre um material dúctil e um frágil.

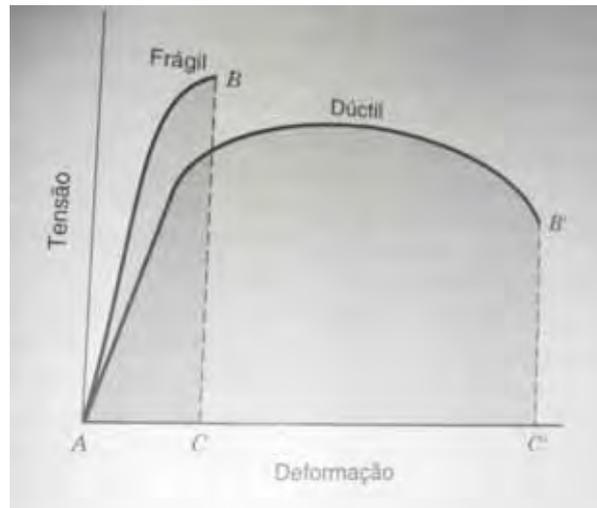


Figura3.5: Gráfico Tensão – Deformação Diferença Dúctil Frágil (Callister,2002)

A ductilidade pode ser expressa tanto como alongamento percentual ou como redução de área percentual. O alongamento percentual é a porcentagem da deformação plástica no momento de fratura do material. A seguir está a formula de calculo do alongamento percentual.

$$\Delta L\% = ((l_f - l_0) / l_0) \times 100 \quad (2)$$

Sendo l_f comprimento útil após a fratura e l_0 comprimento útil antes do ensaio. Como o percentual varia de acordo com o l_0 , quanto menor o l_0 maior será a fração de alongamento, assim foi definido um determinado tamanho para que os corpos-de-prova tenham um tamanho específico, este tamanho normalmente é de 50 mm. Assim é uniformizada a forma de calculo e quando for comparar dois ensaios diferentes não haverá divergências.

A redução de área percentual é definida na seguinte formula:

$$RA\% = ((A_0 - A_f) / A_0) \times 100 \quad (3)$$

Onde A_0 é a área inicial da seção reta e A_f é a área da seção reta no ponto de fratura.

A ductilidade do material modifica de acordo com a temperatura do material, em altas temperaturas o material é mais dúctil e em baixas temperaturas mais frágeis. Essa diferença de ductilidade pode ser vista no gráfico a seguir (figura 3.6).

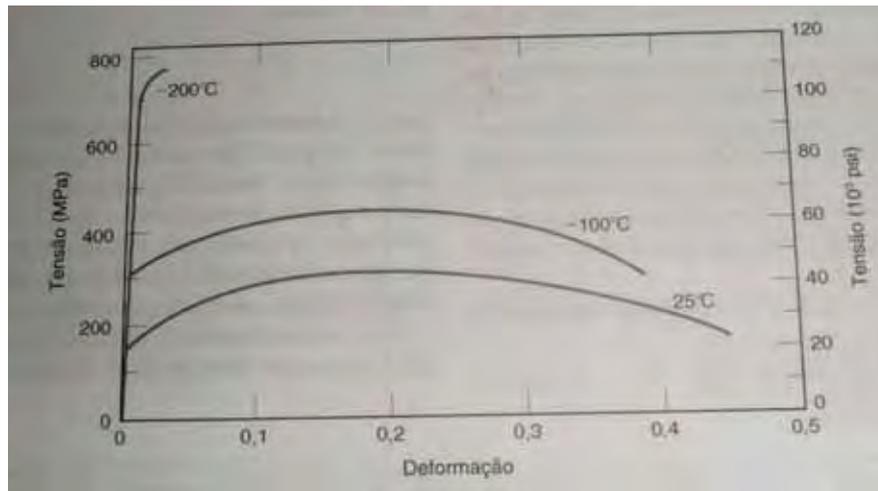


Figura3.6: Gráfico Tensão – deformação em diferentes temperaturas (Callister,2002)

A ductilidade é uma propriedade importante na engenharia, pois o projetista deve saber o grau de deformação antes de ocorrer uma fratura na estrutura. Esse grau é utilizado na fabricação de produtos através da deformação, assim sabendo até que ponto o material pode ser deformado.

Materiais frágeis são considerados os materiais que possui até 5% de deformação plástica antes que ocorra a fratura do corpo de prova.

3.4. Resiliência

É a capacidade que um material tem de absorver a energia quando sofre a deformação elástica. O módulo de resiliência é representado pela U , onde ele representa a energia de deformação por unidade de volume para tencionar um material até sua tensão limite de escoamento. A fórmula matemática da resiliência é:

$$U = \int_0^{\epsilon_1} \sigma d\epsilon \quad (4)$$

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

$$U = \frac{1}{2} \epsilon_1 \sigma_1 \quad (5)$$

ϵ_1 é a deformação no momento do escoamento.

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

3.5. Tenacidade

Tenacidade é a habilidade de um material a de absorver energia até a sua falha, fratura. Ela sofre influência da carga aplicada e da geometria do corpo de prova. Para ensaios com carregamentos dinâmicos, com elevada taxa de deformação, deve ser feito um entalho no corpo de prova para que ocorra a fratura do material. Normalmente o ensaio com o entalhamento no corpo de prova é o ensaio de impacto.

Para situações de pequena taxa de deformação o ensaio para o estudo da tenacidade pode ser feito no ensaio de tração, semelhante à resiliência a tenacidade é a área de baixo da curva de tensão – deformação, ela também é uma energia então sua unidade de medida é joules. Para que o material seja tenaz ele deve ser tanto resistente como dúctil, materiais dúcteis são mais tenazes do que materiais frágeis. Pode observar na figura 3.3.6 que o material frágil tem um maior limite de escoamento, porém o material dúctil é mais tenaz, essa afirmação pode ser feita através do estudo das áreas abaixo das duas curvas de tensão – deformação.

3.6. Transição Dúctil – Frágil

A transição dúctil – frágil é dependente da temperatura do material. Para estudar essa propriedade do material o ensaio de impacto é o recomendado. Ele estuda a quantidade absorvida pelo material como impacto. Sob altas temperaturas o material absorve mais energia, assim se tornado tenaz e quando o material está em baixas temperaturas ele absorve menos energia, assim tornando mais dúctil.

Pode-se observar nos corpos de prova quando há uma fratura dúctil através da superfície fibrosa e opaca, ela possui uma textura granular, quando a fratura é frágil ela possui uma superfície granulada. Quando o material está na área de transição dúctil – frágil a sua superfície de fratura possui características de ambas as fraturas.

Para diferentes tipos de ligas existe uma faixa de temperatura onde ocorre a transição dúctil – frágil, assim não sendo possível identificar uma temperatura onde ocorre a transferência do dúctil para o frágil. Não foi estabelecido nenhum critério para estabelecer a temperatura de transição, assim normalmente é utilizado um determinado valor para a energia absorvida pelo impacto.

Algumas ligas metálicas não possuem essa transição, as ligas que possuem estrutura cristalina CFC permanecem dúcteis até em baixas temperaturas. As ligas que possuem estruturas cristalinas CCC e HC a sua temperatura de transição é sensível tanto para microestrutura quanto para composição. Assim uma deformação industrial pode afetar a temperatura da transição.

Com o ensaio de impacto pode-se traçar uma curva de transição do material de forma que para um projeto o projetista possa consultar sem ter que determinar via ensaios que tipo de material utilizar e qual a temperatura mínima que o material pode ser trabalhado para que não haja falha. O gráfico da figura 3.9 mostra a curva de transição através da energia de impacto e a porcentagem de fratura do aço A283.

Para um projeto deve-se sempre utilizar ligas que na temperatura de trabalho o material não passou da transição de dúctil para frágil. Um exemplo de acidente causado por causa da temperatura é o Titanic, o material em temperatura ambiente possuía as resistências adequadas para o navio, porém quando passou por águas de temperaturas baixas o material mudou sua resistência(tenacidade) de dúctil para frágil, assim quando bateu no iceberg o material fraturou. A figura 3.10 é uma reportagem sobre o desastre do Titanic.

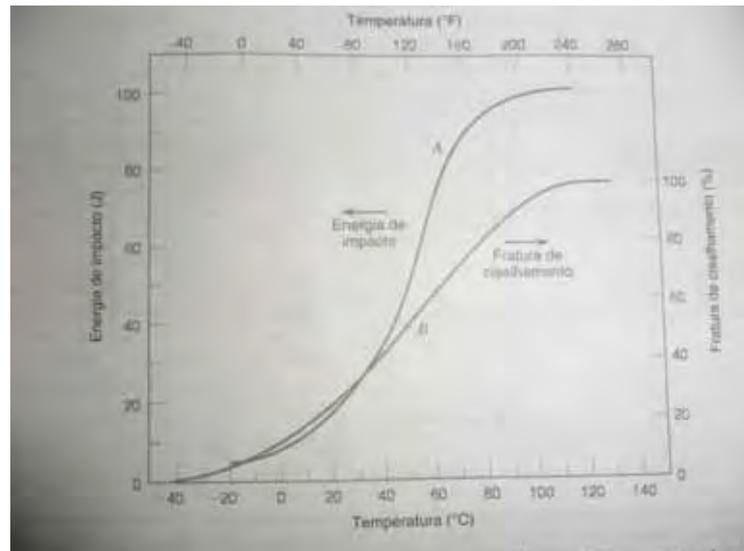


Figura3.7: Gráfico de transição dúctil – frágil (Callister,2002)



Figura3.8: Notícia do acidente do Titanic (Vitor Dirami,2012)

4. ENSAIO POR IMPACTO, ENSAIO CHARPY.

O ensaio Charpy estuda a resistência ao impacto de um material, a energia de ao impacto, também chamado de tenacidade ao entalhe.

O corpo de prova consiste em uma barra de seção reta quadrada, com um entalho que pode ser de três diferentes geometrias. A figura a seguir representa as diferentes geometrias que o entalho pode ter. O entalho com a geometria em “V” é o mais utilizado nos ensaio.

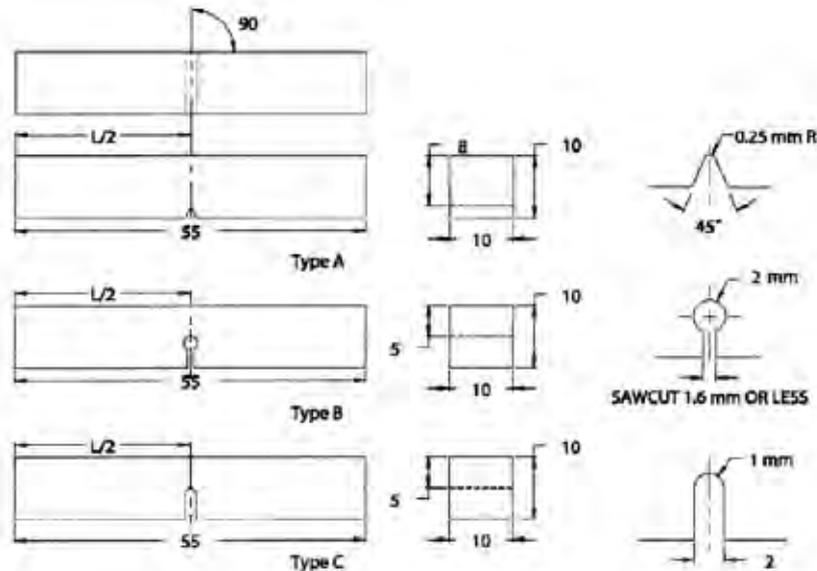


Figura.4.1: corpo de prova do ensaio de impacto Charpy (ASTM E23 –Setembro de 2007)

O equipamento do ensaio de impacto Charpy consiste em um corpo, uma escala, um martelo, um braço e a bigorna. Na figura 4.2 está representado o equipamento do ensaio.

O ensaio consiste em colocar o corpo de prova na bigorna (base do equipamento), posicionar o martelo na parte superior onde o ponteiro da escala estará no zero, após o posicionamento o martelo é solto e com a ação da gravidade ele atinge o corpo de prova com certa força, essa força é sempre a mesma, pois ela depende da massa do martelo e da altura que ele é solto e essas duas condições são constantes, ele será atingido pelo martelo e será fraturado, o ponteiro irá marcar na escala a energia que o corpo de prova absorveu no impacto.

O ensaio de impacto Charpy respeita uma norma para ser realizado, essa norma é a ASTM E232 (ASTM internacional- Setembro de 2007). Nela está especificado o tamanho do braço do martelo, a altura que o martelo deve estar, o peso, o tamanho e formato do corpo de prova, entre outras coisas. Para que o ensaio seja aceito pela ASTM o equipamento assim como os corpos de prova

devem estar respeitando a norma. A figura 4.1 mostra os corpos de prova que são definidos pela a ASTM, assim como a figura 4.2 que mostra o equipamento.

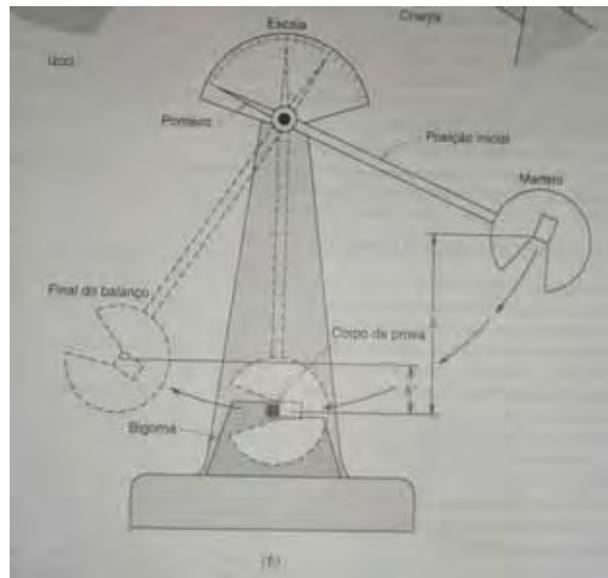


Figura 4.2: Equipamento do Ensaio Charpy (Callister,2002)

No ensaio de impacto também pode ser definida a curva de transição dúctil – frágil, assim deve ser feito o ensaio com diferentes temperaturas, desde temperatura elevadas a baixas temperaturas.

5. ENSAIO DE TRAÇÃO

É um dos ensaios mais comuns de tensão – deformação, ele pode ser utilizado para analisar diversas propriedades mecânicas. O ensaio consiste aplicar uma força uniaxial ao longo do eixo mais comprido do corpo de prova e essa força deforma o corpo de prova até que ocorra a ruptura. A deformação ocorre na região central, a mais estreita do corpo de prova. O corpo de prova do ensaio é normalmente possui uma geometria circular, a outra geometria utilizada é retangular, a figura a seguir representa a geometria de um corpo de prova circular, as medidas são definidas pela norma ASTM.

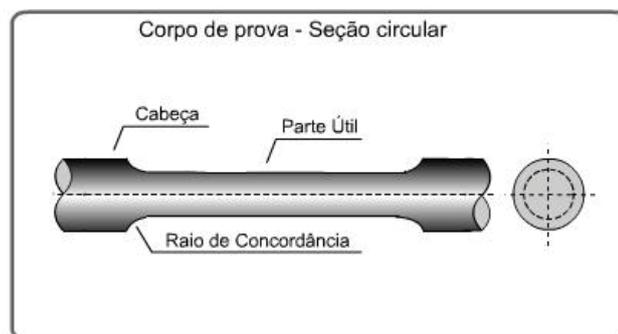


Figura 5.1: Corpo de prova do ensaio de tração (http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6543-corpos-de-prova-para-o-ensaio-de-tracao#.UKxIkYdX2So 12/12/2012)

O equipamento do ensaio é projetado para deformar o corpo de prova constantemente, ele mede simultaneamente a carga instantânea aplicada. Com esses dados ele plota o gráfico de tensão – deformação que proporciona as propriedades do material. O equipamento utilizado no ensaio atualmente está ligado a um software que plota o gráfico e que mostra as resistências do material ensaiado. A figura a seguir representa o equipamento do ensaio de tração, nela estão representadas as partes mecânicas do equipamento junto dessa parte há um computador ligado para armazenamento dos dados do ensaio.

O corpo de prova é fixado nas garras do equipamento, nele também é posicionado o extensômetro para medir o alongamento do corpo de prova antes da ruptura, caso não haja um extensômetro no equipamento essa medição pode ser feita com um paquímetro, deve ser medido o tamanho do corpo de prova antes e depois do ensaio a diferença desses valores é o alongamento sofrido no ensaio.

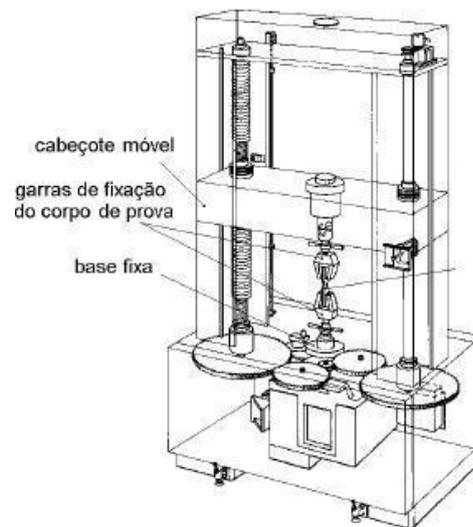


Figura 5.2: Equipamento do ensaio de tração (<http://www.ebah.com.br/content/ABAAABNO8AF/ensaio-tracao-pmr-2202-aco-1020> 12/12/2012)

6. METALOGRAFIA. (análise microestrutural)

Metalografia é a análise das estruturas dos grãos de um material onde através da leitura da estrutura de um corpo de prova que é polido e na maioria das vezes atacado com reagentes, esses reagentes servem para melhor análise dos grãos que compõe o material como, por exemplo, a análise de um aço, nele pode haver diferentes grãos como a perlita, a ferrita, a austenita e a martencita.

A metalografia pode ser feita com diferentes análises microscopias podendo elas ser a microscopia eletrônica de varredura, a microscopia eletrônica de transmissão e a microscopia óptica. Para análise dos grãos de um aço API 5L será somente necessário a análise o microscópio óptico.

6.1. Microscopia óptica.

A microscopia óptica é uma técnica de observação de microestruturas de aços e ferros fundidos. Esse tipo de microscópio funciona aplicando uma luz na superfície do corpo de prova e ela é refletida para o observador. Os aumentos de um microscópio óptico variam de acordo com o comprimento de onda da radiação empregada pela luz, um dos maiores aumento é de 1400 vezes, acima desse valor o microscópio óptico não fornece as devidas informações do material.

A variação das técnicas de iluminação da superfície da amostra também influência no alcance de aumento do microscópio. Os raios luminosos refletem na amostra nas partes atacadas, bordos de poros, arestas de trincas, essas áreas aparecem claras e a parte polida não refletem os raios sendo assim as partes que aparecem escuras na imagem são as polidas.

6.2. Preparação da Amostra.

As fases da preparação de uma amostra são as seguintes:

- 1) Escolha da seção a ser estudada;
- 2) Preparação da superfície através da planificação da superfície e seu polimento;
- 3) Ataque da superfície pelo reagente químico;
- 4) Análise da superfície pelo microscópio óptico;
- 5) Registro da superfície da amostra através de fotografias.

O polimento da superfície é feito através de lixamento e polimento. O lixamento é feito com diferentes lixas, elas variam sua abrasividade de acordo

com o número da lixa, quanto maior o número menor a abrasividade. A primeira lixa normalmente para aços começa com uma lixa de 400 e vai até a lixa de 1200, a cada lixa deve-se mudar a direção em 90°. Após a lixa de 1200 a amostra vai para o polimento que é feito em um equipamento onde há um disco de feltro e nele é aplicado um abrasivo, normalmente o abrasivo aplicado é a alumina. Após o polimento a amostra não deve ter riscos, a superfície deve estar lisa e não pode haver diferença de níveis nela.

O ataque à superfície ocorre após o polimento, ele é normalmente um ataque químico. Por ser químico devem ser respeitados as normas de segurança do trabalho e os cuidados com o meio ambiente. O ataque deve ter um determinado tempo, ele varia de acordo com a composição do material e sua microestrutura, depois se deve limpar a amostra com álcool e em seguida secar a amostra com jatos de ar quente.

Para análise da microestrutura do aço API 5L foi utilizado o reagente nital a 2%. Ele tem uma variedade de porcentagem para uso nos ataques, a concentração de 2% é usual para a metalografia de aços, atacando o contorno do grão. Quando há perlita o ataque com 2% não é aconselhável, pois não ataca a perlita uniformemente.

Após as análises deve ser feito o armazenamento dos dados obtidos através de fotografias feitas no microscópio.

7. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O material utilizado nos experimentos foi o aço API 5L X70 cedido pela empresa TenarisConfab. Os corpos de provas foram cortados e usinados junto com os técnicos dos laboratórios utilizados. O aço API 5L X70 tem a composição química descrita na tabela abaixo.

Tabela 7.1- Composição química do aço X70.

| Concetração dos elementos (% , em peso) | | | | | | | | | | | | | |
|--|------|------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| C | Mn | Si | S | P | Cr | Ni | Cu | Al | Nb | N | V | Ti | Mo |
| 0,07 | 1,63 | 0,22 | 0,005 | 0,01 | 0,011 | 0,011 | 0,013 | 0,008 | 0,042 | 0,008 | 0,072 | 0,010 | 0,228 |

7.1. Ensaio Charpy.

O ensaio charpy foi desenvolvido no laboratório do departamento de materiais e tecnologia junto com os técnicos, para que não houvesse manuseio e acidentes enquanto houvesse o ensaio. Foram utilizados dezessete corpos de prova para quatro diferentes temperaturas todas abaixo de 0° C. As baixas temperaturas escolhidas porque os aços API 5L são aços que possuem grande tenacidade.

Os corpos de provas foram cortados na transversal da laminação da chapa. Assim podendo compara-los com os corpos de prova da tubulação de aço API 5L X70 também cortado na transversal.

O equipamento possui uma escala de 0 a 30 kpm (quilograma por metros), no capítulo oito, onde serão analisados e discutidos os resultados, irá discutir se o equipamento era o ideal para esse material.

Após o ensaio foi analisado os dados junto com a deformação dos corpos de prova. Assim podendo concluir os estudos.

7.2. Ensaio de Tração.

O ensaio de tração foi desenvolvido no laboratório do departamento de materiais e tecnologia junto com um técnico, ele era o responsável pelo manuseamento do equipamento. Foram ensaiados cinco corpos de prova cortados e usinados na transversal da chapa e cinco corpos de provas cortados e usinados na longitudinal da chapa, de acordo com a laminação na produção da chapa. Durante o ensaio foram gravados em um computador, ligado ao equipamento, o

gráfico tensão – deformação e as tensões de escoamento e tensão máxima do material. No corpo de prova estava posicionado também um extensômetro medir a deformação que ocorre durante o ensaio de tração.

Após o ensaio foram feitas as análises dos gráficos e da deformação ocorrida. Esses dados foram analisados em comparação com a norma API 5L. Fotos foram tiradas para a análise da fratura no material. No próximo capítulo serão discutidos os resultados.

7.3. Metalografia.

A metalografia do material foi desenvolvida nos laboratórios do departamento de materiais e tecnologia. Primeiro foram lixadas as superfícies dos corpos de provas, após o lixamento dos corpos de provas em lixas eles foram polidos em um equipamento próprio com alumina. Após a superfície estar polida e estarem sem riscos elas foram atacadas com nital a 2%, ele reagiu com o corpo de prova até que a superfície ficasse opaca, sem brilho, entre 5 a 10 segundos, para que houvesse o inter-rompimento da reação a peça foi colocada em água corrente e depois secada em vento quente.

No momento seguinte do ataque a peça foi levada para ser analisada em um microscópio óptico que nele pode ser observado a estrutura do material, podendo ser observado os contornos dos grãos e as fases do aço. Fotos foram tiradas para que o material possa ser analisado e para que tenha um arquivo do experimento. No próximo capítulo será discutido a composição.

7.4. Ensaio de Dureza

O ensaio de dureza foi realizado nos laboratórios do departamento de materiais e tecnologia. Após a metalografia a amostra foi submetida a um ensaio de microdureza, como a amostra foi atacada com nital era possível ver os contornos de grãos e as fases do aço, assim é possível pegar a dureza de um grão. Junto com um técnico foi possível fazer o ensaio sem que ocorresse erros.

8. RESULTADOS E DISCUSSÃO.

8.1. Ensaio Charpy.

No ensaio charpy foram usados dezessete corpos de provas, sendo três foram para temperatura de -78°C , três para temperatura a 0°C , duas para temperatura a -21°C , seis para temperatura a -170°C . Para que essas temperaturas fossem alcançadas foram utilizado gelo para a temperatura de 0°C , gelo com sal para a temperatura de -21°C , gelo seco e álcool para a temperatura de -78°C , e nitrogênio líquido para a temperatura de -170°C .

Três corpos de provas foram utilizados no nitrogênio líquido, porém com não ficaram imerso o tempo tudo no nitrogênio, após a evaporação total do nitrogênio a temperatura começou a subir assim não podendo tem a certeza da temperatura que o corpo de prova se encontrava durante o ensaio.

As figuras a seguir mostram a deformação de cada corpo de prova, usinado na transversal a laminação, e qual fratura ocorreu com o impacto. A figura 8.1 mostra que não houve rompimento no mesmo acontece com as figuras 8.2, 8.3 e 8.5, somente na figura 8.4 que houve a ruptura completa do material.



Figura 8.1: Corpo de prova após o ensaio charpy a 0°C .



Figura 8.2: Corpo de prova após o ensaio charpy a -21°C .



Figura 8.3: Corpo de prova após o ensaio charpy a -78°C .



Figura 8.4: Corpo de prova após o ensaio charpy a -170°C .



Figura 8.5: Corpo de prova após o ensaio charpy a uma temperatura que não pode ser definida.

Como observado nas figuras somente a temperatura de -170°C que ocorreu uma ruptura completa dos corpos de prova. Na tabela 8.1 podem-se verificar as energias de impacto que o material absorveu durante o ensaio.

Tabela 8.1 Dados do Ensaio Charpy para corpos de prova transversal

| | Energia (J) | | | |
|-------|------------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|
| | T= 0°C | T= -21°C | T= -78°C | T= -170°C |
| 1 | 293,319 | 293,319 | 200,124 | 3,924 |
| 2 | 227,592 | 291,357 | 207,972 | 4,905 |
| 3 | 206,01 | | 280,566 | 4,905 |
| 4 | | | | 8,829 |
| 5 | | | | 5,886 |
| 6 | | | | 7,848 |
| Média | 242,307 | 292,338 | 229,554 | 6,0495 |

Na tabela é visto as energias de impacto de cada corpo de prova e a média de energia por temperatura de ensaio. É possível ver que e as energias ficam sempre muito perto da carga máxima do equipamento.

Como quase não a varia a energia por temperatura até os -78°C a curva transição dúctil – frágil não terá uma boa precisão. A figura 8.6 mostra a curva de energia de impacto por temperatura.

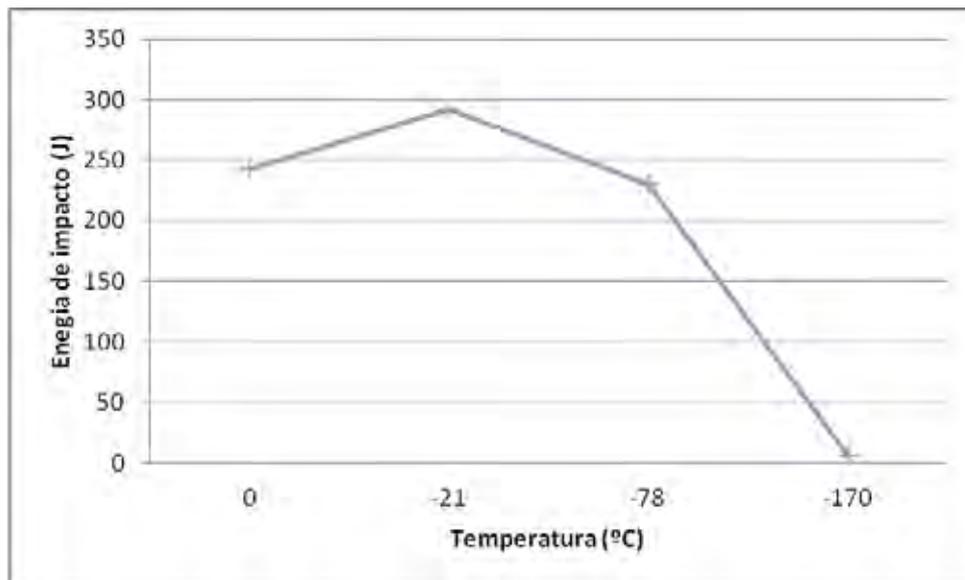


Figura 8.6: Gráfico de Energia de impacto por temperatura do material.

Assim pode-se observar que a energia de impacto diminui com a temperatura de trabalho do material. Para uma aplicação em indústria petrolífera essa diminuição da energia, tenacidade, deve ser cuidadosamente estudada para que em baixas temperaturas o material que for escolhido tenha as características corretas para a aplicação.

Na próxima tabela podem ser observadas as energias de impacto dos corpos de prova do tubo API 5L X70.

Tabela 8.2 Dados do Ensaio Charpy para corpos de prova do tubo transversal

| | Energia (J) | | |
|-------|-------------|----------|-----------|
| | T= 0°C | T= -78°C | T= -170°C |
| 1 | 293,319 | 293,319 | 4,905 |
| 2 | 292,338 | 249,174 | 3,924 |
| 3 | 294,3 | 293,319 | 4,905 |
| 4 | | 293,319 | 4,905 |
| 5 | | 293,319 | 3,924 |
| 6 | | 293,319 | 3,924 |
| 7 | | 293,319 | 4,905 |
| 8 | | 274,68 | |
| Média | 293,319 | 285,471 | 4,484571 |

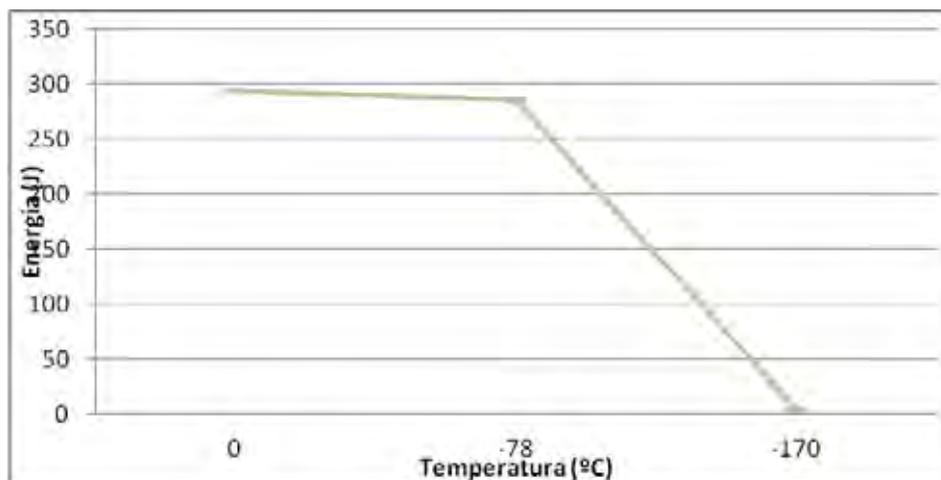


Figura 8.7: Gráfico de Energia de impacto por temperatura do material.

Comparando os resultados dos dois ensaios é possível verificar que quando ocorrem as deformações da chapa para virar tubo os grãos do aço se deformam e assim influencia nas resistências do aço e deixando-o menos tenaz.

8.2. Ensaio de Tração.

No ensaio de tração foram utilizados quatro corpos de prova para cortados e usinados na longitudinal e três corpos de provas cortados e usinados na transversal. Com os gráficos e as tensões de escoamento do material foi possível fazer uma média e assim analisar se as tensões estão de acordo com a norma do aço API 5L X70.

As próximas figuras são gráficos que foram plotados no ensaio de tração. Neles é possíveis verificar as tensões de escoamento e as tensões máximas dos ensaios.

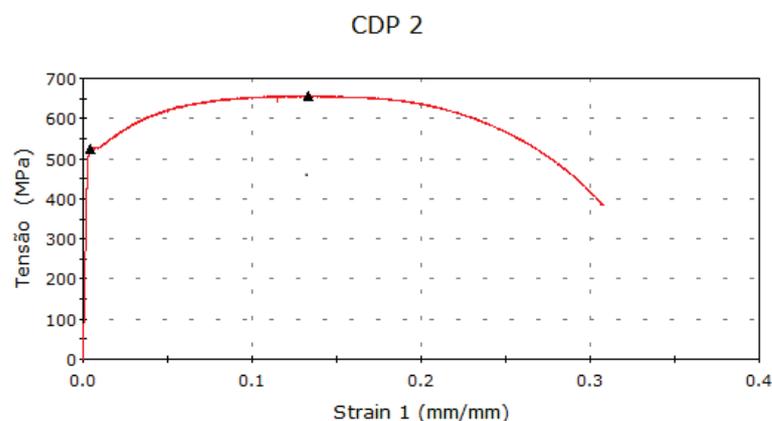


Figura 8.8: Gráfico tensão – deformação corpo de prova transversal.

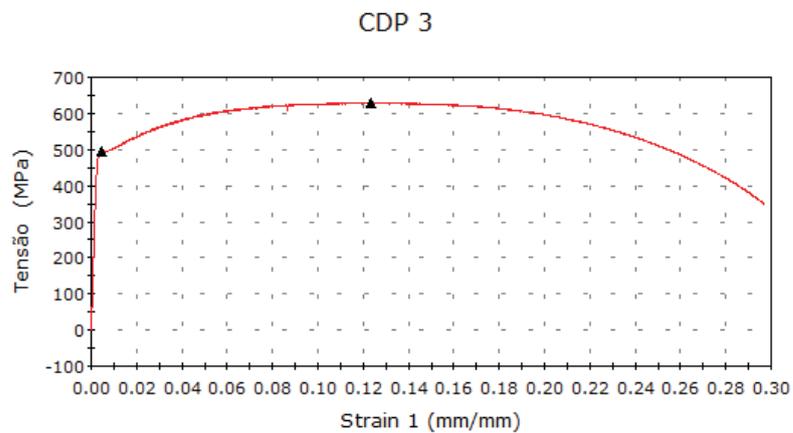


Figura 8.9: Gráfico tensão – deformação corpo de prova transversal.

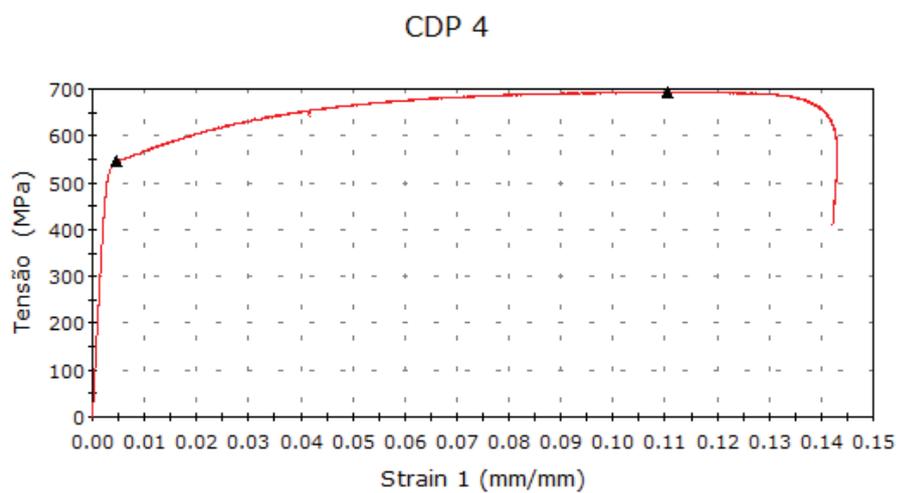


Figura 8.10: Gráfico tensão – deformação corpo de prova transversal.

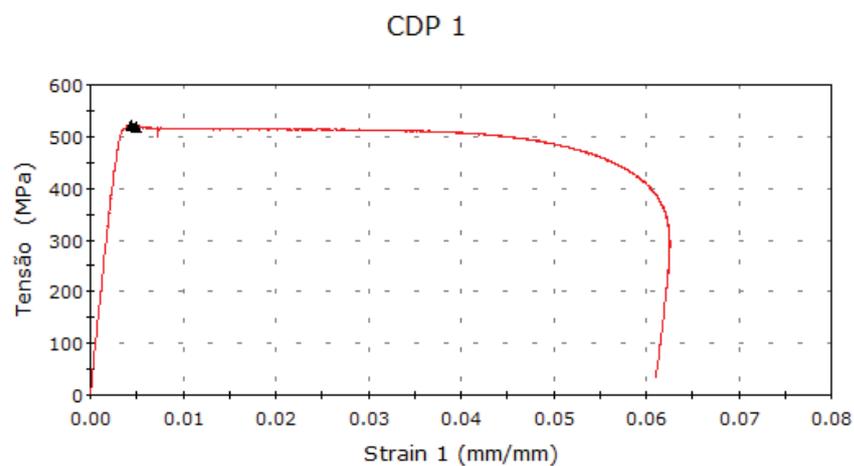


Figura 8.11: Gráfico tensão – deformação corpo de prova longitudinal.

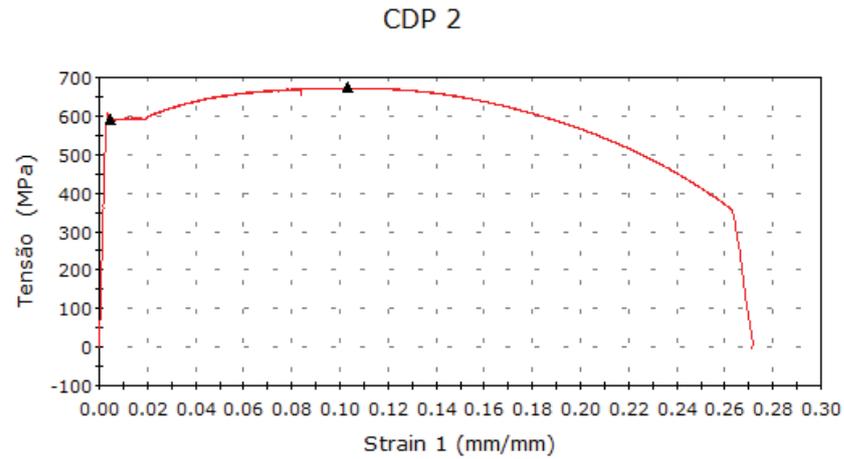


Figura 8.12: Gráfico tensão – deformação corpo de prova longitudinal.

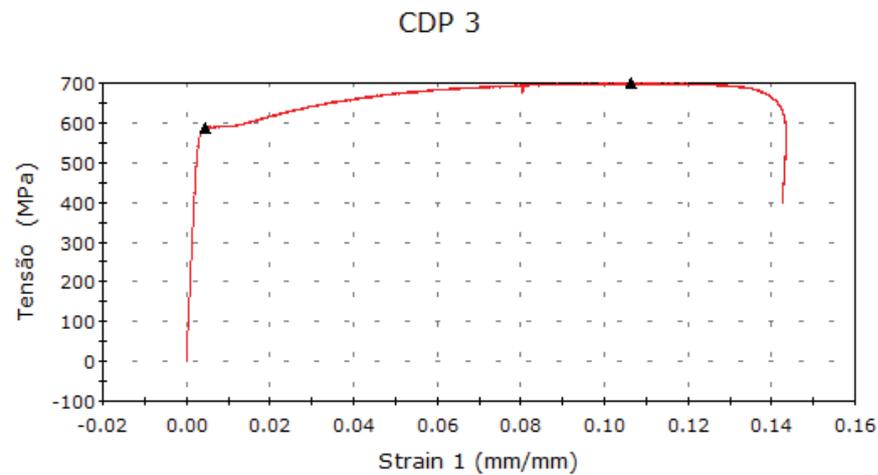


Figura 8.13: Gráfico tensão – deformação corpo de prova transversal.

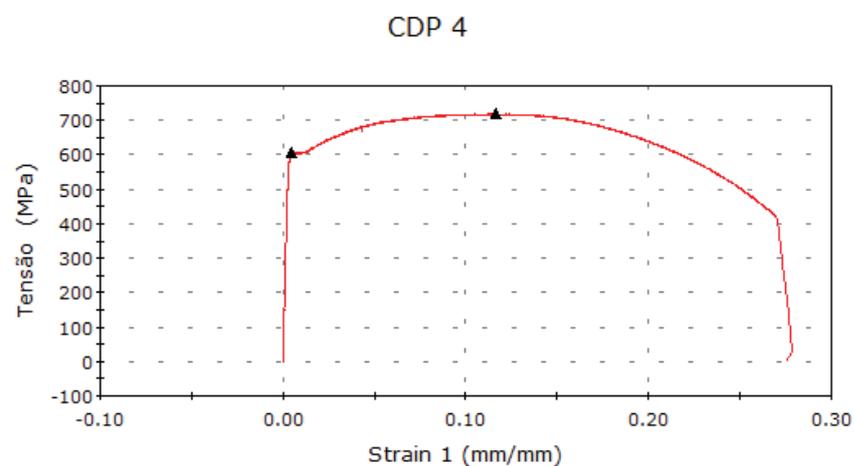


Figura 8.14: Gráfico tensão – deformação corpo de prova transversal.

As figuras abaixo mostram os corpos de prova após o ensaio de tração. Neles estão escritas às tensões máximas de cada corpo de prova, também é

possível observar as deformações ocorridas no corpo de prova elas são chamadas de empescoamento. No empescoamento ocorre a ruptura do material.



Figura 8.15: Corpo de prova longitudinal após o ensaio.



Figura 8.16: Corpo de prova longitudinal após o ensaio.



Figura 8.17: Corpos de prova transversal após o ensaio e um corpo de prova sem ser ensaiado.

Na figura 8.18 é possível observar o empescoamento de um corpo de prova.



Figura 8.18: Corpo de prova longitudinal.

Na tabela a seguir estão as tensões de escoamento em MPa e em ksi. Também está as medias da tensão de escoamento.

Tabela 8.3 Tensão de escoamento para corpos de prova Transversal

| | Tensão de Escoamento | |
|-------|----------------------|-------|
| | MPa | ksi |
| 1 | 540 | 78,32 |
| 2 | 520 | 75,42 |
| 3 | 500 | 72,52 |
| 4 | 540 | 78,32 |
| Média | 525 | 76,14 |

Tabela 8.4 Tensão de escoamento para corpos de prova Logitudinal

| | Tensão de Escoamento | |
|-------|----------------------|-------|
| | MPa | ksi |
| 1 | 600 | 87,02 |
| 2 | 590 | 85,57 |
| 3 | 600 | 87,02 |
| Média | 596,67 | 86,54 |

Através das tabelas é possível analisar que a média das tensões de escoamento é aceita pela norma API 5L X70, e que os corpos de prova na transversal apresentam uma maior tensão de escoamento. Isso ocorre porque o corpo de prova na transversal está sofrendo a tensão no sentido da laminação, assim fazendo com que as tensões sejam um pouco maiores.

A porcentagem de aumento da tensão de escoamento do corpo de prova longitudinal com a tensão de escoamento do corpo de prova transversal é de 13.65%. Mostrando que o grão influencia resistência ao escoamento de um mesmo material, na metalografia é possível analisar os grãos assim mostrando que o alongamento do grão na longitudinal faz com que a resistência ao escoamento aumente.

8.3. Metalografia.

Na metalografia foram utilizadas duas amostras sendo uma transversal e outra longitudinal à laminação da chapa. As figuras 8.19 e 8.20 são as fotografias da microestrutura da amostra.

É possível através das fotografias analisar os contornos de grãos das amostras. Na figura 8.19 os contornos de grãos estão afinados por conta da laminação e como a amostra foi tirada na longitudinal da chapa a laminação fica visível quando feito a metalografia. Na figura 8.20 os contornos de grãos não estão afinados mostrando que os grãos não foram deformados.

Com a análise das formações dos grãos e das fases da amostra é possível através da figura 8.21 ver qual foi o tratamento térmico que o material foi submetido



Figura 8.19: metalografia da amostra em corte longitudinal. A figura A mostra os contornos de grãos da ferrita e na figura B as parte circuladas são as perlitas do material.

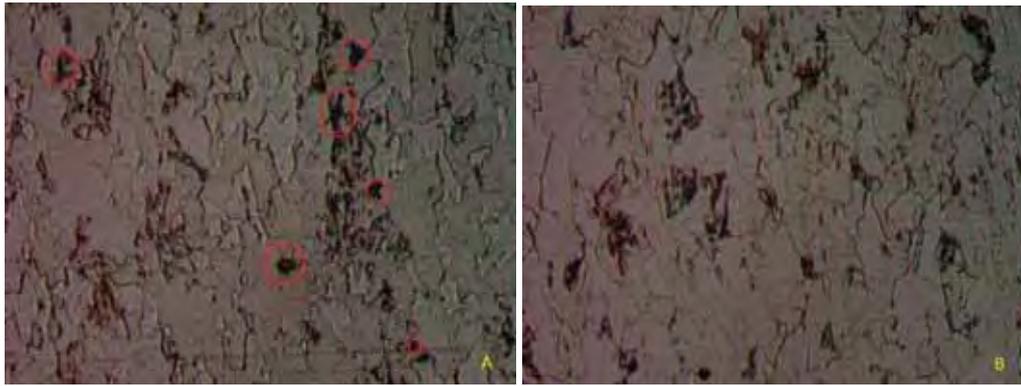


Figura 8.20: metalografia da amostra em corte transversal. A figura A as parte circulasdas são as perlitas do material e na figura B mostra os contornos de grãos da ferrita.

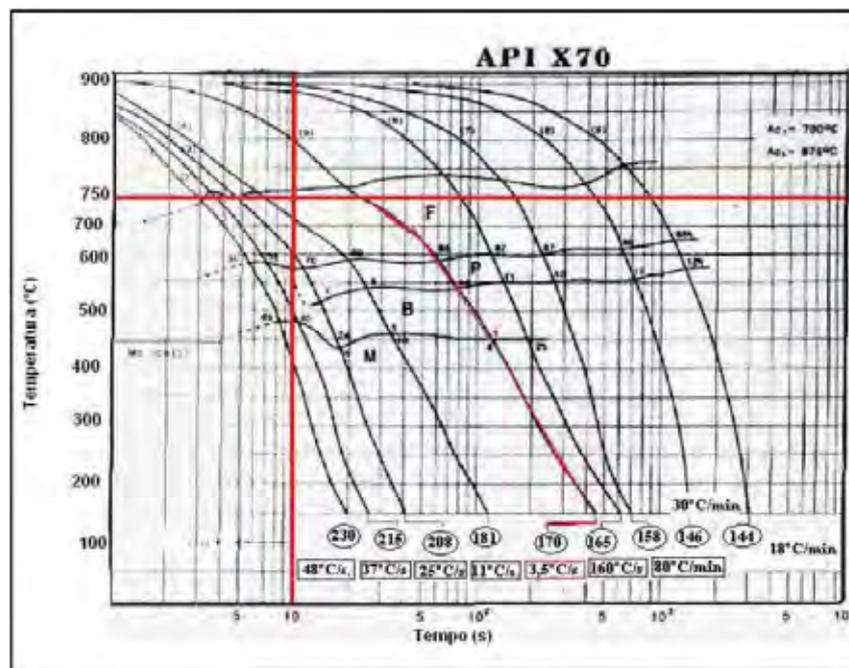


Figura 8.21: Gráfico de tratamento térmico do material (temperatura por tempo)(SPIVAKOV *et al.*, 2010).

8.4 Ensaio de Dureza.

Após a micrografia do material foi feita a amostra foi para o laboratório de microdureza onde os dados de dureza foram retirados. A tabela a seguir possui os dados e a média da dureza do material. Foram tiradas quatro medições para não houvesse a medida de um lugar onde o grão fosse diferentes fases do aço.

Tabela 8.5 Dados do ensaio de dureza.

| Dureza | HV | HRC |
|--------|-------|------|
| 1 | 212,6 | 13,9 |
| 2 | 211,8 | 13,7 |
| 3 | 209,4 | 13,2 |
| 4 | 212,6 | 13,9 |
| Média | 212,2 | 13,8 |

Através da tabela é possível analisar que a dureza do material não varia muito de ponto para ponto medidos na amostra. Analisando a média das medidas junto com a escala de dureza da figura 8.21 pode-se dizer que o material é um aço de fácil usinagem, mostrando que é um material que possui baixa dureza.

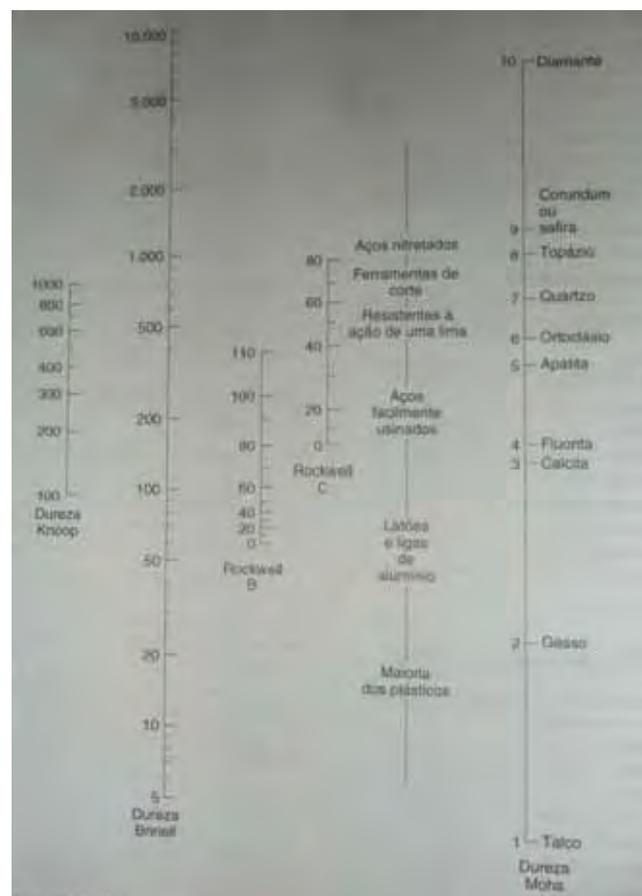


Figura 8.22: Escala de dureza (Callister,2002)

9. CONCLUSÕES

Com aço API 5L X70 pode ser estudada a suas propriedades mecânicas, e também analisar se o material fornecido estava dentro da norma API 5L. Após a realização dos ensaios foi possível concluir que o material estava dentro da

norma API 5L através das tensões de escoamento que de acordo com a norma elas devem estar entre 485MPa e 635MPa, as tensões ficaram entre 500MPa e 600MPa, dentro do esperado.

Com o ensaio Charpy foi possível analisar a tenacidade do material em diferentes temperaturas e assim podendo concluir que o material é muito tenaz, o corpo de prova do ensaio só rompeu por completo em temperaturas abaixo de -170°C, em temperatura entre 0°C e -80°C o corpo de prova não rompeu e a energia absorvida pelo corpo de prova foi da energia máxima que o equipamento alcançava durante os ensaios. O gráfico de transição dúctil – frágil não foi realizado, pois como somente a uma temperatura o corpo de prova rompeu por inteiro e nas demais a energia absorvida era a máxima do equipamento. Para que seja feito o gráfico é recomendado um equipamento que possua sua maior energia de impacto, assim o gráfico gerado pode ser confiável.

As análises comprovaram que o aço microligado API 5L X70 é um aço bem tenaz mesmo em baixas temperaturas, que também possui uma dureza não muito grande, é um aço fácil de ser usinado. Assim mostrando que ele possui as propriedades do material que são necessárias para a produção de tubulações para petróleo e gás e para a aplicação dessas tubulações em linhas dutoviárias sem que ocorra risco de desastres por conta da temperatura de trabalho.

10. REFERÊNCIAS

ALMEIDA, J. P. **Análise de Falha e Risco Associados aos Dutos de Gás Natural à Alta Pressão**. Projeto de Graduação – Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. Departamento de Engenharia Mecânica, 2008.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **Specification for Line Pipe**. ANSI/API Specification 5L, 44º Ed., Outubro, 2007.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E23** – Setembro de 2007.

CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 5 ed. LTC, 2008.

COLPAERT, H. **Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns**. 4 ed. LTC, 2008.

DIRAMI, V. http://lounge.obviousmag.org/vitor_dirami/2012/03/titanic-100-anos-depois.html, 2012.

FERNANDES, P. E. **A Avaliação da Tenacidade à Fratura da Zona Afetada pelo Calor (ZAC) do Aço API 5L X80 Soldado pelos Processos SMAW e FCAW**. Dissertações (Doutorado)- Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica, 2011.

HIPPERT, E. J. **Investigação Experimental do Comportamento Dúctil de Aços API-X70 e Aplicação de Curvas de Resistência J- Δ a para Previsão de Colapso em Dutos**. Dissertações (Doutorado)- Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica, 2004.

<http://50.16.209.131/content/ABAAABv0wAL/ensaio-impacto>

<http://www.fem.unicamp.br/~sergio1/laboratorio/cbecimat2002-1.pdf>

<http://www.ebah.com.br/content/ABAAABsFMAI/acos-microligados>

<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAULIAL/ensaio-tracao>

<http://amigonerd.net/trabalho/41391-ensaios-de-tracao-dureza-e>

<http://www.ebah.com.br/content/ABAAABXT4AH/relatorio-resistencia-dos-materiais-ensaio-impacto>

IG.

<http://ultimosegundo.ig.com.br/mundo/explosao+de+duto+no+mexico+deixa+27+mortos/n1237884560582.html.2010>

NASCIMENTO, M. P.; VOORWALD. **Avaliação da Tenacidade em Tubos de Aço ARBL API-X70 e X80 Soldado pelo Processo HF/ERW.** Projeto Científico Pós-Doutoramento Cnpq. Faculdade de Engenharia do Campus Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista.

SILVA, M. C. **Caracterização das Propriedades Mecânicas e Metalúrgicas do Aço API 5L X80 e Determinação Experimental de Curvas J-R para a Avaliação da Tenacidade a Fratura.** Dissertações (Mestrado)- Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica, 2004.

SPIVAKOV, V. I. et al. Kinetics of austenite transformation and bainite structure formation during strain-heat hardening of low-perlite steel X70 (X65) (API 5L Gr X-60, API 5L Gr X-70) plates for gas pipelines. © **Metallurgical and Mining Industry**, 2010, Vol. 2, N°1, p. 39-42.

ANEXO I

As tabelas mostram as resistências de cada tipo de aço API 5L e a composição de cada um.

Table 7 — Requirements for the results of tensile tests for PSL 2 pipe

| Pipe grade | Pipe body of seamless and welded pipes | | | | | | Weld seam of HFW, SAW and COW pipes |
|--|--|---|-------------------------------|--------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------------------|
| | Yield strength ^a | | Tensile strength ^a | | Ratio ^{a,b,c} | Elongation ^d | Tensile strength ^d |
| | $R_{0.2}^b$ MPa (psi) | | R_m MPa (psi) | | $R_{0.2}/R_m$ | A_1 % | R_m MPa (psi) |
| | minimum | maximum | minimum | maximum | maximum | minimum | minimum |
| L245R or BR L245N or BN L245O or BO L245M or BM | 245 (35 500) | 450 ^e (65 300) ^e | 415 (60 200) | 760 (110 200) | 0,93 | f | 415 (60 200) |
| L280R or X42R L280N or X42N L280O or X42O L280M or X42M | 290 (42 100) | 495 (71 800) | 415 (60 200) | 760 (110 200) | 0,93 | f | 415 (60 200) |
| L320N or X46N L320O or X46O L320M or X46M | 320 (46 400) | 525 (76 100) | 435 (63 100) | 760 (110 200) | 0,93 | f | 435 (63 100) |
| L360N or X52N L360O or X52O L360M or X52M | 360 (52 200) | 530 (76 900) | 460 (66 700) | 760 (110 200) | 0,93 | f | 460 (66 700) |
| L390N or X56N L390O or X56O L390M or X56M | 390 (56 600) | 545 (79 000) | 490 (71 100) | 760 (110 200) | 0,93 | f | 490 (71 100) |
| L415N or X60N L415O or X60O L415M or X60M | 415 (60 200) | 565 (81 900) | 520 (75 400) | 760 (110 200) | 0,93 | f | 520 (75 400) |
| L450O or X65O L450M or X65M | 460 (66 300) | 600 (87 000) | 535 (77 800) | 760 (110 200) | 0,93 | f | 535 (77 800) |
| L485O or X70O L485M or X70M | 485 (70 300) | 635 (92 100) | 570 (82 700) | 760 (110 200) | 0,93 | f | 570 (82 700) |
| L555O or X80O L555M or X80M | 555 (80 500) | 705 (102 300) | 625 (90 800) | 825 (119 700) | 0,93 | f | 625 (90 800) |
| L625M or X90M | 625 (90 800) | 775 (112 400) | 695 (100 800) | 915 (132 700) | 0,95 | f | 695 (100 800) |
| L690M or X100M | 690 (100 100) | 840 (121 800) | 760 (110 200) | 990 (143 800) | 0,97 ^g | f | 760 (110 200) |
| L830M or X120M | 830 (120 400) | 1 050 (152 300) | 915 (132 700) | 1 145 (166 100) | 0,99 ^g | f | 915 (132 700) |

a For intermediate grades, the difference between the specified maximum yield strength and the specified minimum yield strength shall be as given in the table for the next higher grade, and the difference between the specified minimum tensile strength and the specified minimum yield strength shall be as given in the table for the next higher grade. For intermediate grades lower than Grade L555 or X80, the tensile strength shall be ≤ 760 MPa (110 200 psi). For intermediate grades higher than Grade L555 or X80, the maximum permissible tensile strength shall be obtained by interpolation. For SI units, the calculated value shall be rounded to the nearest 5 MPa. For USC units, the calculated value shall be rounded to the nearest 100 psi.

b For grades > L625 or X90, $R_{p0,2}$ applies.

c This limit applies for pipe with $D > 323,9$ mm (12.750 in).

d For intermediate grades, the specified minimum tensile strength for the weld seam shall be the same value as was determined for the pipe body using footnote a).

e For pipe with $D < 219,1$ mm (8.625 in), the maximum yield strength shall be ≤ 495 MPa (71 800 psi).

f The specified minimum elongation, A_f , shall be as determined using the following equation:

$$A_f = C \frac{A_{xc}^{0,2}}{U^{0,9}}$$

where

C is 1 940 for calculations using SI units and 625 000 for calculations using USC units;

A_{xc} is the applicable tensile test piece cross-sectional area, expressed in square millimetres (square inches), as follows:

- for circular cross-section test pieces, 130 mm² (0.20 in²) for 12,5 mm (0.500 in) and 8,9 mm (0.350 in) diameter test pieces; and 65 mm² (0.10 in²) for 6,4 mm (0.250 in) diameter test pieces;
- for full-section test pieces, the lesser of a) 485 mm² (0.75 in²) and b) the cross-sectional area of the test piece, derived using the specified outside diameter and the specified wall thickness of the pipe, rounded to the nearest 10 mm² (0.01 in²);
- for strip test pieces, the lesser of a) 485 mm² (0.75 in²) and b) the cross-sectional area of the test piece, derived using the specified width of the test piece and the specified wall thickness of the pipe, rounded to the nearest 10 mm² (0.01 in²);

U is the specified minimum tensile strength, expressed in megapascals (pounds per square inch).

g Lower $R_{10,5}/R_m$ ratio values may be specified by agreement for L690 or X100 and L830 or X120 pipe.

Figura Anexo.1 Tabela de Resultados Aceitáveis do Ensaio de Tração (API 5L -2008)

Table 5 — Chemical composition for PSL 2 pipe with $t \leq 25.0$ mm (0.984 in)

| Steel grade (Steel name) | Mass fraction, based upon heat and product analyses % maximum | | | | | | | | | Carbon equivalent ^a % maximum | |
|----------------------------------|--|-------------------|-------------------|-------|-------|-------------------|-------------------|-------------------|-------|--|-------------------|
| | C ^b | Si | Mn ^b | P | S | V | Nb | Ti | Other | CE _{IIW} | CE _{PCM} |
| Seamless and welded pipes | | | | | | | | | | | |
| L245R or BR | 0,24 | 0,40 | 1,20 | 0,025 | 0,015 | c | e | 0,04 | e | 0,43 | 0,25 |
| L290R or X42R | 0,24 | 0,40 | 1,20 | 0,025 | 0,015 | 0,06 | 0,05 | 0,04 | e | 0,43 | 0,25 |
| L245N or BN | 0,24 | 0,40 | 1,20 | 0,025 | 0,015 | c | e | 0,04 | e | 0,43 | 0,25 |
| L280N or X42N | 0,24 | 0,40 | 1,20 | 0,025 | 0,015 | 0,06 | 0,05 | 0,04 | e | 0,43 | 0,25 |
| L320N or X46N | 0,24 | 0,40 | 1,40 | 0,025 | 0,015 | 0,07 | 0,05 | 0,04 | d,e | 0,43 | 0,25 |
| L360N or X52N | 0,24 | 0,45 | 1,40 | 0,025 | 0,015 | 0,10 | 0,05 | 0,04 | d,e | 0,43 | 0,25 |
| L390N or X56N | 0,24 | 0,45 | 1,40 | 0,025 | 0,015 | 0,10 ^f | 0,05 | 0,04 | d,e | 0,43 | 0,25 |
| L415N or X60N | 0,24 ^f | 0,45 ^f | 1,40 ^f | 0,025 | 0,015 | 0,10 ^f | 0,05 ^f | 0,04 ^f | g,h | as agreed | |
| L245Q or BQ | 0,18 | 0,45 | 1,40 | 0,025 | 0,015 | 0,05 | 0,05 | 0,04 | e | 0,43 | 0,25 |
| L290Q or X42Q | 0,18 | 0,45 | 1,40 | 0,025 | 0,015 | 0,05 | 0,05 | 0,04 | e | 0,43 | 0,25 |
| L320Q or X46Q | 0,18 | 0,45 | 1,40 | 0,025 | 0,015 | 0,05 | 0,05 | 0,04 | e | 0,43 | 0,25 |
| L360Q or X52Q | 0,18 | 0,45 | 1,50 | 0,025 | 0,015 | 0,05 | 0,05 | 0,04 | e | 0,43 | 0,25 |
| L390Q or X56Q | 0,18 | 0,45 | 1,50 | 0,025 | 0,015 | 0,07 | 0,05 | 0,04 | d,e | 0,43 | 0,25 |
| L415Q or X60Q | 0,18 ^f | 0,45 ^f | 1,70 ^f | 0,025 | 0,015 | g | g | g | h | 0,43 | 0,25 |
| L450Q or X65Q | 0,18 ^f | 0,45 ^f | 1,70 ^f | 0,025 | 0,015 | g | g | g | h | 0,43 | 0,25 |
| L485Q or X70Q | 0,18 ^f | 0,45 ^f | 1,80 ^f | 0,025 | 0,015 | g | g | g | h | 0,43 | 0,25 |
| L555Q or X80Q | 0,18 ^f | 0,45 ^f | 1,90 ^f | 0,025 | 0,015 | g | g | g | ij | as agreed | |
| Welded pipe | | | | | | | | | | | |
| L245M or BM | 0,22 | 0,45 | 1,20 | 0,025 | 0,015 | 0,05 | 0,05 | 0,04 | e | 0,43 | 0,25 |
| L290M or X42M | 0,22 | 0,45 | 1,30 | 0,025 | 0,015 | 0,05 | 0,05 | 0,04 | e | 0,43 | 0,25 |
| L320M or X46M | 0,22 | 0,45 | 1,30 | 0,025 | 0,015 | 0,05 | 0,05 | 0,04 | e | 0,43 | 0,25 |
| L360M or X52M | 0,22 | 0,45 | 1,40 | 0,025 | 0,015 | d | d | d | e | 0,43 | 0,25 |
| L390M or X56M | 0,22 | 0,45 | 1,40 | 0,025 | 0,015 | d | d | d | e | 0,43 | 0,25 |
| L415M or X60M | 0,12 ^f | 0,45 ^f | 1,60 ^f | 0,025 | 0,015 | g | g | g | h | 0,43 | 0,25 |
| L450M or X65M | 0,12 ^f | 0,45 ^f | 1,60 ^f | 0,025 | 0,015 | g | g | g | h | 0,43 | 0,25 |
| L485M or X70M | 0,12 ^f | 0,45 ^f | 1,70 ^f | 0,025 | 0,015 | g | g | g | h | 0,43 | 0,25 |
| L555M or X80M | 0,12 ^f | 0,45 ^f | 1,85 ^f | 0,025 | 0,015 | g | g | g | i | 0,43 ^f | 0,25 |
| L625M or X90M | 0,10 | 0,55 ^f | 2,10 ^f | 0,020 | 0,010 | g | g | g | i | — | 0,25 |
| L690M or X100M | 0,10 | 0,55 ^f | 2,10 ^f | 0,020 | 0,010 | g | g | g | ij | | 0,25 |
| L830M or X120M | 0,10 | 0,55 ^f | 2,10 ^f | 0,020 | 0,010 | g | g | g | ij | | 0,25 |

Table 8 — CVN absorbed energy requirements for pipe body of PSL 2 pipe

| Specified outside diameter <i>D</i> mm (in) | Full-size CVN absorbed energy, minimum | | | | | | |
|---|---|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|
| | <i>K_V</i> J (ft-lbf) | | | | | | |
| | Grade | | | | | | |
| | ≤ L415 or X60 | > L415 or X60 ≤ L450 or X65 | > L450 or X65 ≤ L485 or X70 | > L485 or X70 ≤ L555 or X80 | > L555 or X80 ≤ L625 or X90 | > L625 or X90 ≤ L690 or X100 | > L690 or X100 ≤ L830 or X120 |
| ≤ 508 (20.000) | 27 (20) | 27 (20) | 27 (20) | 40 (30) | 40 (30) | 40 (30) | 40 (30) |
| > 508 (20.000) to ≤ 762 (30.000) | 27 (20) | 27 (20) | 27 (20) | 40 (30) | 40 (30) | 40 (30) | 40 (30) |
| > 762 (30.000) to ≤ 914 (36.000) | 40 (30) | 40 (30) | 40 (30) | 40 (30) | 40 (30) | 54 (40) | 54 (40) |
| > 914 (36.000) to ≤ 1 219 (48.000) | 40 (30) | 40 (30) | 40 (30) | 40 (30) | 40 (30) | 54 (40) | 68 (50) |
| > 1 219 (48.000) to ≤ 1 422 (56.000) | 40 (30) | 54 (40) | 54 (40) | 54 (40) | 54 (40) | 68 (50) | 81 (60) |
| > 1 422 (56.000) to ≤ 2 134 (84.000) | 40 (30) | 54 (40) | 68 (50) | 68 (50) | 81 (60) | 95 (70) | 108 (80) |

Figura Anexo.2 Tabela de Energia que o material deve absorver para ser aceito na norma API 5L (API 5L -2008)

| | |
|---|---|
| a | Based upon product analysis. For seamless pipe with $t > 20,0$ mm (0,787 in), the carbon equivalent limits shall be as agreed. The CE_{IIW} limits apply if the carbon mass fraction is greater than 0,12 % and the CE_{PCM} limits apply if the carbon mass fraction is less than or equal to 0,12 %. |
| b | For each reduction of 0,01 % below the specified maximum for carbon, an increase of 0,05 % above the specified maximum for manganese is permissible, up to a maximum of 1,65 % for grades \geq L245 or B, but \leq L360 or X52; up to a maximum of 1,75 % for grades $>$ L360 or X52, but $<$ L485 or X70, up to a maximum of 2,00 % for grades \geq L485 or X70, but \leq L555 or X80, and up to a maximum of 2,20 % for grades $>$ L555 or X80. |
| c | Unless otherwise agreed, the sum of the niobium and vanadium concentrations shall be \leq 0,06 %. |
| d | The sum of the niobium, vanadium and titanium concentrations shall be \leq 0,15 %. |
| e | Unless otherwise agreed, 0,50 % maximum for copper, 0,30 % maximum for nickel, 0,30 % maximum for chromium and 0,15 % maximum for molybdenum. |
| f | Unless otherwise agreed |
| g | Unless otherwise agreed, the sum of the niobium, vanadium and titanium concentrations shall be \leq 0,15 %. |
| h | Unless otherwise agreed, 0,50 % maximum for copper, 0,50 % maximum for nickel, 0,50 % maximum for chromium and 0,50 % maximum for molybdenum. |
| i | Unless otherwise agreed, 0,50 % maximum for copper, 1,00 % maximum for nickel, 0,50 % maximum for chromium and 0,50 % maximum for molybdenum. |
| l | 0,004 % maximum for boron. |

Figura Anexo.3 Tabela de Composição Química do Aço. (API 5L -2008)