



**UNESP**  
**Faculdade de Engenharia do Campus de**  
**Guaratinguetá**

**Guaratinguetá**  
**2012**

CHRISTYANE OLIVEIRA LEÃO ALMEIDA

AVALIAÇÃO DA TENACIDADE CHARPY-V DE UM TUBO DE AÇO  
API 5L X70 SOLDADO COM ARCO SUBMERSO

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

Orientador: Prof. Dr. Marcelino Pereira do Nascimento

Guaratinguetá  
2012


Almeida, Christyane Oliveira Leão  
A44 Avaliação da Tenacidade Charpy-V de um Tubo de Aço API 5L X70  
7a Soldado com Arco Submerso / Christyane Oliveira Leão Almeida -  
Guaratinguetá : [s.n], 2012.  
68 f : il.  
Bibliografia: f. 66-68

Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade  
Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2012.

Orientador: Prof. Dr. Marcelino Pereira do Nascimento

1. Aço 2. Juntas soldadas 3. Soldagem elétrica I. Título

CDU 669.14

**unesp**  UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

**“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”**

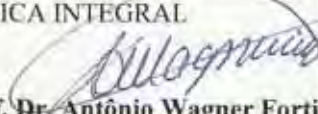
**CAMPUS DE GUARATINGUETÁ**

**AVALIAÇÃO DA TENACIDADE CHARPY-V DE UM TUBO DE AÇO  
API 5L X70 SOLDADO COM ARCO SUBMERSO**

**CHRISTYANE OLIVEIRA LEÃO ALMEIDA**

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

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

  
Prof. Dr. Antônio Wagner Forti

Coordenador

**BANCA EXAMINADORA:**

  
PROF. DR. MARCELINO PEREIRA DO NASCIMENTO

Orientador/ UNESP-FEG

  
PROF. DR. LUÍS HENRIQUE LOPES LIMA

UNESP-FEG

  
ENGENHEIRO VINICIUS SUASSUNA GONÇALVES DOS REIS

UNESP-FEG

Dezembro 2012

## **DADOS CURRICULARES**

**CHRISTYANE OLIVEIRA LEÃO ALMEIDA**

NASCIMENTO	13.11.1985 – JACAREÍ / SP
FILIAÇÃO	Albertino dos Santos Almeida Girlene Oliveira Leão Almeida
2008/2012	Curso de Graduação UNESP – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”.

*“Chegar a um denominador comum*

*Dá as coordenadas*

*Aparar as arestas*

*Sair pela tangente*

*Ver de outro ângulo*

*Retidão de caráter*

*O xis da questão*

*O círculo íntimo*

*A esfera do poder*

*Possibilidades infinitas*

*Perdas incalculáveis*

*Numa fração de segundos*

*No meio do caminho*

*Encontramos: semelhança,*

*equivalência, estrutura,*

*função, categoria.”*

**Nilton José Machado**

*"Descobri como é bom chegar quando se tem paciência.*

*E para se chegar, onde quer que seja,*

*aprendi que não é preciso dominar a força, mas a razão."*

**Amyr Klink**

## AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família e ao Luís Henrique Lopes Lima por me apoiar sempre em minhas decisões, bem como estar sempre ao meu lado, ajudando e apoiando em todos os momentos da minha vida, transformando meu sonho em realidade. Agradeço principalmente a Deus, por motivar-me todos os dias ao longo da minha jornada;

ao meu orientador, Prof. Dr. Marcelino Pereira do Nascimento, que desde o meu primeiro contato, transformou-se em um grande amigo, concedeu-me sábios conselhos e incentivou-me de maneira incondicional durante a minha formação profissional, possibilitando que eu me aprofundasse melhor no que eu amo estudar;

à dona Josete Oliveira Leão do Prado e família, por me dar força e superar as dificuldades ao longo da minha vida;

à dona Genilza Oliveira Leão, que com seu amor sempre me deu força e serenidade para enfrentar as dificuldades;

à Gilyane Oliveira Leão Almeida, exemplo a ser seguido, cativadora, batalhadora, sempre prestativa;

à Dayane Oliveira Leão Almeida, ao me incentivar a sempre estar lutando, filha de consideração;

aos colaboradores da Universidade Estadual Paulista do Campus de Guaratinguetá, pela dedicação, presteza, disponibilização dos laboratórios para os ensaios mecânicos, empréstimos de livros e principalmente pela disposição de ajudar.

à empresa Confab Industrial S.A., do Grupo Tenaris, pela atuação como empresa colaboradora e responsável pelo fornecimento de material para a realização bem sucedida dessa pesquisa;

à Rafael Sfair por contribuir com sua sabedoria e incentivo;

ao Wilson Roberto Monteiro, técnico da Unesp de Guaratinguetá, que além de um excelente técnico é um grande amigo.

ALMEIDA, C. O. L. **Avaliação da tenacidade Charpy-V de um tubo de aço API 5L X70 soldado com arco submerso.** 2012. Trabalho de Conclusão de Curso – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012.

## RESUMO

Este projeto de pesquisa focalizou primariamente a avaliação da tenacidade ao impacto da junta soldada e do material-base de um tubo de aço API 5L X70 soldado com arco submerso, utilizado na condução remota de petróleo e gás (linhas dutoviárias). As análises obedeceram estritamente às recomendações da norma API 5L (*Specification for Linepipe*), no que tange às regiões de retirada dos corpos de prova, a 90° e 180° a partir da junta soldada do tubo, e às propriedades mecânicas e de tenacidade Charpy-V. Os corpos de prova do tubo de aço fornecido pela Tenaris-Confab S.A. foram dimensionados para ensaios de tração e de impacto Charpy-V, conforme as normas ASTM E 8M e ASTM E 23, respectivamente. Constou-se que o aço API X70 possui elevado valor de tenacidade Charpy-V, os quais foram próximos tanto a 90° quanto a 180°, porém maiores que os valores de tenacidade do metal de solda. Análises microestruturais e de microdureza complementaram o estudo proposto.

**PALAVRAS-CHAVE:** Ensaio Charpy. Ensaio de Impacto. Tubo de aço API 5L X70. Juntas soldadas. Solda com arco submerso.



ALMEIDA, C. O. L. **Evaluation of Charpy-V toughness of a steel pipe API 5L X70 submerged arc welded.** 2012. Trabalho de Conclusão de Curso – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012.

### **ABSTRACT**

This research project focused primarily on assessing the impact toughness of the weld and the base material of a steel pipe API 5L X70 submerged arc welded, used to conduct remote oil and gas (linepipes). The analysis followed strictly the Specification for Line Pipe - API 5L Standard, regarding the removal of the specimens of regions-of-proof-long section of the pipe, at 90° and 180° from the welded joint, and mechanical properties of toughness and Charpy-V, both the joint welded as the base material. Specimens of steel tube supplied by Tenaris Confab-SA were sized for tensile and Charpy-V, according to ASTM E 8M and ASTM E23, respectively. The result obtained showed that the API X70 steel tube has high Charpy-V toughness, near to each other at both 90° and 180° from the welded joint of the tube, and both higher than the weld metal. Microstructural and microhardness analysis complemented the present study.

**KEYWORDS:** Charpy test. Impact test. Steel Pipe API 5L X70. Welded joints. Submerged arc welding.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - A descoberta da camada pré-sal (internet: FOLHA; acessado em Outubro de 2012).....	17
Figura 2 - SOLDAGEM POR ARCO SUBMERSO (internet: AMIGONERD; acessado em Outubro de 2012).....	21
Figura 3 - Ciclo térmico e transformação de fases esquemática para uma junta.....	21
Figura 4 - Evolução dos aços para a fabricação de tubos de grandes diâmetros (internet: Scribd; acessado em outubro de 2012).....	26
Figura 5 - Diagrama de Graville, soldabilidade dos aços ARBL em função do teor de carbono e do carbono equivalente (TORRICO, 2006).....	32
Figura 6 - Efeito do carbono equivalente na temperatura de pré-aquecimento requerida para evitar a fissuração a frio (Kou, 2002).....	32
Figura 7 - Esquema mostrando a sequência de deformação durante a laminação controlada (Shiga, 1981).....	34
Figura 8 - Evolução do tamanho de grão da austenita e da nucleação posterior de ferrita a partir dela de acordo com a evolução de temperatura aplicada durante o processo (internet: Gorni; acessado em outubro de 2012).....	34
Figura 9 - Influência dos principais elementos de liga nas propriedades do aço (internet: liga; acessado em outubro de 2012).....	35
Figura 10 - Diagrama isotérmico completo de um aço eutetóide (internet: ISOTÉRMICO; acessado em Dezembro de 2012).....	36
Figura 11 - Diagrama isotérmico com liga.....	37

Figura 12 – Tipos de ensaio de dureza, destacando as características de penetração (GARCIA, A.; SPIM J. A.; SANTOS C. A., 2000).....	41
Figura 13 - Ângulo das tangentes à esfera, para a relação $d/d = 0,375$ na dureza brinell (SOUZA,1982).....	42
Figura 14 – Equipamentos para o ensaio de tração (ARAÚJO,W.; FORTES, 2004).....	44
Figura 15 – Curva carga x alongamento (ARAÚJO,W.; FORTES, 2004).....	45
Figura 16 – Alongamento (Ribbeler, R. C.; Cozaciuc, I; Silva, L. R.;Togni, M. A., 2006).....	46
Figura 17 - Modelo dos tubos selecionados para a retirada dos corpos de prova para a caracterização micro estrutural e mecânica.....	49
Figura 18 – Planta da Tenaris-Confab de fabricação de tubos pelo processo UOE-SAW (GOMES, R. V. B., 2009).....	50
Figura 19 – EQUIPAMENTOS BÁSICO PARA CORTE OXI-ACETILENO (Ribbeler, R. C.; Cozaciuc, I; Silva, L. R.;Togni, M. A., 2006).....	51
Figura 20 – Corte oxi-acetileno realizado no laboratório da UNESP – Guaratinguetá.....	52
Figura 21 – Corte por serra automática realizado na UNESP de Guaratinguetá.....	53
Figura 22 – Corte por serra vertical e automática, respectivamente, realizado na UNESP de Guaratinguetá.....	53
Figura 23 – Corpo de prova utilizado para análise metalográfica.....	54
Figura 24 – Ampliação da Figura 23 com a identificação da solda, zona termicamente afetada e material base.....	54
Figura 25 – Análise da microdureza vickers para uma carga de 500 gramas.....	57

Figura 26 – Análise da micrografia dos grãos do aço API 5L (ampliação de 100x.....	58
Figura 27 – Localização do entalhe.....	59
Figura 28 – Localização do entalhe, do risco central do entalhe 27,5 mm para ambos os lados.....	59
Figura 29 - Dimensão dos corpos de prova conforme norma ASTM E 23.....	60
Figura 30 - Fotos das máquinas utilizadas para a) usinar e b) colocar trincas conforme norma ASTM E 23.....	60
Figura 31 - Materiais para auxiliar o ensaio Charpy – V foram: a) Pinça e b) isopor com termômetro. ....	60
Figura 32 – Máquina realizada o ensaio Charpy-V e especificação da mesma.....	61
Figura 33 – Algumas funções da máquina Charpy a) Trava de segurança b) Local onde os corpos de prova sofrem o impacto.....	61
Figura 34 - Resultados das Tabelas de 9 a 12 – Energia de Impacto (J) x Temperatura (°C).....	64
Figura 35 - Corpos de prova que não se romperam a) e os quais romperam apresentando características frágeis.....	64

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	- Grau dos aços API (internet: MAXWELL; acessado em Outubro de 2012).....	25
Tabela 2	- Diferenças básicas entre os níveis de especificação PSL1 e PSL2 (JUNIOR; 2004).....	27
Tabela 3	- Composição química e propriedades mecânicas de aços API 5L nível de especificação PSL1 (Junior; 2004).....	28
Tabela 4	- Composição química e propriedades mecânicas de aços API 5L nível de especificação PSL2 (JUNIOR; 2004).....	29
Tabela 5	- Composição química (% massa) do aço API 5L X70 nacional.....	48
Tabela 6	- Prévia quantificação dos corpos de prova de impacto Charpy-V e de tração.....	53
Tabela 7	Resultados dos ensaios de tração.....	55
Tabela 8	- Resultados da microdureza vickers conforme a localização ilustrado na Figura 32.....	57
Tabela 9	- Resultados do ensaio Charpy para o corpo de prova a 90o Transversal.....	62
Tabela 10	- Resultados do ensaio Charpy para o corpo de prova a 90° Longitudinal.....	62
Tabela 11	- Resultados do ensaio Charpy para o corpo de prova a 180° Transversal....	62
Tabela 12	- Resultados do ensaio Charpy para o corpo de prova na solda.....	63
Tabela 13	- Resultados do ensaio Charpy para 180° Longitudinal.....	63

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA .....	15
1.1	Objetivos .....	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
2.1	PROCESSOS DE SOLDAGEM DE ARCO SUBMERSO. ....	20
2.2	ESTUDO DA REGIÃO DA SOLDA .....	21
2.3	AÇOS DE ALTA RESISTÊNCIA E BAIXA LIGA (ARBL).....	23
2.3.1	Composição (ARBL).....	24
2.3.2	Tipos de Aço (ARBL).....	24
2.3.3	NORMA API 5L X70 .....	24
2.3.4	Carbono equivalente.....	30
2.4	PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DOS AÇOS ARBL .....	33
2.4.1	Laminação controlada .....	33
2.4.2	Influência dos elementos de liga .....	35
2.5	ENSAIO DE DUREZA.....	40
2.5.1	Técnica e vantagens do ensaio .....	42
2.5.2	Microdureza Vickers. ....	43
2.5.3	Informações Adicionais.....	43
2.6	ENSAIO DE TRAÇÃO .....	44
2.6.1	Limite de escoamento.....	45
2.6.2	Limite de resistência.....	45
2.6.3	Alongamento .....	46
2.7	ENSAIO DE IMPACTO (CHARPY) .....	47
3	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....	48
3.1	Material de estudo .....	48
3.2	Exequidade do trabalho proposto. ....	50

3.3	Corte Oxi-acetileno. ....	51
3.4	Operação de corte por serra.....	53
3.5	Quantificação dos corpos de prova. ....	53
3.6	Análise metalográfica no aço API 5L X70 .....	54
3.7	Ensaio mecânico de tração .....	55
3.8	Análise da microdureza Vickers.....	56
3.9	Ensaio mecânico de impacto Charpy-V. ....	58

## 1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

Após o anúncio da Petrobras, na noite de 28/02/2012, sobre a descoberta de uma nova acumulação de petróleo e gás na camada pré-sal, no Campo de Jubarte, na Bacia de Campos, a 195 quilômetros da costa fluminense, mudou o patamar das reservas petrolíferas do País. O pré-sal é conceituado como uma porção do subsolo que se encontra sob uma camada de sal situada alguns quilômetros abaixo do leito do mar, conforme mostra a Figura 1. Formada há 150 milhões de anos, a camada possui grandes reservatórios de óleo leve, que possui melhor qualidade e produz petróleo mais fino. A área que tem recebido destaque encontra-se no subsolo oceânico, têm extensão de 800 quilômetros do litoral brasileiro, estende-se do norte da Bacia de Campos ao sul da Bacia de Santos e desde o Alto Vitória (Espírito Santo) até o Alto de Florianópolis (Santa Catarina) e atinge até 200 quilômetros de largura (internet: FOLHA; acessado em Outubro de 2012).

Estima-se que lá estejam guardados cerca de 80 bilhões de barris de petróleo e gás, o que deixaria o Brasil na privilegiada posição de sexto maior detentor de reservas no mundo - atrás de Arábia Saudita, Irã, Iraque, Kuwait e Emirados Árabes (internet: ABRIL; acessado em Outubro de 2012).

Desde 2008, na perfuração de dois novos poços na camada do pré-sal no litoral do Espírito Santo, na área chamada de Parque das Baleias, na parte norte da bacia de Campos, com a descoberta do pré-sal no litoral brasileiro, as atividades petrolíferas no país estão se expandindo. Mas para transportar e escoar a produção é necessário ter a estrutura correta. Existem dois tipos de perfuração para transporte de petróleo e derivados, além de gás natural: são os chamados de *onshore* e *offshore*. A perfuração *onshore* é realizada em terra, enquanto que a perfuração *offshore* é realizada em alto mar. As tubulações *offshore* garantem segurança em plataformas de petróleo porque são mais resistentes ao desgaste das camadas internas e externas, com tempo de vida por volta de 50 anos, além de serem mais resistentes às chamas, esses tubos caracterizam-se pela baixa propagação de chamas e pela condução de carga elétrica.

A tubulação é composta por tubos, acessórios, flange e *liner*. Os tubos são fabricados com fios de fibra de vidro, assim como os acessórios. O flange é fabricado com fios contínuo de fibras de vidro embebidos com resina epóxi vinil éster. Já o *liner* é



fabricado com a mesma resina, porém compõe a camada interna, que é mantida em contato com o fluído.

A utilização crescente dos tubos *offshore*, implica uma série de normas e critérios para confecção e instalação das vias por onde escoam tais fontes de energia. Cada duto para o setor *offshore* é projetado não só conforme o tipo de produto que vai transportar, como também tem de estar adequado às condições de temperatura e pressão da operação, assim como o local onde vai ser instalado. **“O tipo de produto, por exemplo, determina a corrosividade a que a tubulação estará sendo submetida, o que pode determinar a utilização de materiais alternativos ou de revestimentos especiais”**, explica Marco Antonio Petkovic, gerente de Estudos e Acompanhamento da Transpetro (internet: REVISTA INTERMARKET; acessado em Outubro de 2012).

A concepção e instalação deste tipo de tubulação para o mercado *offshore*, porém, está longe de ser simples e rápido. Pode levar até três anos para ser construído, instalado e estar apto a receber o produto para o qual foi destinado. Tamanho dos dutos, número de frentes de trabalho e o terreno onde serão fixadas as tubulações, além das licenças ambientais para colocar tubos em pleno mar, fazem parte do processo. A questão ambiental é foco de atenções e preocupações. Afinal, estruturas tubulares vão invadir um espaço marítimo e podem interferir diretamente na vida marinha. Isso sem falar nos riscos de um possível vazamento. Por esta razão, um tubo *offshore* segue uma série de precauções para minimizar os riscos de vazamentos. Há desde monitoramento da corrosão e instalação de sondas para retirar amostras da parte interna das tubulações, até sensores de vazamentos em tempo real. A verificação do ambiente também serve de base para os projetos. As características do solo, assim como os movimentos das marés, são levados em consideração antes da colocação dos dutos e conexões. “Os esforços provocados pelo ambiente são determinantes no projeto de instalação e precisam ser muito bem avaliados”, ressalta Petkovic, da Transpetro (internet: REVISTA INTERMARKET; acessado em Outubro de 2012).

Com base nessa nova realidade foi escolhido o tema do trabalho de graduação, “Avaliação da tenacidade Charpy-V de um tubo de aço API 5L X70 soldado com arco submerso”. O grande interesse das indústrias de Petróleo e gás no uso de aços microligados de alta resistência para construção de linha duto viária de transmissão e

distribuição de petróleo e gás é uma 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, oferece potenciais benefícios em termos de maior pressão na linha sem aumento da espessura da parede, resultando em menor custo na fabricação dos tubos e no transporte do produto.

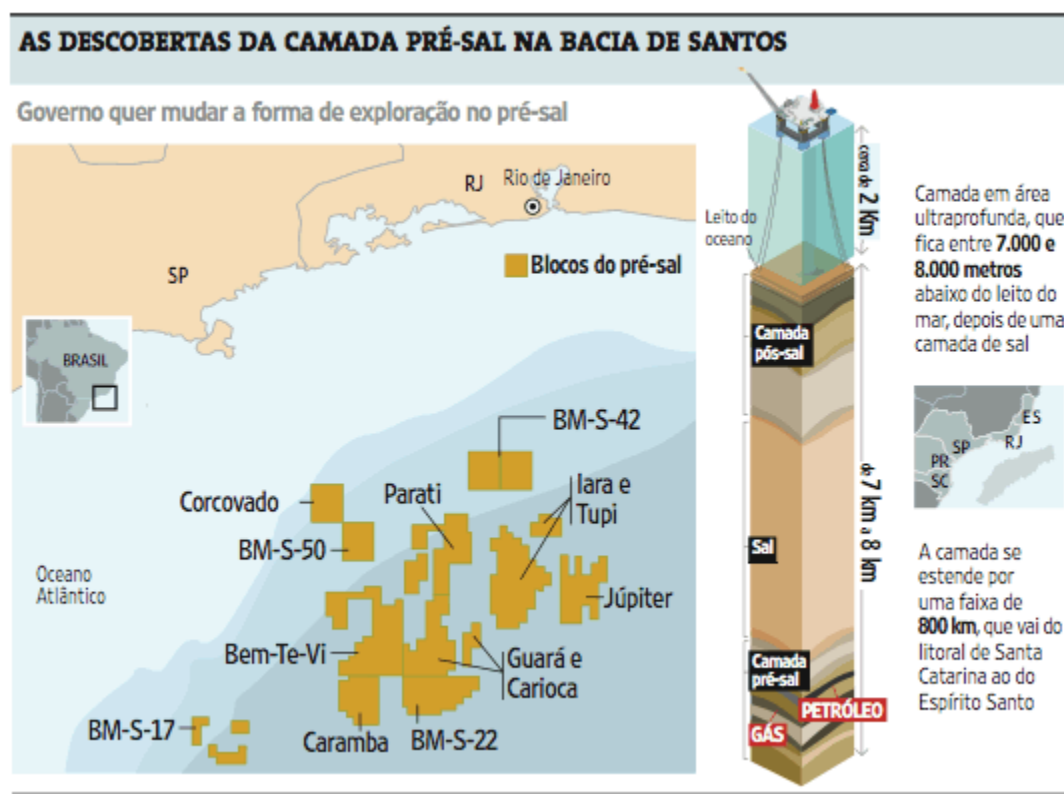


Figura 1 – A descoberta da camada pré-sal (internet: FOLHA; acessado em Outubro de 2012).

Diante do quadro energético mundial, para obter um crescimento econômico sustentável tornou-se imperativo a busca por fontes alternativas e diversificadas de energia, dentre as quais o gás natural tem-se destacado como um insumo viável e ambientalmente correto. Responsáveis por 75% do volume total do gás transportado no mundo no período 1994 - 1997, a construção de linhas duto viárias de longas distâncias tem-se estabelecido como a solução mais econômica e segura para o transporte de gás natural aos grandes centros consumidores. Neste contexto, linhas duto viárias de aços baixa-liga/alta-resistência (ARBL) em graus cada vez maiores estão sendo construídas, a fim de elevar-se cada vez mais a pressão operacional, melhorar a eficiência no transporte de óleo e gás natural e reduzir os custos de instalação. O aumento da

resistência mecânica do material permite a operação de linhas dutoviárias com pressões mais elevadas e sem a ocorrência de colapso plástico. Todavia, pressões elevadas geram um estado de tensões bastante severo sobre um defeito (trinca) potencialmente presente no material e cuja extensão estável pode levar à falha em tubos de espessura reduzida. O processo de fratura em qualquer estrutura é um evento indesejável e, embora seja raro em linhas dutoviárias, tal possibilidade se torna extremamente preocupante pelo fato de ela ser contínua, favorecendo a progressão do dano em uma grande área de acesso remoto ou próximo a comunidades, com consequências de grandes proporções, sejam ambientais, econômicas (perdas de rendimento/lucro às companhias duto viárias) e, principalmente, humanas (por exemplo, Vila Socó/Cubatão/SP – 1984 - 93 pessoas mortas). O *Office Pipeline Safety - OPS Form 7000-1* classifica as sete principais causas de acidentes em linhas duto viárias como decorrentes de:

- Corrosão;
- Falhas em juntas soldadas;
- Falhas nos tubos;
- Operações incorretas;
- Má função de equipamentos de controle;
- Danos por cargas externas (escavação, inundação, tremor de terra, clima, tempo, fadiga).

## 1.1 Objetivos

A partir da breve justificativa citada anteriormente, este projeto de pesquisa focaliza primariamente a avaliação da tenacidade ao impacto da junta soldada e do material-base de um tubo de aço API 5L X70 soldado com arco submerso, utilizado na condução remota de petróleo e gás (linhas dutoviárias). As análises obedeceram estritamente às recomendações da norma API 5L (*Specification for Linepipe*), no que tange as regiões de retirada dos corpos de prova ao longo da seção do tubo, e às propriedades mecânicas e de tenacidade Charpy-V, tanto da junta soldada quanto do material-base. O estudo compreendeu: i) operação de corte pelo processo oxi-acetilênico e por serra de fita do tubo de aço fornecido pela Tenaris-Confab S.A.; ii) dimensionamento dos corpos de prova de tração e de impacto Charpy-V, conforme as

normas ASTM E 8 M e ASTM E 23, respectivamente; iii) usinagem dos corpos de prova (torneamento, fresamento, eletro-erosão, retífica/acabamento); iv) preparação das amostras metalográficas; v) análise microestrutural em ambos os sentidos longitudinal e transversal do tubo de aço (para determinação do coeficiente de anisotropia), medição de microdureza HV e determinação dos respectivos tamanhos de grão; vi) verificação de ocorrência de segregação na linha central da placa laminada; vii) realização de ensaios de tração e levantamento da curva de transição com a temperatura de corpos de prova de impacto Charpy-V, bem como análise das superfícies de fratura (porcentagem dúctil-frágil) conforme recomendação das normas API 5L e ASTM E 23; viii) discussão dos resultados obtidos, com ênfase à análise da inter-relação entre a microestrutura e as propriedades mecânicas e de tenacidade Charpy-V e o atendimento às exigências das normas API e ASTM.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 PROCESSOS DE SOLDAGEM COM ARCO SUBMERSO.

A Soldagem por arco submerso (SAS), ou também conhecido em inglês como *Submerged arc welding (SAW)*, é um método em que o calor necessário para fundir o metal é produzido por um arco elétrico criado entre a peça de trabalho e a ponta do arame de soldagem. A ponta do arame de soldagem, o arco elétrico e a peça de trabalho são cobertos por uma camada de um material mineral granulado conhecido por fluxo para soldagem (daí o nome arco submerso), portanto não há arco visível, pois fica escondido, nem faíscas, respingos ou fumos comuns em outros processos. Parte do fluxo é fundida gerando uma capa protetora sobre a poça de fusão da solda (Figura 2). O restante não fundido é recolhido para a reutilização (internet: WIKIPEDIA; acessado em Outubro de 2012).

O consumível utilizado normalmente é o arame sólido, mas também são utilizados arames tubulares. A soldagem por arco submerso é geralmente realizada com equipamentos automáticos, embora existam pistolas de soldagem manuais para o processo. Para aumentar a produtividade, um arranjo com vários consumíveis pode ser introduzido. Devido à sua elevada taxa de deposição de metal, é um processo particularmente adequado para longas articulações retas de boa qualidade na posição vertical. É amplamente utilizado na fabricação de vasos de pressão, em plantas químicas, em estruturas pesadas, soldagem de tubos, em reparação e na indústria de construção naval. Duas razões fazem do arco submerso um processo de alto rendimento: praticamente não ocorrem perdas do arame de soldagem e a automatização do processo que possibilita utilizar altas correntes sem grandes riscos para a segurança do operador (internet: WIKIPEDIA; acessado em Outubro de 2012).

As vantagens de se utilizar soldagem por arco submerso é a elevada velocidade para soldar, além de o processo ser simples de manusear, o que possibilita ao operador maior segurança e melhor ambiente de trabalho, além de manter uma boa integridade do metal soldado.

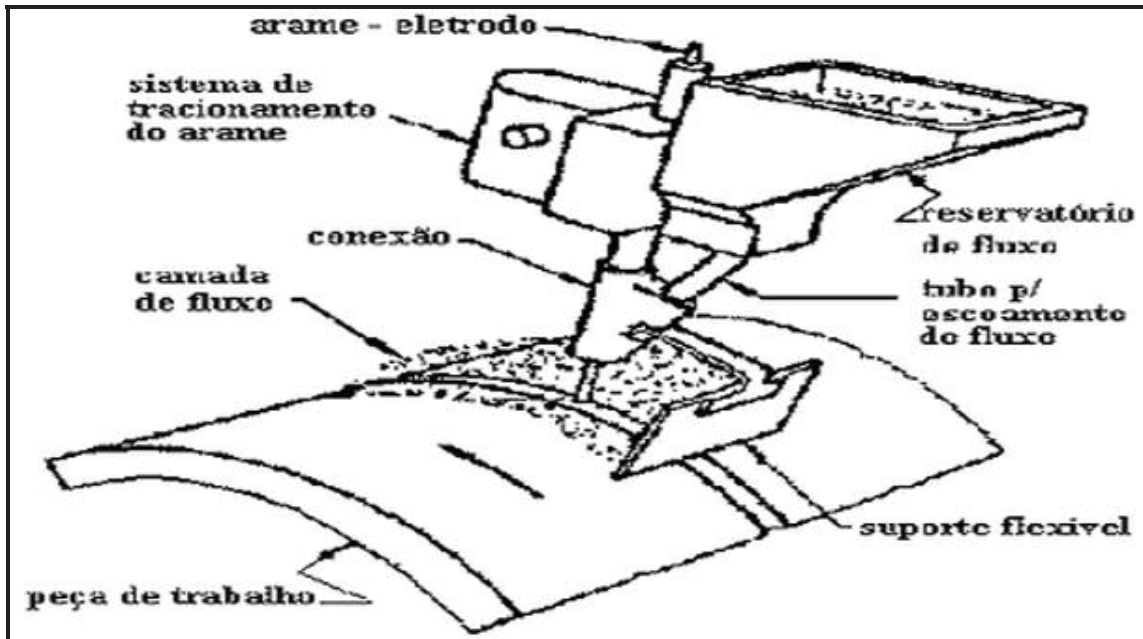


Figura 2 – Soldagem por Arco Submerso (internet: AMIGONERD; acessado em Outubro de 2012).

## 2.2 ESTUDO DA REGIÃO DA SOLDA

A Figura 3 mostra basicamente quatro regiões afetadas pelo calor numa soldagem monopasse, conforme descrição abaixo (Toyoda, 1989; Winsor, 1989; Nascimento, 2004):

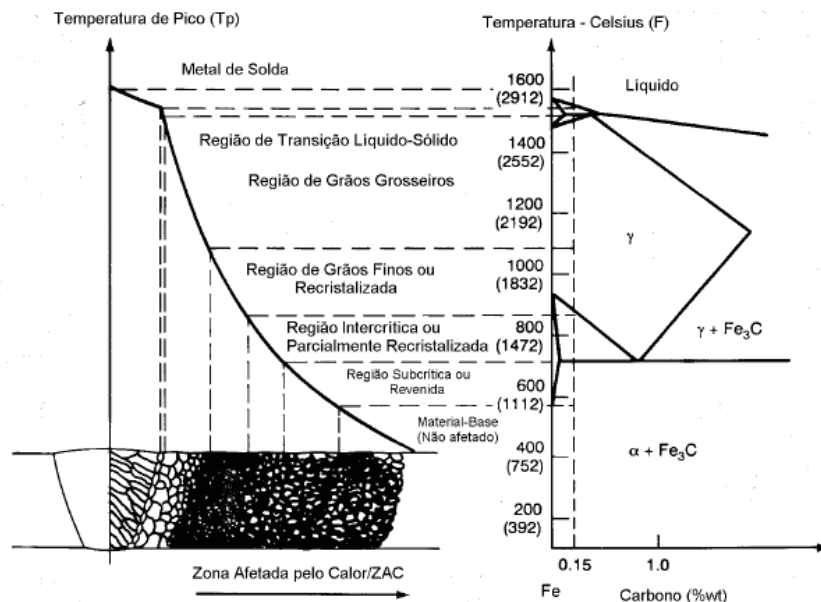


Figura 3 – Ciclo térmico e transformação de fases esquemática para uma junta (Toyoda, 1989; Winsor, 1989; Nascimento, 2004).

**Região de Crescimento de Grão ou Região de Grãos Grosseiros (RGG):** a região de grãos grosseiros está próxima à interface com o metal de solda. O crescimento de grão ocorre na faixa de temperaturas de 1100°C a 1500°C. O maior tamanho de grão austenítico favorece a temperabilidade do aço com conseqüente formação de martensita sob taxas de resfriamento típicas do processo de soldagem. A formação deste tipo de microestrutura diminui consideravelmente a tenacidade do material (Winsor, 1989).

**Região Recristalizada ou Região de Grãos Finos (RGF):** o material na região de grãos finos também está austenitizado, mas como a temperatura não é suficientemente elevada, o crescimento do tamanho de grão não é significativo. Nos aços estruturais, esta região pode ocorrer na faixa de temperaturas entre 1100°C e 900°C. A temperabilidade desta região é reduzida e, normalmente, apresenta boa resistência mecânica e ductilidade. Entretanto, se a taxa de resfriamento for suficientemente elevada ou se o teor de elementos de liga for favorável à transformação, será possível a formação de martensita (Winsor, 1989; Nascimento, 2004).

**Região Parcialmente Recristalizada ou Região Intercrítica (RIC):** na região intercrítica, que ocorre na faixa de temperaturas entre 900°C e 750°C, há apenas transformação parcial da austenita, onde a perlita é a microestrutura que predominantemente dá origem à austenita. A microestrutura resultante será refinada, entretanto, os teores de carbono dessa austenita são maiores que os valores nominais dos aços (devido a partição de carbono). Dependendo da velocidade de resfriamento, essa austenita pode decompor-se em perlita, bainita ou ilhas de martensita-austenita (MA). Essa região pode apresentar propriedades mecânicas piores que as do material base (Winsor, 1989; Nascimento, 2004).

**Região Subcrítica (RSC):** nesta região não ocorre nenhuma transformação austenítica, mas ainda assim o aço pode sofrer efeitos da temperatura. Em aços na condição de laminado a quente ou normalizado, as alterações microestruturais são pequenas e basicamente se resumem a uma pequena degeneração da perlita. Em aços temperados, há um revenimento da martensita previamente formada e conseqüentemente há uma redução da resistência mecânica desta região em relação ao metal base (Winsor, 1989; Nascimento, 2004).



A largura da ZTA e a extensão de cada região descrita anteriormente dependem diretamente da quantidade de calor gerada pelo procedimento de soldagem (aporte de calor). Aportes de calor elevados resultam em taxas de resfriamento mais lentas; conseqüentemente, o aporte de calor representa um fator determinante para a microestrutura final resultante (Winsor, 1989; Nascimento, 2004).

### **2.3 AÇOS DE ALTA RESISTÊNCIA E BAIXA LIGA (ARBL).**

Aços de alta resistência e baixa liga são muitas vezes referenciados como ARBL, BLAR (Baixa Liga e Alta Resistência), ou em inglês HSLA (*High Strength Low Alloy*). As vantagens de se utilizar estes tipos de aços são a maior resistência e tenacidade do que os aços carbonos convencionais, além de eles serem dúcteis, possuírem boa conformidade e soldabilidade.

A literatura oferece várias definições do que vem a ser um aço ARBL, no entanto nenhuma delas define de forma conclusiva o que vem a ser este aço. De um modo geral, são classificados como aços ARBL os aços resultantes de um processo de manufatura que incorpora na rota de produção destes aços a aplicação de conceitos como endurecimento por precipitação, refino de grão, adição de elementos microligantes associados a diferentes escalas de passes de temperaturas de laminação. Os aços ARBL foram desenvolvidos pela indústria do aço e atualmente atendem diversos setores industriais como o automobilístico e o de estruturas, devido ao seu elevado limite de resistência, boa tenacidade a baixas temperaturas, boa conformidade e boa soldabilidade, devido ao baixo carbono equivalente (internet: MAXWELL; acessado em Outubro de 2012).

Os aços ARBL possibilitam a redução nos custos de construção, devido a uma redução significativa na espessura da parede dos tubos, havendo um impacto considerável na quantidade de material utilizado, nos custos de transporte e de soldagem. Além disso, estes aços viabilizam a operação de dutos com pressões maiores do que aquelas utilizadas anteriormente, resultando em um maior volume de gás ou petróleo transportado (internet: MAXWELL; acessado em Outubro de 2012).



### **2.3.1 Composição (ARBL).**

A composição química de um aço ARBL pode variar, por exemplo: um aço típico possui normalmente menos que 0,15% de Carbono, 1,65 de Manganês e níveis baixos de 0,035% de Fósforo, enxofre, entre outros. O que é importante destacar é o baixo carbono, o qual possibilita uma melhor conformidade e soldabilidade. A resistência destes aços pode elevar-se ao adicionar pequenas quantidades de elemento de liga (internet: MAXWELL; acessado em Outubro de 2012).

### **2.3.2 Tipos de Aço (ARBL).**

A classificação dos aços de baixa liga e alta resistência é: aços de laminação controlada, os quais são laminados a quente para desenvolver uma estrutura austenítica altamente deformada transformando-se em uma estrutura ferrítica equiaxial de grãos finos no resfriamento; aços patináveis, possuem alta resistência à corrosão atmosférica; aços com ferrita acicular – possuem taxas de carbono bem menores e endurecibilidade que possibilitam uma estrutura ferrita muito fina e resistência no resfriamento; aços com perlita reduzida, possuem estrutura de grão finos de ferrita e endurecidos por precipitação, mas com baixa taxa de carbono, ou seja, pouca ou quase nula a presença de perlita na microestrutura; aços *dual phase* ou chamados de bifásicos, microestrutura de ferrita, com regiões pequenas de martensita de alto carbono com distribuição uniforme, conseqüentemente aço com baixo limite de escoamento e alta taxa de encruamento, assim alta resistência e conformidade; e por fim, o qual é de grande interesse para esse trabalho, aço microligado, que contém pequenas adições de elementos como nióbio, vanádio e/ou titânio para refinamento do tamanho de grão e/ou endurecimento por precipitação (internet: MAXWELL; acessado em Outubro de 2012).

### **2.3.3 NORMA API 5L X70**

A indústria de petróleo e gás utiliza tubos que são geralmente classificados conforme a norma API, em razão de sua aplicação e resistência mecânica (Tabela 1). Tubos com ou sem costura designados para linhas de transmissão são classificados

como API-5L, adequados para transporte de gás, água e óleo. Nestes, a composição química e a resistência mecânica variam desde a classificação API-5L-A25 até os modernos API-5L-X80, onde os dois últimos dígitos especificam os valores mínimos de limite de escoamento em unidade inglesa (ksi) (JUNIOR, 2004). Assim, no caso específico do aço deste estudo, X70, os valores mínimos da tensão de escoamento conforme a classificação API são 70 ksi ( $\approx 482$  MPa).

Tabela 1- Grau dos aços API (internet: MAXWELL; acessado em Outubro de 2012).

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

No início dos anos de 1970, o aço API 5L grau X70 foi introduzido pela primeira vez na Alemanha para a construção de dutos de transporte de gás. Isso foi possível com o desenvolvimento da prática de laminação controlada. Desde então, o grau X70 provou ser um material confiável para a implantação de vários projetos de dutos. O material foi melhorado conforme a técnica de laminação controlada foi sendo aprimorada, e pode ser soldado, sem problemas, com eletrodos celulósicos, com cuidado para evitar a formação de trincas induzidas para o hidrogênio (internet: MAXWELL; acessado em Outubro de 2012).

Seguindo esta experiência bem sucedida do aço X70 e com o desenvolvimento do processo de laminação controlada com resfriamento acelerado, o aço API 5L grau X80 entrou em uso pela primeira vez em 1985, com a construção de uma seção de 3,2 km de dutos feitos com este material. O processo de laminação controlada com resfriamento acelerado permitiu a produção de matérias com grau X80 microligados com nióbio e vanádio, com quantidade de carbono mais baixa e boa soldabilidade (internet: MAXWELL; acessado em Outubro de 2012).

Apesar de no mundo já existirem estudos avançados com dutos de grau X100 e até X120 (Figura 4), no Brasil, os dutos de maior resistência existente atualmente são fabricados com aço API 5L X70, cuja tecnologia já está bem desenvolvida e consolidada. Entretanto, para o aço API 5L X80, produzido por laminação controlada, ainda são necessários estudos a fim de consolidar a utilização desse material, principalmente no que se refere às questões de construção e montagem, como a soldagem (internet: MAXWELL; acessado em Outubro de 2012).

A composição química dos aços para tubos API pode ser variada para fornecer propriedades específicas. Teores máximos e mínimos para os elementos microligantes Mn, Co, V, Ti são descritos na especificação API 5L para os vários graus. Nem todos esses elementos estão presentes em todos os graus. Alguns deles são adicionados a certos graus de aços para dutos para proporcionar características específicas. Pode-se dizer que a quantidade de Mn requerida em tubos para dutos aumenta quanto maior for o grau do aço (internet: MAXWELL; acessado em Outubro de 2012).

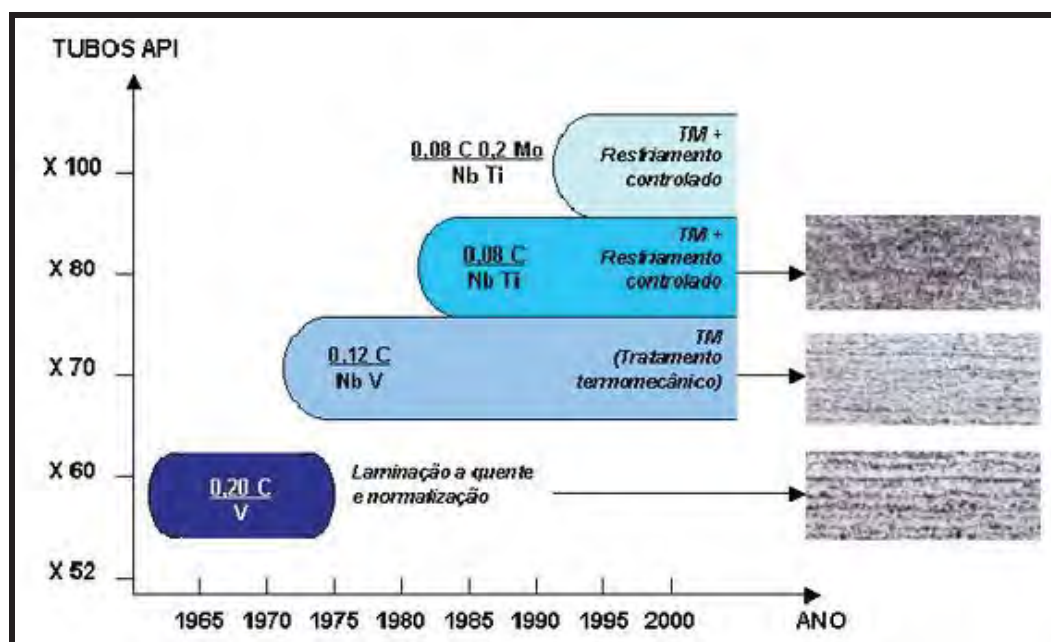


Figura 4 – Evolução dos aços para a fabricação de tubos de grandes diâmetros (internet: *Scribd*; acessado em outubro de 2012).

Na norma API-5L existem ainda dois níveis distintos de especificação de produtos (*product specification level*), identificados como PSL1 (de graus A25 a X70) e PSL2 (de graus B a X80). A diferença entre os mesmos é o rigor no detalhamento e nos

requisitos técnicos, assim, tubos na especificação PSL2 devem apresentar um controle mais estreito da composição química (em especial, enxofre e fósforo) e do carbono equivalente máximo do material, bem como valores mínimos definidos de tenacidade (Charpy) e máximos de tensão de escoamento e de resistência à tração (vide Tabela 2), comparativamente aos de nível PSL1 (JUNIOR, 2004). No caso dos aços X70 a norma API especifica 27J (perpendicular ao sentido de laminação) e 41J (paralelo ao sentido de laminação) como valores mínimos de energia absorvida em ensaios de impacto Charpy na temperatura de 0 °C.

Tabela 2 - Diferenças básicas entre os níveis de especificação PSL1 e PSL2 (JUNIOR, 2004).

Parâmetro	PSL1	PSL2
Grau	A25 até X70	B até X80
Tipo de extremidade do tubo	Rosca, bisel, topo, especial	Topo
Soldagem do cordão	Qualquer processo	Qualquer processo, exceto soldagem a laser
C.Q.: max %C para tubo sem costura	0,28% para grau B e superiores	0,24%
C.Q.: max %C para tubos com costura	0,26% para grau B e superiores	0,22%
C.Q.: max %P	0,030% para grau A e superiores	0,025%
C.Q.: max % S	0,030%	0,015%
Carbono equivalente	Sob exigência do cliente	Máximo para cada grau
L.E. Máximo	Não especificado	Máximo para cada grau
L.R. Máximo	Não especificado	Máximo para cada grau
Tenacidade à fratura	Não especificada	Exigida para todos os graus
Inspeção não-destrutiva do cordão de solda	Não obrigatória	Obrigatória
Reparo por soldagem do corpo do tubo, chapa ou <i>skelp</i>	Permitido	Não permitido
Rastreabilidade	Não obrigatória	Obrigatória

Tabela 3 - Composição química e propriedades mecânicas de aços API 5L nível de especificação PSL1 (JUNIOR, 2004).

Grau	C	Mn	P	S	Outros	L.E. (MPa)	L.R. (MPa)
	%max	%max	%max	%max		min	min
Tubos sem costura							
A25-I	0,21	0,60	0,030	0,030	-	172	310
A25-II	0,21	0,60	0,045-0,080	0,030	-		
A	0,22	0,90	0,030	0,030	-	207	331
B	0,28	1,20	0,030	0,030	Nb +V +Ti < 0,15%	241	414
X42	0,28	1,30	0,030	0,030		290	414
X46	0,28	1,40	0,030	0,030		317	434
X52	0,28	1,40	0,030	0,030		359	455
X56	0,28	1,40	0,030	0,030		386	490
X60	0,28	1,40	0,030	0,030		414	517
X65	0,28	1,40	0,030	0,030		448	531
X70	0,28	1,40	0,030	0,030		483	565
Tubos com costura							
A25-I	0,21	0,60	0,030	0,030	-	172	310
A25-II	0,21	0,60	0,045-0,080	0,030	-		
A	0,22	0,90	0,030	0,030	-	207	331
B	0,26	1,20	0,030	0,030	Nb +V +Ti < 0,15%	241	414
X42	0,26	1,30	0,030	0,030		290	414
X46	0,26	1,40	0,030	0,030		317	434
X52	0,26	1,40	0,030	0,030		359	455
X56	0,26	1,40	0,030	0,030		386	490
X60	0,26	1,40	0,030	0,030		414	517
X65	0,26	1,45	0,030	0,030		448	531
X70	0,26	1,65	0,030	0,030		483	565

As Tabelas 3 e 4 apresentam a composição química especificada para os vários graus de aços API em níveis PSL1 e PSL2, respectivamente, além dos requisitos mínimos de resistência mecânica. É possível observar que a composição química mínima exigida dos aços é bastante flexível e não considera a adição compulsória de elementos de liga. Apesar disso, microadições de elementos como Ti, Nb e V são permitidas desde que seu emprego seja acordado entre o fabricante do material e o usuário. Para os aços com níveis de resistência mais elevados (X60 até X80), a norma API permite mesmo que o fabricante não se detenha à composição química estipulada,



permitindo elaborar materiais com composições químicas distintas que apenas atinjam as metas de resistência mecânica prescritas para cada grau desejado (JUNIOR; 2004).

Tabela 4 - Composição química e propriedades mecânicas de aços API 5L nível de especificação PSL2 (JUNIOR; 2004).

Grau	C	Mn	P	S	Outros	L.E. (MPa)		L.R. (MPa)	
	%max	%max	%max	%max		min	max	min	max
Tubos sem costura									
B	0,24	1,20	0,025	0,015	Nb +V +Ti < 0,15%	241	448	414	758
X42	0,24	1,30	0,025	0,015		290	496	414	758
X46	0,24	1,40	0,025	0,015		317	524	434	758
X52	0,24	1,40	0,025	0,015		359	531	455	758
X56	0,24	1,40	0,025	0,015		386	544	490	758
X60	0,24	1,40	0,025	0,015		414	565	517	758
X65	0,24	1,40	0,025	0,015		448	600	531	758
X70	0,24	1,40	0,025	0,015		483	621	565	758
X80	0,24	1,40	0,025	0,015		552	690	621	827
Tubos com costura									
B	0,22	1,20	0,025	0,015	Nb +V +Ti < 0,15%	241	448	414	758
X42	0,22	1,30	0,025	0,015		290	496	414	758
X46	0,22	1,40	0,025	0,015		317	524	434	758
X52	0,22	1,40	0,025	0,015		359	531	455	758
X56	0,22	1,40	0,025	0,015		386	544	490	758
X60	0,22	1,40	0,025	0,015		414	565	517	758
X65	0,22	1,45	0,025	0,015		448	600	531	758
X70	0,22	1,65	0,025	0,015		483	621	565	758
X80	0,22	1,85	0,025	0,015		552	690	621	827

Quanto à especificação de resistência mecânica na Tabela 4 (nível PSL2), é interessante ressaltar a exigência do limite máximo especificado para as tensões limite de escoamento e limite de resistência, o que não é prática comum, por exemplo, em especificações de aços ASTM ou AISI. Para aços de tubulações, o objetivo de se definir

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

Ainda em relação aos intervalos definidos pelos limites de propriedades mecânicas, observa-se que há sobreposição entre as faixas de valores de L.E. e L.R. para vários graus. Para os graus de aços X65 e X70, por exemplo, valores de L.E. na faixa entre 531-600 MPa e L.R. na faixa de 565-758 MPa atendem à especificação de ambos. Isso significa que um material que apresentasse estas propriedades poderia ser enquadrado em graus diferentes (considerando que a diferença na composição química entre estes graus diferentes é muito pequena, ou mesmo inexistente). Esta característica dos tubos API é frequentemente utilizada por empresas fabricantes, de forma a minimizar a variedade de matérias primas para a confecção de tubos. Em última análise, um mesmo lote de chapas poderia ser utilizado para produzir tubos graus X65 ou X70, desde que suas propriedades mecânicas estejam contidas dentro do intervalo de sobreposição de L.E. e L.R. definidos na norma API (JUNIOR; 2004).

#### **2.3.4 Carbono equivalente**

O carbono equivalente é importante devido à soldabilidade e à formação de trincas induzidas pelo hidrogênio. A importância no mesmo pode ser observada através da integridade estrutural dos tubos de aços microligados.

A formação da trinca induzida por hidrogênio (HIC), também conhecida como fissuração pelo hidrogênio ou fissuração a frio, é consequência da ação simultânea de quatro fatores: o hidrogênio dissolvido no metal fundido; as tensões associadas à soldagem; à microestrutura frágil (formação de martensita e o constituinte M-A) e à baixa temperatura (abaixo de 150°C) (CUNHA, 1989).

Os aços microligados, como foi dito anteriormente, possuem uma maior temperabilidade, ou seja, maior tendência à formação de martensita. Os elementos que afetam de modo mais significativo no deslocamento das curvas TTT para direita, isto é, com menores velocidades de resfriamento pode-se atingir a estrutura martensítica, são: C, Mn, Ni, Cr, Cu, Mo e V, assim, é muito importante na tendência de formação da estrutura martensítica na zona afetada termicamente e, portanto, na tendência à fissuração pelo hidrogênio (CUNHA, 1989). O carbono equivalente com adição de alguns elementos de liga avalia a temperabilidade do material, ou ainda, sua capacidade de apresentar microestrutura martensítica no deslocamento da curva de transformação em resfriamento contínuo do material (TRC) (ou CCT no idioma inglês, significando: *Continuous Cooling Transformation*) à direita e, conseqüentemente, a sua facilidade ao trincamento a frio (CUNHA, 1989).

Como o processo usual de fabricação de tubos e da malha (oleodutos e gasodutos) é a soldagem, a necessidade de pré-aquecimento, a possibilidade de haver trincas provocadas pelo hidrogênio (trincas a frio) e a tenacidade à fratura irão depender da temperabilidade do aço e da junta soldada (SANT'ANNA, 2006).

Para tubos PSL2, com uma análise de produto por fração de massa de carbono igual ou inferior a 0,12%, segundo recomendações das normas API 5L, DNV-OS-F101 e IIW (*International Institute of Welding*), deve-se adotar a equação estabelecida por Y. Itto & K. Bessyo (Parâmetro de Trincamento Modificado -  $CE_{Pcm}$ ) para determinar o carbono equivalente. A determinação do  $CE_{Pcm}$  é dada pela seguinte equação:

$$CE_{Pcm} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B \quad (1)$$

Para tubos PSL2 com uma análise de produto por fração de massa de carbono maior que 0,12%, o carbono equivalente,  $CE_{IIW}$ , deve ser determinado através da equação estabelecida pelo Instituto Internacional de Soldagem (IIW):

$$CE_{IIW} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{(Cr+Mo+V)}{5} + \frac{(Ni+Cu)}{15} \quad (2)$$



Um dos métodos de se analisar a soldabilidade dos aços API é através do diagrama de Graville, Figura 5; esse diagrama foi desenvolvido por Graville, B. A. em 1978 com o intuito de associar a qualidade do processo de soldagem ao carbono equivalente (TORRICO, 2006).

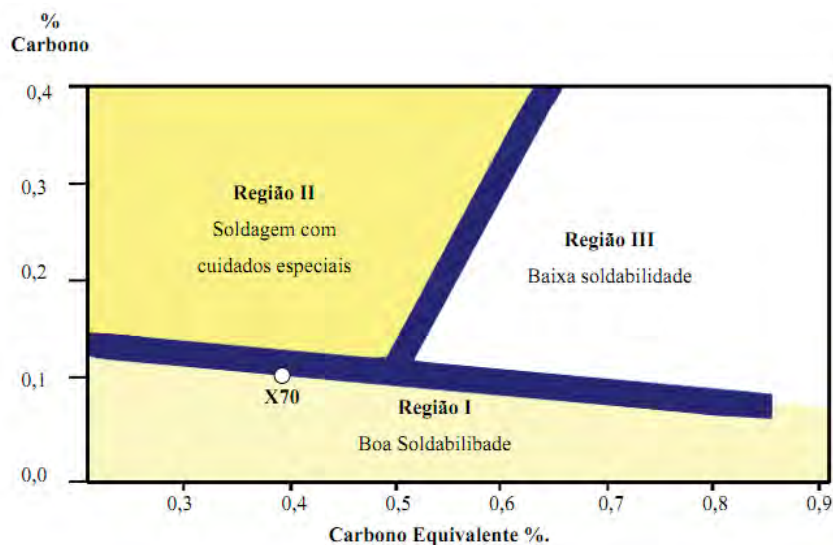


Figura 5 – Diagrama de Graville, soldabilidade dos aços ARBL em função do teor de carbono e do carbono equivalente (TORRICO, 2006).

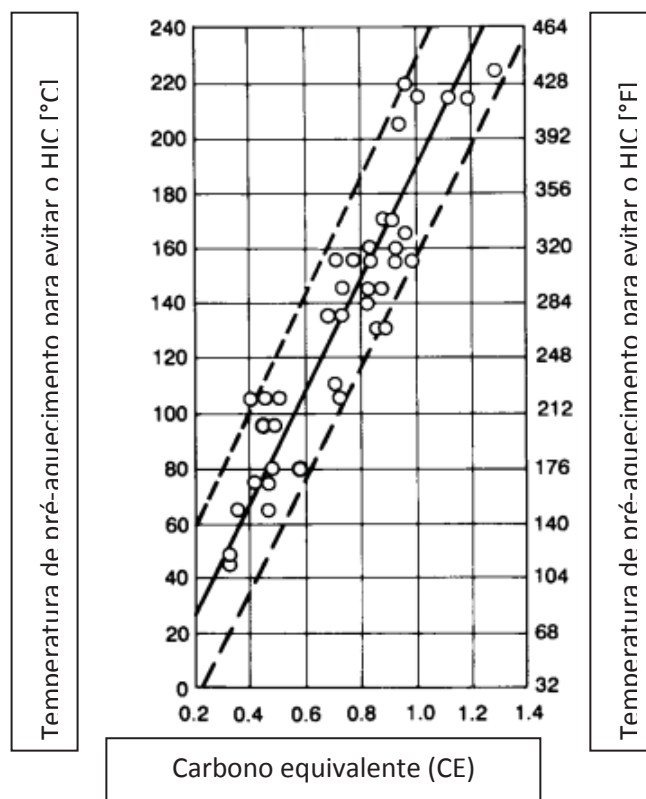


Figura 6 – Efeito do carbono equivalente na temperatura de pré-aquecimento requerida para evitar a fissuração a frio (Kou, 2002).

Conforme a Figura 6, conclui-se que quanto maior o carbono equivalente (CE), maior a temperatura de pré-aquecimento requerida para prevenir a trinca induzida por hidrogênio (HIC).

## **2.4 PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DOS AÇOS ARBL**

### **2.4.1 Laminação controlada**

Nos anos de 1970 o processo de laminação a quente seguida de tratamento térmico de normalização foi substituído pelo processo termomecânico de laminação controlada, o que possibilitou a produção de aços de grau até X70 a partir de aços microligados com nióbio (Nb) e vanádio (V) e de reduzido conteúdo de carbono (C) (NAKASUKI, 1973).

A laminação controlada é um procedimento pelo qual os vários estágios de laminação têm temperatura controlada, quantidade de redução pré-determinada em cada passe e temperatura de acabamento precisamente definida. Este processamento é largamente utilizado para obtenção de aços destinados a dutos, pontes, estruturas *offshore* e outras aplicações de engenharia. 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. Isto resulta em um aumento (simultâneo) de resistência mecânica e tenacidade e tem possibilitado a redução da quantidade de carbono nos aços ARBL, melhorando a soldabilidade destes aços (internet: LAMINAÇÃO; acessado em Outubro de 2012).

O processo de laminação controlada é composto, basicamente, por dois estágios: o primeiro estágio, desbaste, é comumente realizado em temperaturas relativamente elevadas, entre 950°C e 1100°C, e seu principal objetivo é o refino de grão através da completa recristalização da austenita depois de cada passe de laminação. No segundo estágio, acabamento, explora-se o efeito dos elementos de liga em estabilizar a austenita e retardar sua recristalização estática em temperaturas inferiores a 900°C. Com o teor de nióbio inferior a 0,05%, nenhuma recristalização deve ocorrer no intervalo entre passes, de forma que os grãos de austenita são progressivamente deformados durante a laminação, consumindo apenas parte de sua energia armazenada de deformação através

da recuperação (Figura 7). Ao final do processo, obtêm-se grãos de austenita muito deformados e alongados (*pancake*), que resultam em grãos finos de ferrita (na ordem de 3 a 6 $\mu$ m) após a transformação  $\gamma$ - $\alpha$ , conforme mostrado no Figura 8 (internet: LAMINAÇÃO; acessado em Outubro de 2012).

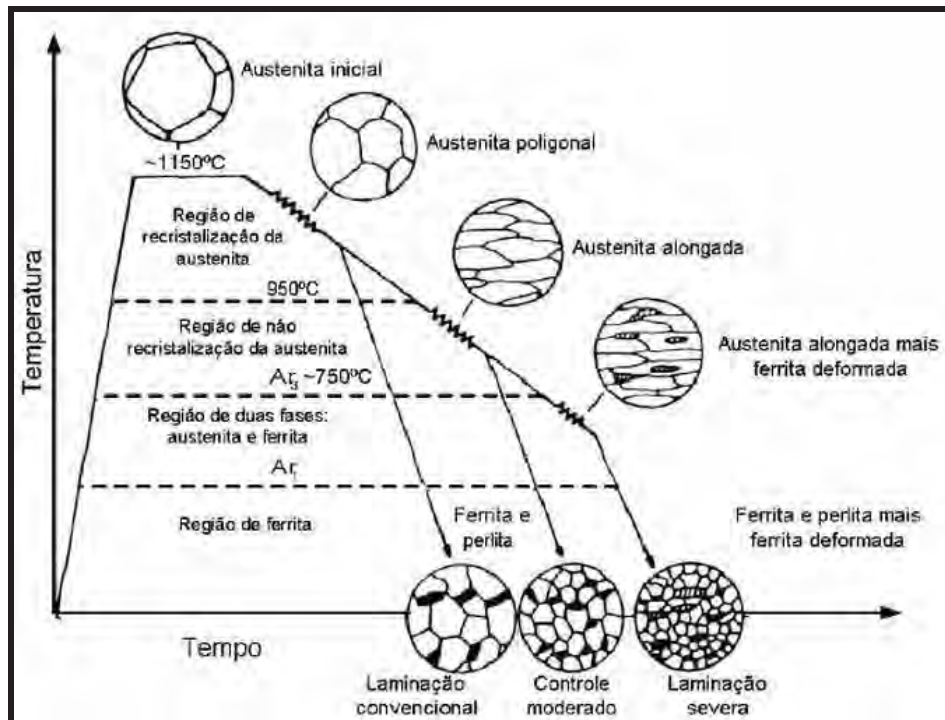


Figura 7 – Esquema mostrando a sequência de deformação durante a laminação controlada (SHIGA, 1981).

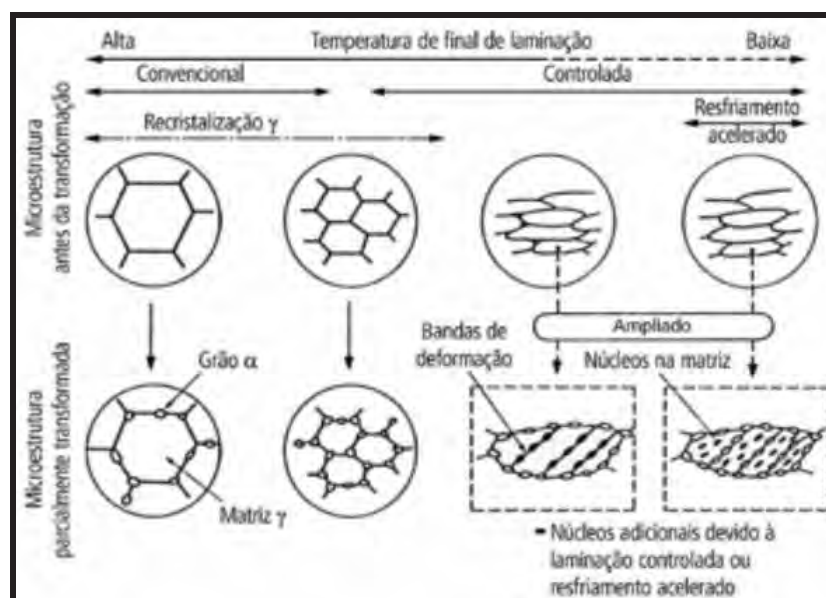


Figura 8 – Evolução do tamanho de grão da austenita e da nucleação posterior de ferrita a partir dela de acordo com a evolução de temperatura aplicada durante o processo (internet: GORNI; acessado em outubro de 2012).

## 2.4.2 Influência dos elementos de liga

A ação de adicionar propositalmente no aço os elementos descritos abaixo, designados por elementos de liga, conferindo propriedades especiais ao aço, metálico ou não, ou mesmo conhecido por metal base, de tal maneira que melhora algumas propriedades do mesmo (Figura 9). Por mais controlado que seja o processo de fabricação do aço, é impossível produzi-lo sem essas impurezas. Às vezes, elas ajudam, às vezes, elas atrapalham. Assim, o que se deve fazer é controlar suas propriedades.

Influência na Propriedade	Elemento									
	C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo	V	Al
Aumento da Resistência	●	●	●		●				●	
Aumento da Dureza	●	●	●		●					
Aumento da Resistência ao Impacto						●				
Redução da ductilidade	●		●	●						
Aumento da Resistência em altas temperaturas								●		
Aumento da Temperabilidade							●	●		
Ação Desoxidante		●			●					●
Aumento da Resistência à Corrosão							●			
Aumento da Resistência à Abrasão							●			
Redução da Soldabilidade	●									

Figura 9 – Influência dos principais elementos de liga nas propriedades do aço (internet: LIGA; acessado em outubro de 2012).

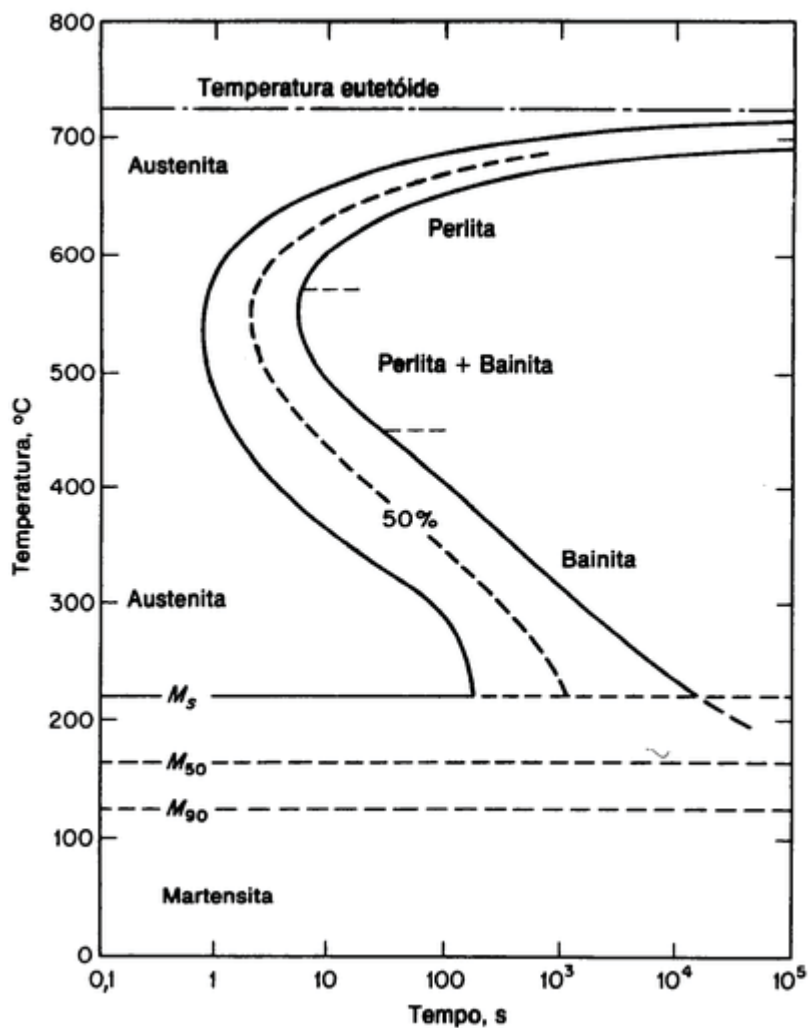


Figura 10 – Diagrama isotérmico completo de um aço eutetóide (internet: ISOTÉRMICO; acessado em Dezembro de 2012).

O efeito dos elementos de liga no diagrama de transformação isotérmica pode ser mostrado nas Figuras 10 e 11. De todos os elementos de liga antes citados, deslocam o diagrama para a direita, isto é, aumentam a faixa de temperabilidade do aço. Entende-se por temperabilidade a profundidade de endurecimento do aço.

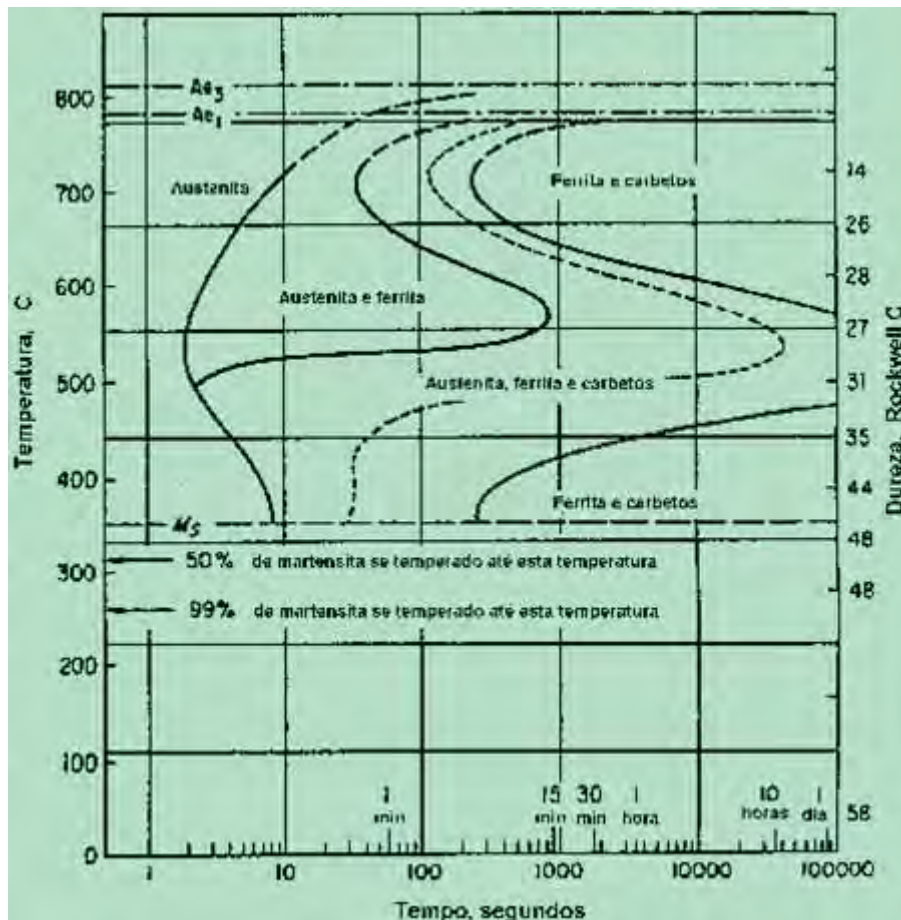


Figura 11 – Diagrama isotérmico com liga.

Os elementos que afetam de modo mais significativo no deslocamento das curvas TTT para direita, isto é, com menores velocidades de resfriamento pode-se atingir a estrutura martensítica, são: C, Mn, Ni, Cr, Cu, Mo e V, assim, é muito importante na tendência de formação da estrutura martensítica na zona afetada termicamente e, portanto, na tendência à fissuração pelo hidrogênio (CUNHA, 1989).

Conforme a referência deste trabalho, ELEMENTOS DE LIGA, site acessado em Outubro de 2012, foi informada a influência de cada elemento de liga nos aços, descritos como segue abaixo.

**Alumínio (Al)** – Normalmente adicionado em pequenas quantidades tem a função de desoxidante eficiente do aço, além de refinar os grãos. Como elemento de liga em aços para a nitretação, sua função é formar o nitrogênio, o nitreto de alumínio, que eleva e resiste à abrasão.



**Boro (B)** – O boro adicionado à liga do aço em quantidades bem pequenas aumenta a profundidade da camada temperada e, por isso, a dureza do núcleo dos aços temperados. Nos aços inoxidáveis austeníticos aumenta o limite elástico diminuindo, contudo, a resistência à corrosão.

**Carbono (C)** – É o elemento essencial que compõe a liga do aço. Conforme seu teor, aumenta consideravelmente o limite de resistência e a dureza do aço, diminuindo contudo a sua tenacidade e soldabilidade.

**Cobalto (Co)** – Aumenta a resistência a altas temperaturas e, por isso, é utilizado em alguns tipos de aço rápido. Além disso, aumenta a resistência ao revenimento, a condutividade térmica e aumenta consideravelmente o magnetismo residual.

**Cobre (Cu)** – O cobre melhora os limites de resistência à tração e de escoamento dos aços diminuindo, porém, a elasticidade. Em pequenas quantidades, torna o aço resistente à ferrugem.

**Cromo (Cr)** – O cromo tem um papel importante em diversos tipos de liga de aço. Ele aumenta a dureza, a resistência à tração e a temperabilidade do aço. Em teores mais altos, aumenta a resistência à corrosão e oxidação, diminuindo, porém, a soldabilidade e a tenacidade. Sendo um elemento formador de carbonetos, aumenta a resistência ao desgaste dos aços em combinação com elevados teores de carbono.

**Enxofre (S)** – Encontrado em quase todos os aços como impureza (0,05% Max.), quando o enxofre é adicionado em teores mais altos, forma-se sulfeto de manganês que é um composto plástico que proporciona uma melhor usinabilidade no aço. Os aços resulfurados e alguns tipos de aço inoxidável utilizam o enxofre mais elevado na liga basicamente para facilitar a usinagem dos mesmos e por isso uma redução nos custos de fabricação do produto final.

**Fósforo (P)** – O fósforo é uma impureza encontrada em todos os aços como consequências de contaminação de matéria-prima (0,05% máx.).

**Hidrogênio (H)** – A presença de hidrogênio é negativa, produzindo uma fragilidade no aço, diminuindo sua elasticidade, além de contribuir para o defeito chamado “flocos”.

**Tungstênio (W)** – O tungstênio aumenta o limite de resistência à tração, a resistência à abrasão e a dureza a quente, mas reduz a condutividade térmica do aço. Usado em aço rápido, o tungstênio melhora a retenção do corte. É elemento formado de carbonetos.

**Vanádio (V)** – Pequenas adições de vanádio aumentam a dureza a quente e diminuem o tamanho de grão. Em aço rápido o vanádio melhora a retenção do corte; aumenta o limite de resistência à tração e o limite de escoamento; no ponto de vista de formação dos carbonetos, substitui o molibdênio, e o tungstênio na proporção de 1% de vanádio para 4% de tungstênio.

**Manganês (Mn)** – O manganês aumenta a temperabilidade, a soldabilidade e o limite de resistência à tração, com diminuição insignificante da tenacidade. Em grandes quantidades e em presença de carbono, aumenta muito a resistência à abrasão. O manganês provoca um aumento de aproximadamente 10 kgf/mm<sup>2</sup> no limite de resistência à tração para cada adição de 1%.

**Molibdênio (Mo)** – O molibdênio aumenta a resistência a quente e quando em presença de níquel e de cromo, aumenta o limite de resistência à tração e o limite de escoamento.

Em aço rápido quando substitui o tungstênio, aumenta a tenacidade, mantendo as propriedades da dureza a quente e retenção de corte. É elemento formador de carboneto. Nos aços rápidos o molibdênio substitui o tungstênio do ponto de vista de formação de carbonetos na proporção de 1% de molibdênio para 2% de tungstênio.

**Níquel (Ni)** – O níquel quando ligado com cromo aumenta a tenacidade do aço beneficiado. Em grandes teores, junto com cromo torna o aço resistente à corrosão e ao calor. Não é elemento formador de carbonetos.

**Nitrogênio (N)** – em aço inoxidável austeníticos, o nitrogênio estabiliza a estrutura, aumenta a dureza e o limite do escoamento. Nos aços de nitretação, aumenta a dureza da superfície com a formação de nitretos, porém o nitrogênio é prejudicial ao aço de baixa liga, porque abaixa a tenacidade causando a fragilidade azul, além de facilitar a corrosão intergranular.

**Silício (Si)** – O silício aumenta o limite de resistência à tração e o limite de escoamento dos aços, com pequena diminuição da tenacidade, diminui também a condutividade térmica e a usinabilidade. Especialmente nos aços fundidos, o silício aumenta a densidade. Haverá um aumento de 10 kgf/mm<sup>2</sup> no limite de resistência à tração para cada 1% de silício adicionado. Não é elemento formador de carbonetos. Um aço pode ser considerado aço ao silício somente quando o teor desse elemento está acima de 0,40%.



**Titânio (Ti)** – O titânio, adicionado em pequenas quantidades, tem a função de refinar o grão. Em certos aços inoxidáveis austeníticos, o titânio é adicionado em relação bem definida com o carbono para estabilizar o aço contra a formação de carbonetos de cromo no contorno de grão.

## 2.5 ENSAIO DE DUREZA

O ensaio de dureza consiste na impressão de uma pequena marca feita na superfície da peça pela aplicação de pressão com uma ponta de penetração. A medida da dureza do material ou da dureza superficial é dada como função das características da marca de impressão e da carga aplicada em cada tipo de ensaio de dureza realizado. Esse ensaio é amplamente utilizado na indústria de componentes mecânicos, tratamentos superficiais, vidros e laminados devido à vantagem de fornecer dados quantitativos das características de resistência à deformação permanente das peças produzidas. É utilizado como um ensaio para o controle das especificações da entrada de matéria-prima e durante as etapas de fabricação de componentes. Observa-se que os resultados fornecidos pela medida de dureza devem variar em função de tratamentos sofridos pela peça: refusão a laser, tratamentos termoquímicos, tratamentos térmicos etc. (GARCIA, A.; SPIM J. A.; SANTOS C. A., 2000).

A dureza é uma propriedade mecânica cujo conceito se segue à resistência que um material, quando pressionado por outro material ou por marcadores padronizados, apresenta ao risco ou à formação de uma marca permanente. Os métodos mais aplicados em engenharia utilizam-se de penetradores com formato padronizado e que são pressionados na superfície do material sob condições específicas de pré-carga e carga, causando inicialmente deformação elástica e em seguida deformação plástica. A área da marca superficial formada ou a sua profundidade são medidas e correlacionadas com um valor numérico que representa a dureza do material (Figura 12). Esta correlação é baseada na tensão de que o penetrador necessita para vencer a resistência da superfície do material (GARCIA, A.; SPIM J. A.; SANTOS C. A., 2000).

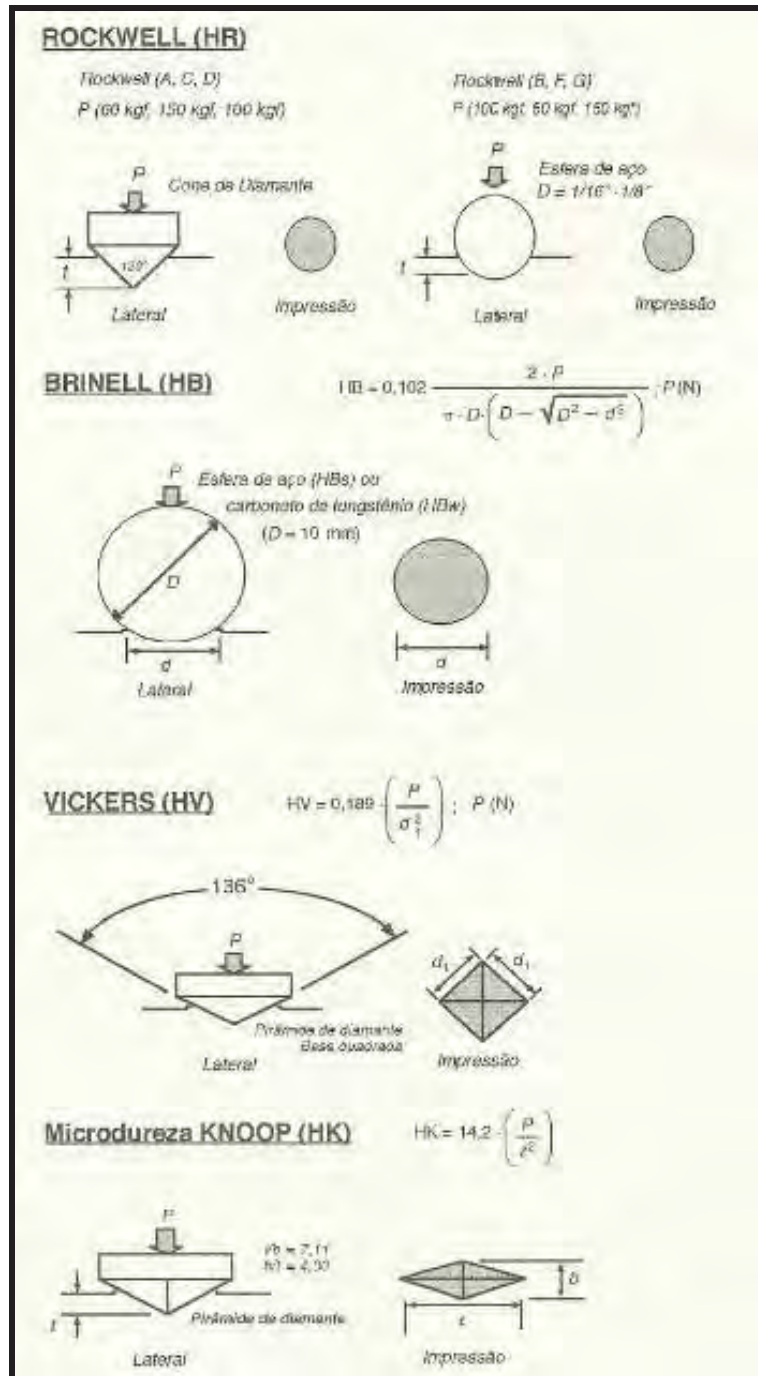


Figura 12 – Tipos de ensaio de dureza, destacando as características de penetração (GARCIA, A.; SPIM J. A.; SANTOS C. A., 2000).

Neste trabalho foram feitas experimentos com ensaio de dureza Vickers (HV), assim, a abordagem sobre o mesmo será detalhada.

### 2.5.1 Técnica e vantagens do ensaio

Essa dureza foi introduzida em 1925 por Smith e Sandland, levando o nome Vickers, porque a Companhia Vickers-Armstrong Ltda. fabricou as máquinas mais conhecidas para operar com esse tipo de dureza. O penetrador é uma pirâmide de diâmetro de base quadrada, com um ângulo de  $136^\circ$  entre as faces opostas. Esse ângulo produz valores de impressões semelhantes à dureza Brinell, porque a relação ideal  $d/D$  da dureza Brinell sendo 0,375, para essa relação ideal, as tangentes à esfera partindo dos cantos da impressão fazem entre si um ângulo de  $136^\circ$  (SOUZA,1982).

Como o penetrador é um diamante, ele é praticamente indeformável, e como todas as impressões são semelhantes entre si, não importando o seu tamanho, a dureza Vickers (HV) é independente da carga, isto é, o número de dureza obtido é o mesmo qualquer que seja a carga usada para materiais homogêneos. Para esse tipo de dureza, a carga varia de 1 kgf até 100 ou 120 kgf. A mudança da carga é necessária para se obter um impressão regular, sem deformação, e de tamanho compatível para a medida de suas dimensões do visor da máquina; isso depende, naturalmente, da dureza do material que se está ensaiando, como no caso da dureza Brinell. A forma da impressão é um losango regular, ou seja, quadrada, e pela média  $L$  das suas diagonais tem-se, conforme a Figura 13 e a expressão 1, a dureza Vickers (SOUZA,1982).

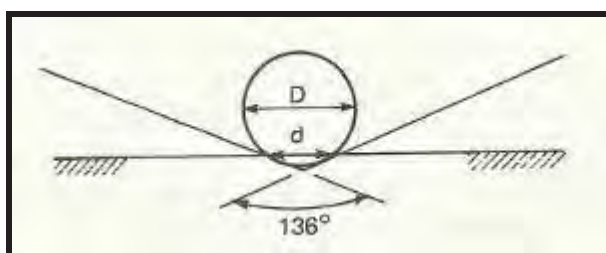


Figura 13 – Ângulo das tangentes à esfera, para a relação  $d/D = 0,375$  na dureza brinell (SOUZA,1982).

A forma de impressão é a de um losango regular, cujas diagonais devem ser medidas por um microscópio acoplado a máquina; a média dessas duas medidas utilizadas para a determinação da dureza Vickers é dada pela seguinte expressão:

$$HV = 0,189 P/ d^2 \quad (1)$$

Onde :  $P$  = carga (N) e  $d$  = comprimento da diagonal da impressão (mm) para  $136^\circ$ .

### **2.5.2 Microdureza Vickers.**

Como já foi mencionado anteriormente, os valores de dureza obtidos são independentes da carga aplicada, Isto significa que ensaios realizados com cargas diferentes apresentam o mesmo valor de dureza. As cargas variam de 1 a 120 kgf. Considera-se microdureza Vickers quando são utilizadas cargas inferiores a 1,0 kgf. Pode-se realizar ensaios com cargas inferiores a 5 kgf.

Deve-se avaliar as amostras dos ensaios de microdureza com muito cuidado e atenção, assim recomenda-se o polimento eletrolítico em vez do polimento mecânico, porque este último pode ocasionar o encruamento da superfície.

### **2.5.3 Informações Adicionais.**

Informações adicionais e muito importantes para a realização do ensaio de dureza são : a norma brasileira para a realização do ensaio é a NBR-6672; a escala contínua de carga; impressões extremamente pequenas; deformação nula do penetrador; escala única de dureza; aplica-se a uma amplo espectro de materiais; aplica-se a qualquer espessura de corpo de prova, desde que não haja ocorrência de deformação no lado oposto ao da superfície ensaiada; exige cuidadosa preparação do corpo de prova para o caso de ensaio com microcarga (polimento eletrolítico); é de utilização industrial ilimitada, em função da demora do ensaio e de utilização ampla em pesquisa; é indicado no levantamento de curvas de profundidade de têmpera e de cementação; a distância entre a inserção das duas diagonais e a borda do corpo de prova ou a borda de uma impressão vizinha deve ser de no mínimo  $2,5 d$  (GARCIA, A.; SPIM J. A.; SANTOS C. A., 2000).

## 2.6 ENSAIO DE TRAÇÃO

A resistência à tração é um dos mais importantes fatores na seleção do material, especialmente se for um membro estrutural, parte de uma máquina ou de um vaso de pressão. O ensaio de tração é realizado conforme está mostrado na Figura 14. O corpo de prova é usinado para as dimensões exatas estabelecidas por norma e preso à máquina de tração em ambas as extremidades. Ele é então tracionado até o ponto de ruptura e as informações são registradas num gráfico (ARAÚJO, W.; FORTES, 2004).

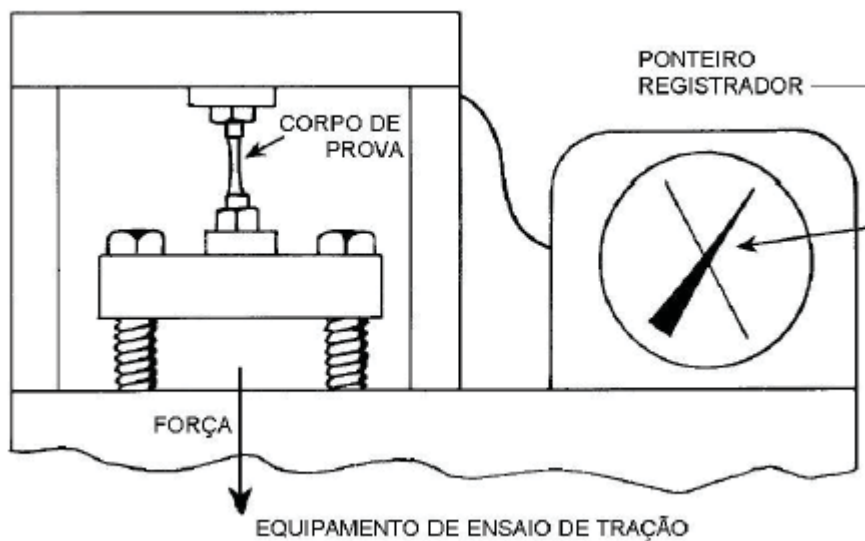


Figura 14 – Equipamentos para o ensaio de tração (ARAÚJO, W.; FORTES, 2004).

O teste de tração fornece quatro informações básicas:

- 1 limite de escoamento;
- 2 limite de resistência;
- 3 alongamento;
- 4 redução de área.

### 2.6.1 Limite de escoamento

O limite de escoamento pode ser explicado por um metal quando é tracionado pelas extremidades, sofre um aumento do comprimento longitudinal, porém retorna as dimensões originais quando cessa o esforço ao qual foi submetido. O regime em que se aplica o que foi dito anteriormente é elástico, representado pela letra A da Figura 15. À medida que a carga aumentar, o metal atingirá um ponto além do qual o corpo de prova não mais retornará a sua dimensão original quando cessar a carga.

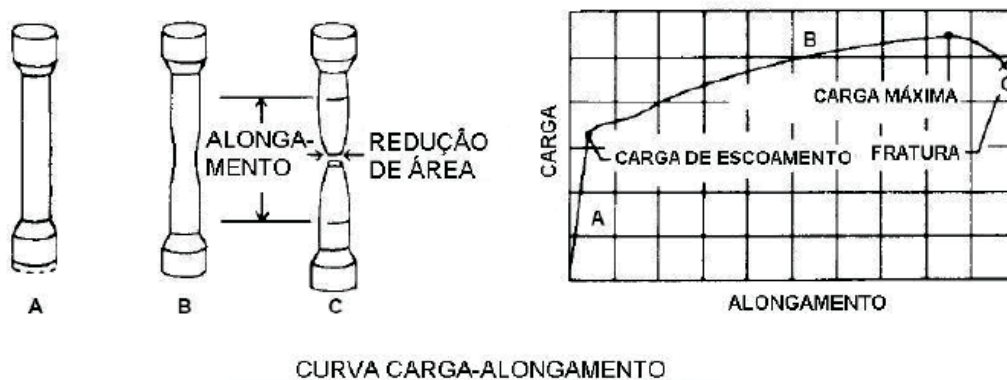


Figura 15 – Curva carga x alongamento (ARAÚJO,W.; FORTES, 2004).

A tensão limite de escoamento é definida como o ponto em que o metal atinge o limite de suas características elásticas, não mais retornando a sua forma original. A unidade dessa grandeza é  $N/mm^2$  ou MPa (ARAÚJO,W.; FORTES, 2004).

Calcula-se a tensão limite de escoamento (LE) como:

$$LE[N] = \frac{\text{CARGA DE ESCOAMENTO [N]}}{\text{ÁREA DE SEÇÃO RESISTENTE INICIAL [mm}^2\text{]}} \quad (3)$$

### 2.6.2 Limite de resistência

O limite de resistência acontece quando o metal excedendo o limite de escoamento, explicado anteriormente, continuará a se deformar e, se a carga for subitamente aliviada, não retornará a sua forma original, mas permanecerá com uma

deformação residual. Esse fenômeno é denominado deformação plástica e está representado pela letra B da Figura 15. A deformação plástica aumenta para promover um alívio nas tensões trativas, tornando-se necessário que a carga continue aumentando para continuar a deformar plasticamente o metal. Finalmente, chega-se a um ponto em que o metal não consegue mais sofrer deformação plástica e a carga atinge seu valor máximo. Dizemos que o material atingiu sua capacidade máxima de encruamento (ARAÚJO,W.; FORTES, 2004).

A tensão limite de resistência é definida como o ponto em que o corpo de prova atinge a carga máxima durante o ensaio de tração. A unidade dessa grandeza é  $N/mm^2$  ou MPa (ARAÚJO,W.; FORTES, 2004).

Calcula-se a tensão limite de resistência (LR) como:

$$LR[MPa] = \frac{CARGA MÁXIMA [N]}{ÁREA DA SEÇÃO RESISTENTE INICIAL [mm^2]} \quad (4)$$

### 2.6.3 Alongamento

Antes que um corpo de prova de tração seja colocado na máquina, duas marcas devem ser feitas a uma determinada distância na parte útil do corpo de prova. Após a fratura do corpo de prova a distância entre as marcas é medida e o alongamento é calculado tomando-se como referência a distância original entre as duas marcas (veja a Figura 16). O valor do alongamento é percentual (%) e fornece uma indicação da ductilidade do metal à temperatura ambiente (ARAÚJO,W.; FORTES, 2004).

Calcula-se o alongamento (AL) como:  $AL[\%] = \text{comprimento final (mm)} - \text{comprimento inicial (mm)}$  dividido pela área inicial (mm<sup>2</sup>) e multiplica por 100 o resultado final.

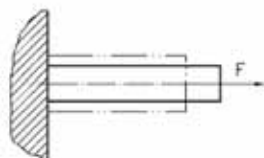


Figura 16 – Alongamento (Ribbeler, R. C.; Cozaciuc, I; Silva, L. R.;Togni, M. A., 2006)

## 2.7 ENSAIO DE IMPACTO (CHARPY)

O teste Charpy é um dos métodos para determinar a resistência e sensibilidade dos materiais quando submetidos à certa carga de impacto. O objetivo principal é medir a quantidade de energia absorvida pelo material durante a fratura. São essenciais para garantir a segurança, confiabilidade e qualidade dos mais diversos materiais. É muito utilizado no setor automobilístico, de aeronaves e em peças específicas utilizadas na indústria (internet: CIMM; acessado em Novembro de 2012).

O ensaio de impacto revela o comportamento dos materiais segundo sua tendência de se comportar de uma maneira frágil. Embora seja um ensaio ultrapassado, no sentido de que existem ensaios mais elaborados e mais representativos, o ensaio de impacto é usado devido a sua simplicidade e sua rapidez. Trata-se de um ensaio dinâmico que consiste na aplicação de uma carga instantânea sobre um corpo de prova, e na medida da energia necessária para fraturá-lo. Os corpos de prova são padronizados e possuem um entalhe onde ocorre a fratura; são retirados da própria peça, pois assim fornecem as propriedades do material do qual a peça é feita. Os materiais podem ser classificados basicamente como: frágeis, que apresentam pequena deformação, absorvendo pouca energia antes da ruptura ou dúcteis, que apresentam grande deformação, absorvendo muita energia antes da ruptura. Em outras palavras, no ensaio, quanto menor a energia absorvida, mais frágil será o comportamento do material, e vice versa (internet: IMPACTO; acessado em Novembro de 2012).

O ensaio é realizado por um pêndulo de impacto. O corpo de prova é fixado em um suporte, na base da máquina. O martelo do pêndulo - com uma borda de aço endurecido - é liberado de uma altura pré-definida, causando a ruptura do corpo em teste. A altura de elevação do martelo após o impacto, em comparação com a anterior, dá a medida da energia absorvida pelo corpo de prova. O teste pode ser conduzido em temperatura ambiente ou em temperaturas mais baixas para testar a fragilidade do material em baixa temperatura. A principal vantagem do teste Charpy é a simplicidade e o baixo custo e o tamanho reduzido do corpo de prova (internet: CIMM; acessado em Novembro de 2012).



### 3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Esse capítulo contém a descrição das etapas desenvolvidas nos laboratórios para os ensaios de tração, dureza Vickers e a microdureza do material API 5L X 70, bem como o ensaio de impacto Charpy, este último seguindo normas ASTM E 23. O tubo em estudo, API 5L X70, soldado com arco submerso, foi cedido pela Tenaris Confab S.A., com a finalidade de avaliar a tenacidade ao impacto da junta soldada e do material base. Ainda neste capítulo serão apresentadas as máquinas utilizadas para maior compreensão do desenvolvimento de cada etapa na obtenção dos resultados. O laboratório onde foram feitos os ensaios localiza-se na Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, UNESP, na cidade de Guaratinguetá, no estado de São Paulo.

Grande parte dos ensaios de caracterização mecânica foi conduzida de acordo com as diretrizes das principais normas internacionais de petróleo e gás, como a API 5L.

#### 3.1 Material de estudo

O material de estudo (Figura 17), deste trabalho de conclusão de curso foi o aço microligado classificado como alta resistência e baixa liga (ARBL), grau API X70 e especificação PSL2, obtido por laminação controlada. O aço em estudo possui excelente tenacidade e soldabilidade; tornando-se um grande atrativo na utilização de tubos para transporte de gás, petróleo ou óleo.

De acordo com a norma API 5L, a composição química do aço utilizado deve estar conforme a especificada na Tabela 5:

Tabela 5 - Composição química (% massa) do aço API 5L X70 nacional.

Elemento de Liga	C	Mn	Si	P	S	Ti	V	Nb	Nb+V+Ti
(%massa)	0,10	1,36	0,25	0,01	0,004	0,004	0,004	0,05	0,06

O aço foi fabricado pela USIMINAS e conformado pela empresa TENARIS-CONFAB S.A. na forma de tubo soldado com arco submerso na dimensão de 12 m de comprimento x 707 mm (28”) de diâmetro externo x 19,05 mm de espessura de parede

(3/4”), dos quais nos foram fornecidos dois metros do tubo dividido em oito partes (anéis).

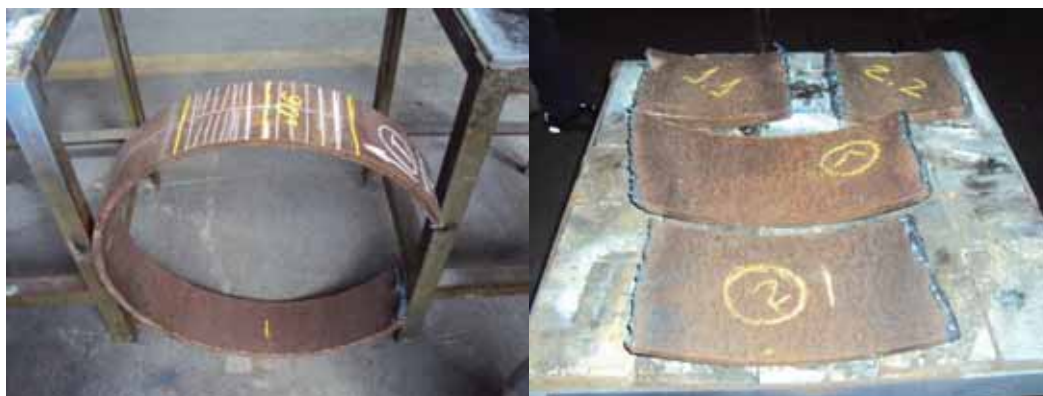


Figura 17 – Modelo dos tubos selecionados para a retirada dos corpos de prova para a caracterização micro estrutural e mecânica.

Para maiores informações sobre o material em estudo, a conformação dos tubos pelo processo UOE-SAW realizado pela Tenaris-Confab S. A., ilustrado na Figura 18, foi realizado em etapas. Na primeira etapa, a prensagem de bordas, prensagem U, na segunda a prensagem O, a qual chama de formação, e na terceira etapa, expansão E, a qual chama de calibração final das dimensões do tubo, os aços são submetidos a deformações plásticas. Nesse ponto, é importante ressaltar que todas as etapas de deformação mecânica são realizadas a frio (GOMES, R. V. B.,2009).

O processo de fabricação de tubos pelo processo UOE-SAW na Tenaris-Confab S. A. têm a capacidade de produzir tubos com diâmetros externos de 12”a 48”, espessuras de 0,250” a 1,250”e graus API 5L até X80 (GOMES, R. V. B.,2009).

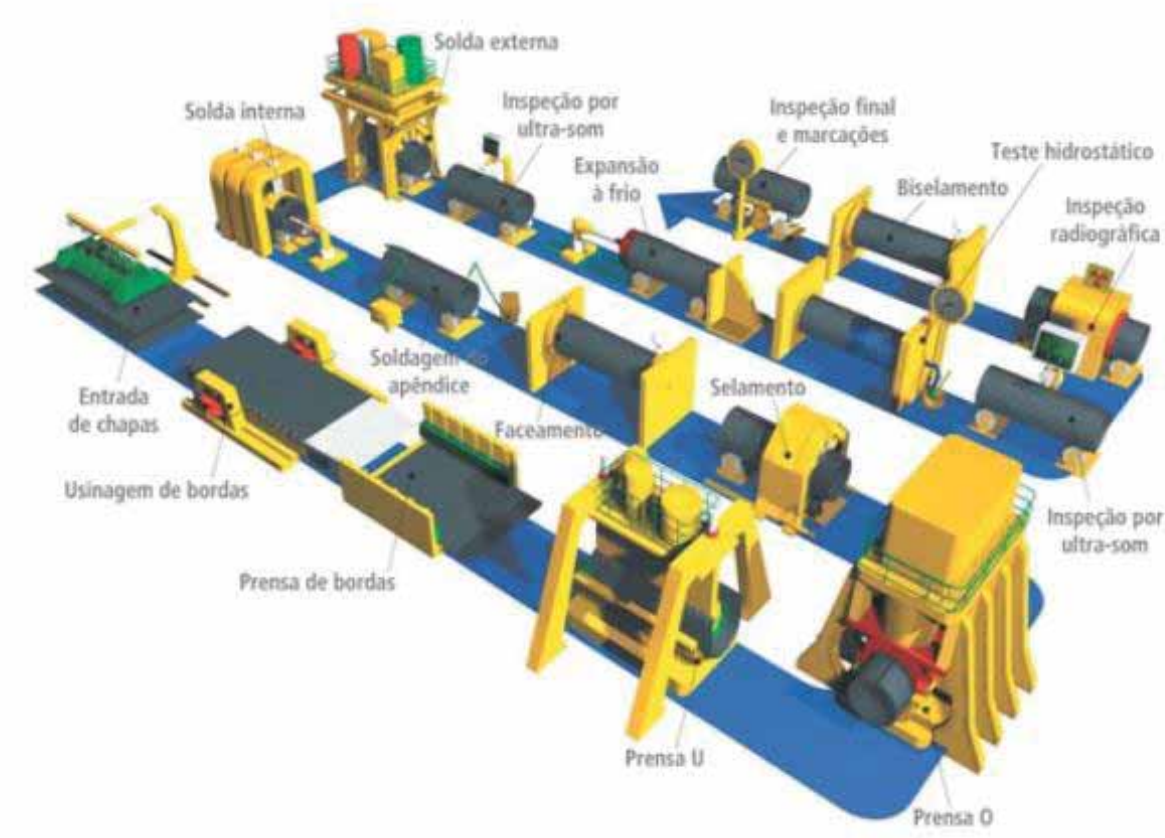


Figura 18 – Planta da Tenaris-Confab de fabricação de tubos pelo processo UOE-SAW (GOMES, R. V. B.,2009).

### 3.2 Exequibilidade do trabalho proposto.

Este trabalho de graduação é exequível considerando a disponibilidade da matéria-prima (tubo de aço grau API 5L X70 soldado com arco submerso), doada pela empresa Tenaris-Confab S.A., e que todo o trabalho experimental (confeção dos corpos de prova), os ensaios mecânicos e as análises metalográficas, foram respectivamente executados nas oficinas mecânicas, no Laboratório de Ensaios Mecânicos e no Laboratório de Microscopia e Microanálise do Departamento de Materiais e Tecnologia do Campus de Guaratinguetá da UNESP.

### 3.3 Corte por oxi-acetileno.

O corte realizado nos tubos foi por reação química, aquecimento através de chama e reações exotérmicas, seguido de oxidação do metal e posterior expulsão através de jato de  $O_2$ . A preferência pelo oxicorte foi devido ao processo ser mais barato de implementar, com equipamentos mais simples, com a maior facilidade de treinamento do operador e, particularmente na faixa de espessuras maiores que 30 mm, ser o processo que propicia o menor custo por metro cortado. O combustível utilizado foi o acetileno ( $C_2H_2$ ), assim, o corte dos tubos foi por oxi-acetileno (internet: OXICORTE; acessado em Novembro de 2012).

Entre os diversos combustíveis gasosos, o acetileno ( $C_2H_2$ ) é o de maior interesse industrial por possuir a maior temperatura de chama ( $3.160\text{ }^\circ\text{C}$ ) devido, entre outros fatores, a este hidrocarboneto possuir maior percentual em peso de carbono comparativamente aos demais gases combustíveis. É um gás estável a temperatura e pressão ambiente, porém não se recomenda seu uso com pressões superiores a  $1,5\text{ kg/cm}^2$ , onde o gás pode decompor-se explosivamente. É inodoro e por esta razão leva um aditivo que possibilita sua detecção olfativa em caso de vazamento (internet: OXICORTE; acessado em Novembro de 2012). A Figura 19 apresenta os principais componentes de um sistema de corte oxi-acetilênico.

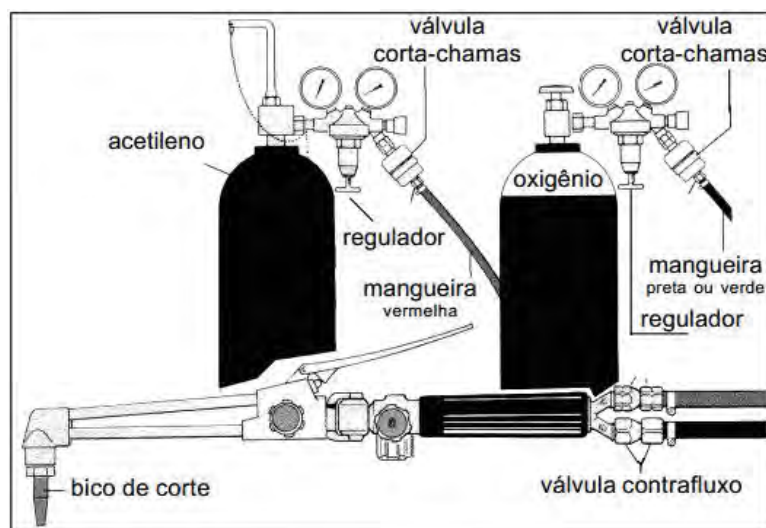


Figura 19 – EQUIPAMENTOS BÁSICO PARA CORTE OXI-ACETILENO (Ribbeler, R. C.; Cozaciuc, I; Silva, L. R.;Togni, M. A., 2006).

O equipamento básico é constituído de cilindros de oxigênio e acetileno, respectivamente, com os reguladores específicos para esses gases. Deve-se sempre utilizar válvulas corta-chamas, montadas entre os reguladores e as mangueiras. Essas válvulas são equipamentos de segurança baratos, principalmente se comparados com resultado de possíveis acidentes nos quais teríamos, provavelmente, mangueiras queimadas e manômetros destruídos, ou até, em casos mais graves, explosões que resultariam em cilindros inutilizados, além de risco de vida (Ribbeler, R. C.; Cozaciuc, I; Silva, L. R.;Togni, M. A., 2006).

Além da válvula corta-chamas é aconselhável montar válvulas contra-fluxo entre o maçarico e as mangueiras (acetileno e oxigênio). A válvula não detém chamas retrocedentes, pois seria destruída pelo calor da chama, porém evita a entrada de acetileno na mangueira de oxigênio e vice-versa. As mangueiras usadas para conduzir os gases são apresentadas em cores diferentes: a preta ou verde para oxigênio e a vermelha para acetileno (Ribbeler, R. C.; Cozaciuc, I; Silva, L. R.;Togni, M. A., 2006).

No experimento foram tomados os devidos cuidados para a realização do corte. Para a segurança dos operadores, foram utilizados óculos de proteção apropriados contra fagulhas, escória e brilho da chama, durante todo o tempo; foram utilizadas luvas, mangotes, aventais e perneiras de proteção, tomou-se o cuidado quanto à pressão de saída de acetileno, a qual não deve exceder  $1,5 \text{ kgf/cm}^2$  e, por fim, foram conservadas toda a roupa e equipamento de proteção individual livres de óleo ou graxa.



Figura 20 – Corte oxi-acetileno realizado no laboratório da UNESP – Guaratinguetá.

### 3.4 Operação de corte por serra

Após o corte oxi-acetileno, descrito anteriormente, foi realizada a operação de corte por serra de fita do tubo de aço fornecido pelo Tenaris-Confab S.A..



Figura 21 – Corte por serra automática realizada na UNESP de Guaratinguetá.



Figura 22 – Corte por serra vertical e automática, respectivamente, realizada na UNESP de Guaratinguetá.

### 3.5 Quantificação dos corpos de prova.

A Tabela 6 apresenta a descrição e prévia quantificação dos corpos de prova previstos para a realização do estudo.

Tabela 6 - Prévia quantificação dos corpos de prova de impacto Charpy-V e de tração.

QUANTIDADE E TIPO DE CORPOS DE PROVA		
DESCRIÇÃO	SENTIDO LONGITUDINAL	SENTIDO TRANSVERSAL
TRAÇÃO PLANO	5	5
TRAÇÃO CILÍNDRICO	5	5
CHARPY-V (METAL BASE)	18	18
CHARPY-V (SOLDA)	18	18



### 3.6 Análise metalográfica do aço API 5L X70

Para a realização da análise, o plano de interesse da amostra é cortado, lixado, com lixas de granulometria decrescente de #100 até #1000, polido e atacado com reagente químico, de modo a revelar as interfaces entre os diferentes constituintes que compõem o metal. O reagente utilizado para o ataque químico foi Nital 10%, cuja composição corresponde a 90% de ácido nítrico e 10% de álcool etílico.

Após o ataque com Nital 10%, foram identificadas as fases presentes no material-base, no metal de solda e nas regiões da zona termicamente afetada (ZTA) do tubo de aço, conforme ilustram as Figuras 23 e 24.



Figura 23 – Corpo de prova utilizado para análise metalográfica.

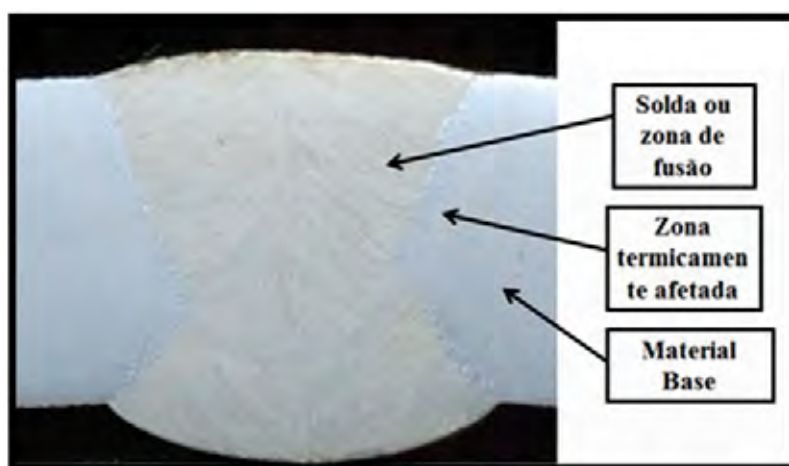


Figura 24 – Ampliação da Figura 23 com a identificação da solda, zona termicamente afetada e material base.

### 3.7 Ensaio mecânico de tração

Do material citado foram confeccionados dois grupos de corpos de prova de tração para a caracterização das propriedades mecânicas básicas, sendo um na espessura total da placa, conforme recomendações da norma API, e outro em tamanho reduzido, conforme a norma ASTM E 8M, ambos nos sentidos longitudinal e transversal de laminação para verificação do coeficiente de anisotropia resultante do processo de fabricação. A Tabela 7 apresenta os resultados dos ensaios de tração realizados.

Tabela 7 - Resultados do ensaio de tração.

CDP Transversal cilíndrico	$\sigma_e$ (MPa) a 0,2%	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa) a 0,2%	Along. %	$\sigma_e$ (MPa)/ $\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)
1	499,36	546,33	30	0,91
2	498,54	554,65	29	0,90
3	500,95	566,4	32	0,88
4	502,98	559,64	30	0,90
5	494,9	550,86	31	0,90
Média	499,34	555,58	30,4±1,1	0,90
CDP Transversal cilíndrico	$\sigma_e$ (MPa) a 0,2%	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa) a 0,2%	Along. %	$\sigma_e$ (MPa)/ $\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)
1	518,09	578,25	27	0,90
2	504,65	566,21	33	0,89
3	507,59	577,29	31	0,88
4	496,84	555,46	33	0,89
5	511,79	564,73	30	0,91
Média	507,79	568,39	30,8±2,5	0,89
CDP de tração Plana	$\sigma_e$ (MPa) a 0,2%	$\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa) a 0,2%	Along. %	$\sigma_e$ (MPa)/ $\sigma_{m\acute{a}x}$ (MPa)
1	-----	602,97	36	-----
2	-----	588,66	38	-----
3	-----	597,75	33	-----
4	-----	612,63	36	-----
Média	-----	600,50	35,8±2,0	-----

Conforme a norma API 5L,  $\sigma_e$  para um corpo de prova de tração plano pode ser desconsiderado, assim tais valores não foram incluídos na Tabela 7. Como já foi mencionado anteriormente, os corpos de prova foram retirados dos tubos na seção transversal e longitudinal. Na direção desta última, nos corpos de tração cilíndrico,



pode-se observar a anisotropia do material, através dos maiores valores de tensão de escoamento. Estes valores foram maiores quando se comparou aos ensaios de tração na direção transversal. Deve-se atentar ao fato de que a relação da tensão de escoamento e a tensão máxima dos corpos de prova resultou em aproximadamente 0,9 para o ensaio de tração longitudinal e transversal, concluindo-se que o aço API 5L X70 apresenta uma capacidade limite de aumento de resistência mecânica através de mecanismo de encruamento. Os corpos de prova na tração plana foram os quais apresentaram maiores valores para tensão máxima, devido à variação das cargas aplicadas ou mesmo da geometria do material.

### **3.8 Análise da microdureza Vickers.**

Após acabamento superficial com lixas de granulometria decrescente de #100 até #1000 e polimento com alumina 1 $\mu$ m, 2 $\mu$ m e 3 $\mu$ m, foram realizadas análises de amostras metalográficas retiradas dos sentidos longitudinal e transversal do tubo de aço e da junta soldada, sem ataque químico, com o objetivo de verificar a presença de inclusões não metálicas particularmente localizadas na região central da placa de aço (segregação), proveniente do processo de laminação anterior. A análise das microestruturas das regiões citadas foi, então, realizada após ataque com Nital 2%. Foram identificadas as fases presentes no material-base, no metal de solda e nas regiões da zona termicamente afetada (ZTA) do tubo de aço e determinados os respectivos tamanhos de grão onde for possível.

Paralelamente às análises metalográficas, foram levantados os valores de microdureza do material-base em ambos os sentidos longitudinal e transversal. Aqui também, especial ênfase foi dada à região central ao longo da espessura de parede do tubo e às sub-regiões da ZTA visando a identificar e quantificar o possível efeito do gradiente de temperaturas no processo de segregação e na heterogeneidade microestrutural e de propriedades mecânicas da junta soldada do tubo de aço API X70.

Na Figura 32 os pontos indicados correspondem aos locais onde foram realizados os ensaios de microdureza. A partir deste ensaio pode-se observar os grãos na região do metal base, zona termicamente afetada e a região de solda. As imagens da micrografia dos grãos podem ser analisadas na Figura 33.

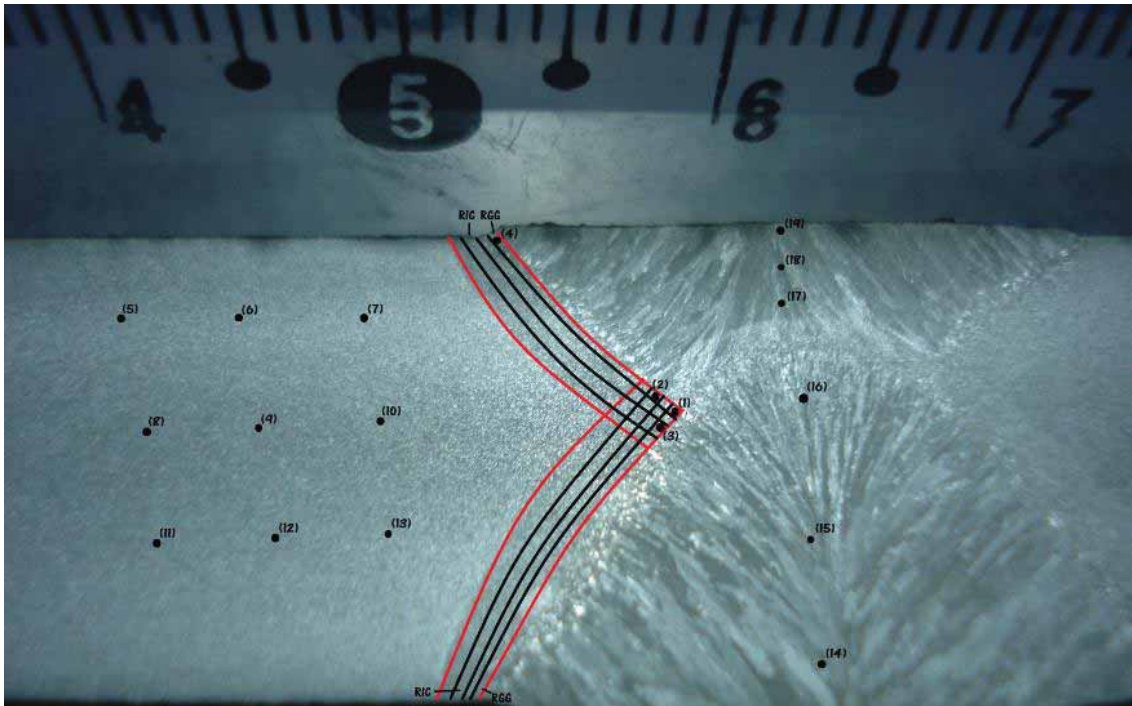


Figura 25 – Análise da microdureza Vickers para uma carga de 500 gramas.

Tabela 8 - Resultados da microdureza Vickers conforme localização ilustrada na Figura 32.

TABELA DE RESULTADOS DE MICRODUREZA VICKERS			TABELA DE RESULTADOS DE MICRODUREZA VICKERS		
PONTOS	REGIÃO	DUREZA (HV)	PONTOS	REGIÃO	DUREZA (HV)
1	RGG	199	11	MATERIAL BASE	212
2	RGG/RIC	197	12	MATERIAL BASE	190
3	RIC/RGG	195	13	MATERIAL BASE	182
4	RGG	204	14	MATERIAL DE SOLDA	257
5	MATERIAL BASE	208	15	MATERIAL DE SOLDA	246
6	MATERIAL BASE	201	16	MATERIAL DE SOLDA	223
7	MATERIAL BASE	200	17	MATERIAL DE SOLDA	244
8	MATERIAL BASE	204	18	MATERIAL DE SOLDA	248
9	MATERIAL BASE	181	18	MATERIAL DE SOLDA	261
10	MATERIAL BASE	183			

Analisando as imagens microscópicas dos grãos pode-se observar as regiões de transição na Figura 33. Nas primeiras imagens dos grãos da Figura 33 temos metal base com os grãos se tornando cada vez mais grosseiros; em seguida inicia-se uma zona de transição que corresponde à zona termicamente afetada. As figuras intermediárias correspondem à região da solda (região de granulação fina), sucedida novamente por uma zona termicamente afetada e metal base.

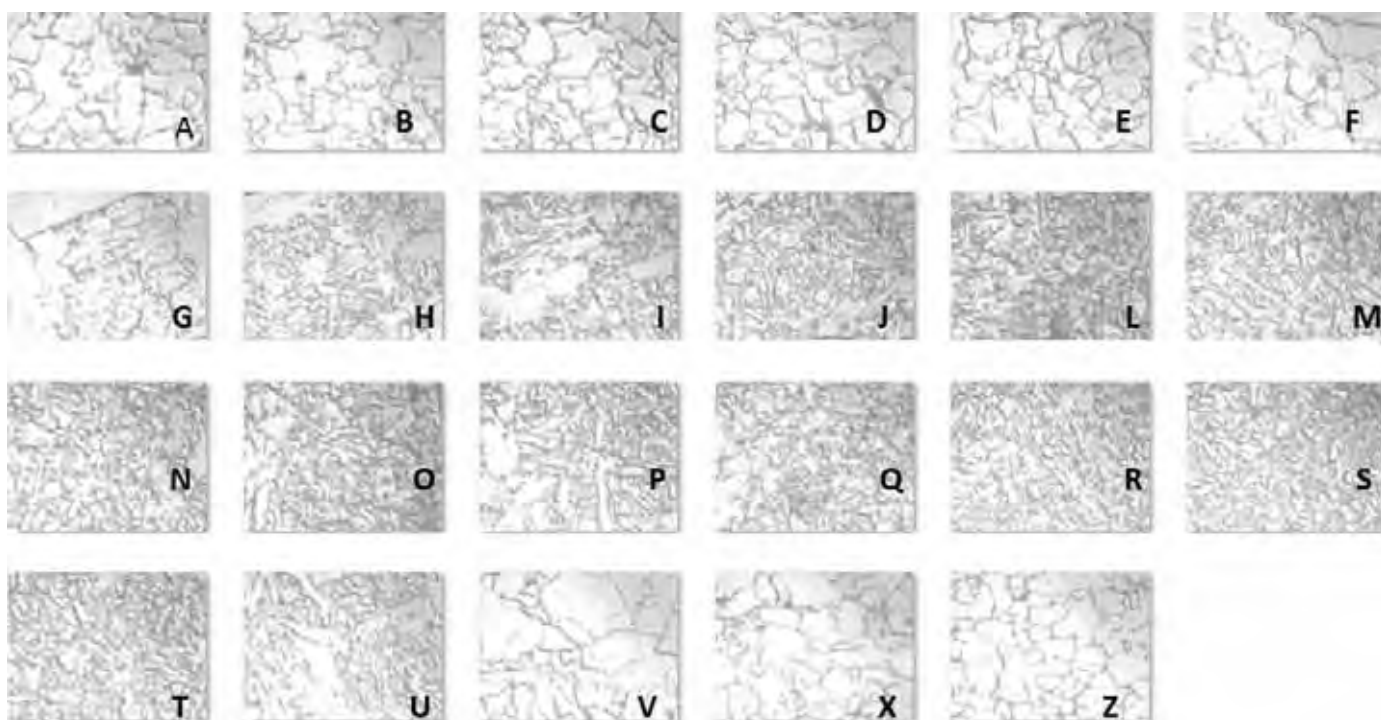


Figura 26 – Análise da micrografia dos grãos dos Aços API 5L (ampliação de 100 x).

Na Figura 33, na região do metal base, identificam-se uma matriz de ferrita (fase mais clara) e perlita (fase mais escura).

### 3.9 Ensaio mecânico de impacto Charpy-V.

No ensaio Charpy – V foi verificado a variação dos valores de energia absorvida com a temperatura por meio de ensaios do material-base e da junta soldada (metal de

solda e possivelmente a ZTA) nos sentidos longitudinal do tubo de aço API X70 e transversal. Os ensaios foram realizados nas temperaturas: à 0 °C com gelo e em outras três temperaturas gelo seco e sal à -21°C, nitrogênio por volta de -180°C, gelo seco com álcool à -77°C. Todas as temperaturas foram seleccionadas conforme requerido pela norma API 5L. Serão analisadas as superfícies de fratura dos corpos de prova de impacto Charpy-V e determinadas as porcentagens dúctil-frágil decorrentes da realização do ensaio em temperatura específica.

Para a identificação do local exato onde os CP's deveriam ser entalhados, as peças tiveram que ser preparadas (lixa de #400, #600 e #1200) e posteriormente atacadas com Nital (10%).

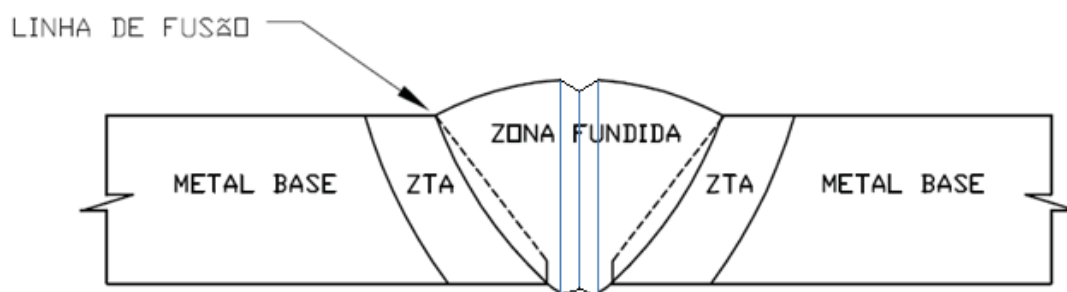


Figura 27 – Localização do entalhe.



Figura 28 – Localização do entalhe, do risco central do entalhe 27,5 mm para ambos os lados.

Após a identificação da localização do entalhe, as peças foram usinadas pelos técnicos da Universidade Estadual Paulista – UNESP, Figura 27, e posteriormente foram trincadas seguindo as normas ASTM E 23, com a máquina Engemaq EDM, 200 NC, conforme a Figura 28.

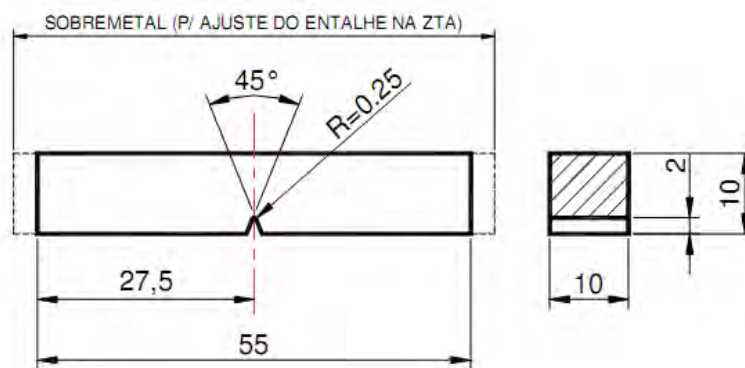


Figura 29 – Dimensão dos corpos de prova conforme norma ASTM E 23.

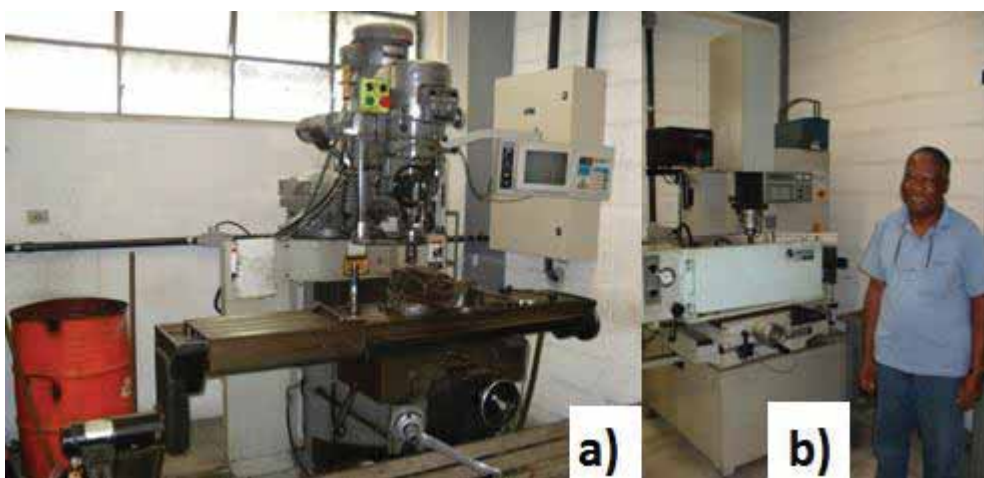


Figura 30 – Fotos das máquinas utilizadas para: a) usinar e b) colocar trincas conforme norma ASTM E 23.

Os materiais utilizados para a realização do ensaio Charpy seguem a norma ASTM E 23 (Figuras 29, 30 e 31), por exemplo, as pinças para manusear os corpos de prova e termômetro de 20°C até -124°C.



Figura 31 – Materiais para auxiliar o ensaio Charpy – V foram: a) Pinça e b) isopor com termômetro.

Por fim, a máquina utilizada para o ensaio Charpy-V foi fabricada na Alemanha, *Mohr & Federhaff AG, Mannheim – Germany, Pendulum Impact Testing Machine;*



tipo PSW 30/15; número da máquina 1434.



Figura 32 – Máquina realizada o ensaio Charpy-V e especificação da mesma.

Prestou-se muita atenção para a trava de segurança da máquina, para que o pêndulo não abaixasse em horas indesejadas, prevenindo, assim, acidentes. Foi respeitada também a faixa amarela de segurança da máquina, conforme a realização do ensaio, ver Figura 32. A trava de segurança foi ampliada, ver Figura 33, para uma visualização e nível de curiosidade maior. Ainda na Figura 33 pode-se visualizar o local onde foram colocados os corpos de prova para o impacto.



Figura 33 – Algumas funções da máquina Charpy: a) Trava de segurança b) Local onde os corpos de prova sofrem o impacto.

As Tabelas de 9 a 13 apresentam os resultados de todos os ensaios de impacto Charpy realizados, a partir das quais foram confeccionadas as curvas de transição de energia com a temperatura de cada condição, apresentadas na Figura 34.

Tabela 9- Resultados do ensaio Charpy para o corpo de prova a 90° Transversal.

90° Transversal				
	Nitrogênio -180° C (J)	Gelo seco + Álcool -77° C (J)	Gelo 0° C (J)	Gelo + Sal -21° C (J)
	4,90	293,32	292,34	293,32
	3,92	249,17	293,32	293,32
	4,90	293,32	294,30	
	4,90	293,32		
	3,92	293,32		
	3,92	274,70		
	4,90	293,32		
		293,32		
Média	4,48	285,47	293,32	293,32

Tabela 10 - Resultados do ensaio Charpy para o corpo de prova a 90° Longitudinal.

90° Longitudinal				
	Nitrogênio -180° C (J)	Gelo seco + Álcool -80° C (J)	Gelo 0° C (J)	Gelo + Sal -21° C (J)
	3,924	280,566	294,3	293,319
	2,943	293,319	292,338	293,319
	6,867		293,319	
	4,905			
	3,924			
Média	4,5126	286,9425	293,319	293,319

Tabela 11 - Resultados do ensaio Charpy para o corpo de prova a 180° Transversal.

180° Transversal				
	Nitrogênio -180° C (J)	Gelo seco + Álcool -80° C (J)	Gelo 0° C (J)	Gelo + Sal -21° C (J)
	3,924	293,319	293,319	293,319
	3,924	293,319	293,319	292,338
	3,924	287,433		
	5,886	293,319		
	4,905	293,319		
	4,905	293,319		
	3,924	293,319		
	3,924	293,319		
Média	4,4145	292,58325	293,319	292,8285

Tabela 12 - Resultados do ensaio Charpy para o corpo de prova na solda.

	Solda			
	Nitrogênio -180° C (J)	Gelo seco + Álcool -80° C (J)	Gelo 0° C (J)	Gelo + Sal -21° C (J)
	4,905	33,354	225,63	229,554
	4,905	36,297		
	3,924	100,062		
		78,48		
Média	4,578	62,04825	225,63	229,554

Tabela 13 - Resultados do ensaio Charpy para 180° Longitudinal.

	180° Longitudinal			
	Nitrogênio -180° C (J)	Gelo seco + Álcool -80° C (J)	Gelo 0° C (J)	Gelo + Sal -21° C (J)
	3,924	293,319	293,319	293,319
	3,924	293,319	293,319	293,319
	3,924	293,319		
	3,924	293,319		
	3,924	293,319		
	4,905	293,319		
Média	4,0875	293,319	293,319	293,319

Para um maior entendimento dos dados apresentados foi traçado a curva da Energia de Impacto versus Temperatura das Tabelas de 9 a 13, o que permitiu a conclusão deste trabalho.



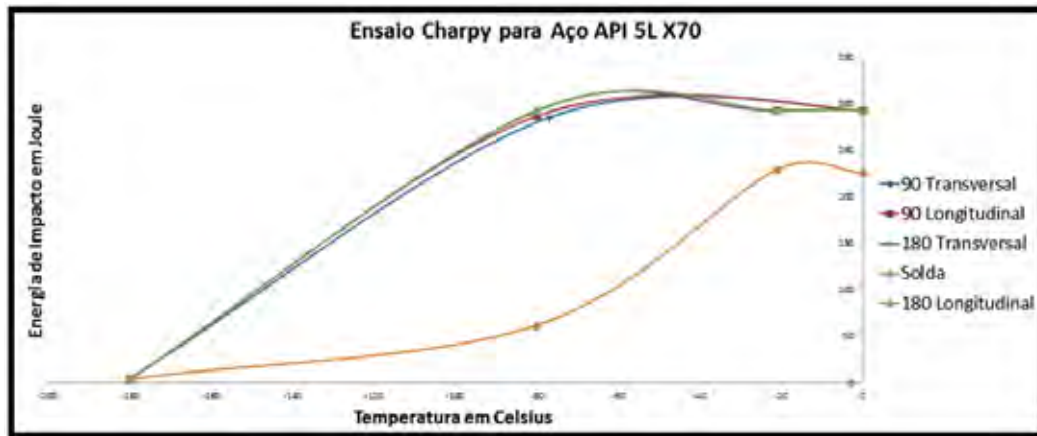


Figura 34 – Resultados das Tabelas de 9 a 13 – Energia de Impacto (J) x Temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ).

Pode-se concluir através da Figura 34 que o metal base apresentou maior resistência ao impacto para temperaturas mais baixas, como era de se esperar. Uma possível explicação para a proximidade das curvas seria a similaridade da geometria dos grãos, ou baixa anisotropia, corroborado pelos resultados dos ensaios de tração cilíndricos. Observa-se também que a solda apresentou, comparada ao metal base, menor resistência ao impacto. Assim, para uma temperatura de  $-80^{\circ}\text{C}$ , a solda é frágil, enquanto que o metal base é dúctil.

Os corpos de prova que não romperam apresentaram característica dúctil, conforme pode ser observado na Figura 35a). Todos os corpos de prova que romperam apresentaram características frágeis, como pode ser observado na Figura 35 b).



Figura 35 – Corpos de prova que não se romperam a) e os quais romperam apresentando características frágeis.

## CONCLUSÕES

Este trabalho teve como principal objetivo a avaliação da tenacidade no metal base e na solda de um tubo de aço API 5L X70. O experimento proporcionou uma análise adequada do corpo de prova segundo os objetivos propostos. Seguindo os procedimentos do ensaio Charpy e da norma ASTM – E23, foi possível obter a energia de impacto de um corpo de prova com entalhe em V e através desta conseguiu-se traçar o gráfico Energia de Impacto x Temperatura. A partir da análise deste último, conclui-se que o metal base resiste mais ao impacto a temperaturas mais baixas quando comparadas à solda.

No ensaio de tração, os resultados obtidos no material em estudo atendem à norma API 5L. O ensaio metalográfico permitiu visualizar a solda, o metal base e a zona termicamente afetada. Os resultados dos ensaios de microdureza destacaram as variações entre o material base e a região da junta soldada, sendo esta última mais dúctil. Por fim, através das micrografias, pode-se observar a variação dos grãos, a transição do metal base para a zona termicamente afetada e a solda.

## REFERÊNCIAS

- ABRIL. Disponível em: <<http://mundoestranho.abril.com.br/materia/como-foi-formada-a-camada-do-presal>>. Acesso em: 16 out. 2012.
- AMIGONERD. Disponível em: <<http://amigonerd.net/trabalho/26212-soldagem-por-arco-submerso>>. Acesso em 22 de out. 2012.
- ARAÚJO,W.; FORTES, C., Metalurgia da soldagem. ESAB BR, Assistência Técnica Consumíveis e Desenvolvimento e Pesquisa, 2004.
- CIMM. Disponível em: <[http://www.cimm.com.br/portal/noticia/exibir\\_noticia/7379-ensaio-charpy-mede-a-resistencia-dos-materiais](http://www.cimm.com.br/portal/noticia/exibir_noticia/7379-ensaio-charpy-mede-a-resistencia-dos-materiais)>. Acessado em 2 de nov. 2012.
- CUNHA, L. J. G. da. SOLDA: como, quando e por quê. 2.ed, Porto Alegre: D. C. Luzzatto, 1989, 260p.
- ELEMENTOS DE LIGA. Disponível em: <<http://pt.scribd.com/doc/56379661/Influencia-dos-Elementos-de-Liga-Nos-Acos>>. Acesso em 30 de out. 2012.
- FOLHA. Disponível em: <<http://www1.folha.uol.com.br/mercado/822358-nova-descoberta-do-pre-sal-pode-dobrar-reservas-de-petroleo-no-brasil.shtml>>. Acesso em: 16 out. 2012.
- GARCIA, A.; SPIM J. A.; SANTOS C. A. Ensaio dos materiais. 1. ed. Rio de Janeiro, 2000, 247p.
- GOMES, R. V. B., Efeito da profundidade do entalhe nos fenômenos das separações em aços de laminação controlada. 2009. 62f. Projeto de formatura para obtenção do grau de Bacharel em engenharia metalúrgica – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro,2009.
- GORNI. Disponível em: < [http://www.gorni.eng.br/Gorni\\_CCM\\_Mar2010.pdf](http://www.gorni.eng.br/Gorni_CCM_Mar2010.pdf)>. Acesso em 22 de out. 2012.
- IMPACTO. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAABXT4AH/relatorio-resistencia-dos-materiais-ensaio-impacto>>. Acesso em 2 de nov. 2012.
- ISOTÉMICA. Disponível em: <http://dc118.4shared.com/doc/L2KZndmW/preview.html>. Acesso em 9 de dez. 2012.

- JUNIOR, E. H., Investigação Experimental do comportamento dúctil de aços API-X70 e aplicação de curvas de resistência J-Δa para previsão de colapso em Dutos. Tese para obtenção do título de Doutor em Engenharia – Escola Politécnica do Campus de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.
- KOU, S. Welding Metallurgy. 2nd. ed. USA: John Willey & Sons 2002. 467p.
- LAMINAÇÃO, R. Brasil insiste em desconhecer as riquezas do nióbio. Disponível em: <<http://pt.scribd.com/language?destination=http://pt.scribd.com/doc/91200550/5/Laminacao-Controlada&id=pt-br>>. Acesso em 22 de out. 2012.
- LIGAS. Disponível em: <[http://www.cimm.com.br/portal/material\\_didatico/6362-elementos-quimicos-presentes-e-sua-influencia#.UJApZ8XR4\\_Y](http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6362-elementos-quimicos-presentes-e-sua-influencia#.UJApZ8XR4_Y)>. Acesso em 30 de out. 2012.
- MAXWELL. Disponível em: <[http://www.maxwell.lambda.ele.puc-rio.br/12414/12414\\_3.PDF](http://www.maxwell.lambda.ele.puc-rio.br/12414/12414_3.PDF)>. Acesso em 22 de out. 2012.
- NAKASUGI, H.; MATSUDA, H.; TAMAHITO, H. Steels for Line Pipe and Pipeline Fittings. Metals Society, v.90, 1973.
- OXICORTE. Disponível em: [www.infosolda.com.br/download/62ddm.pdf](http://www.infosolda.com.br/download/62ddm.pdf). Acesso em 11 de nov. 2012.
- REVISTA INTERMARKET. Disponível em: <<http://www.revistaintermarket.com.br/materia.php?id=930>>. Acesso em 10 de nov. 2012.
- Ribbeler, R. C.; Cozaciuc, I; Silva, L. R.;Togni, M. A. Laboratório de Resistência dos Materiais - e da apostila extra da Biblioteca Virtual da USP, 2006.
- SANT'ANNA, P. C. Influência de tratamentos térmicos intercríticos na microestrutura e propriedades mecânicas do aço API 5L X65. 2006. 147f. Dissertação (Doutorado em Engenharia Mecânica – Materiais e Processos de Fabricação) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.
- SCRIBD. Disponível em: <<http://pt.scribd.com/doc/28737262/Desafios-Na-Soldagem-de-Tubulacoes>>. Acesso em out.2012.

- SHIGA, C.; KAMADA, A.; HATOMURA, T.; HIROSE, K.; KUDOH, J.; SEKINE, T. Development of large diameter high strength line pipes for low temperature services. Kawasaki Steel Technical Report, n.4, Dec. 1981.
- SOUZA, S. A. Ensaios Mecânicos de materiais metálicos. 5 ed, São Paulo: Edgard Blucher, 1982, 286p.
- TBG. Disponível em: <<http://www.tbg.com.br>>. Acesso em: 16 out. 2012.
- TORRICO, I. F. A. Tenacidade à fratura em condições elastoplásticas com corpos de prova não normalizados para aços API 5L: Análise numérica e experimental. 2006. 160 f. Dissertação (Doutorado em Engenharia Mecânica – Materiais e Processos de Fabricação) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.
- TOYODA, M. – Fracture Toughness Evaluation of Steel Welds, Osaka University Report, 1989.
- WINSOR, F. J. Welding of Low-Alloy Steels. Welding, Brazing and Soldering. American Society for Metals, ASM Handbook, Metals Park, Ohio, v. 6, pp. 662-676, 1984.