



Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP
Escola de Minas
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais
Campus Morro do Cruzeiro
Ouro Preto – Minas Gerais – Brasil



MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO

EM ENGENHARIA METALÚRGICA

**“AVALIAÇÃO DO EFEITO DE ELEMENTOS DE LIGA NA
FABRICAÇÃO E SOLDAGEM DE AÇOS API DE ALTA RESISTÊNCIA
MECÂNICA – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA”**

Igor da Costa e Silva

Ouro Preto, Setembro de 2022

Igor da Costa e Silva

Avaliação do efeito de elementos de liga na fabricação e soldagem de aços API de alta resistência mecânica - Revisão bibliográfica

Monografia de Graduação apresentada para o curso de Engenharia Metalúrgica da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro Metalúrgico.

Orientador: Prof. D.Sc. Rodrigo Rangel Porcaro

Ouro Preto, Setembro de 2022



FOLHA DE APROVAÇÃO

Igor da Costa e Silva

Avaliação do efeito de elementos de liga na fabricação e soldagem de aços API de alta resistência mecânica - Revisão bibliográfica

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Metalúrgico

Aprovada em 02 de Setembro de 2022

Membros da banca

Dr. - Rodrigo Rangel Porcaro - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)
Dr. - Gilberto Henrique Tavares Álvares da Silva - (Universidade Federal de Ouro Preto)
Engenheiro Metalurgista - Salvatore Giuliano Peixoto Tropia de Abreu - (REDEMAT)

Rodrigo Rangel Porcaro, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 15/09/2022



Documento assinado eletronicamente por **Rodrigo Rangel Porcaro, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 15/09/2022, às 11:55, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0398523** e o código CRC **A93CF24E**.

RESUMO

A necessidade de novos materiais para construção de tubos de linha para as indústrias de óleo e gás exigiu dos fabricantes o desenvolvimento de tecnologias que possibilitassem a criação de aços de elevada resistência mecânica. Os tubos de alta resistência mecânica transportam materiais em condições adversas por ambientes variados e com diferentes níveis de pressão. O processo de soldagem destes aços requer bom entendimento de suas microestruturas bem como de suas composições químicas. Neste contexto diversas fontes na literatura foram utilizadas para avaliar o desenvolvimento dos aços de alta resistência mecânica e a importância da adição de elementos de liga em seus processos de fabricação e soldagem. A pesquisa incluiu estudos publicados entre os anos de 1967 e 2021, por meio de leitura de revistas científicas, artigos científicos, livros acadêmicos e monografias relacionadas ao tema. Os estudos demonstram que o processo de fabricação, assim como a adição de elementos de liga, são capazes de alterar as propriedades mecânicas dos aços e também influenciar na formação de suas microestruturas durante o processo de soldagem, possibilitando, entre outros, melhoria da tenacidade em suas ZAC. Desta maneira, conclui-se que os estudos sobre a adição de elementos de liga em aços de alta resistência mecânica são capazes de melhorar propriedades mecânicas destes aços, possibilitando sua aplicação em tubos de linha para diferentes modelos de indústrias. O desenvolvimento desses estudos ao longo dos anos tem como objetivo a produção de aços com elevada resistência mecânica, melhor soldabilidade e tenacidade, sendo possível através da adição de elementos de liga, da redução do carbono equivalente e de mecanismos de endurecimento atrelados a processos de laminação controlada.

Palavras-chaves: API 5L, Soldagem, Aços Microligados; Microestruturas.

ABSTRACT

The need for new materials for the construction of line pipes for the oil and gas industries allowed manufacturers to develop technologies that enabled the creation of high mechanical strength steels. The high mechanical resistance tubes transport materials in adverse conditions, through environments of the most varied conditions and at different levels of pressure. The welding process of these steels requires a good understanding of their microstructures as well as their chemical compositions. Next context several academic materials were used to evaluate the development of high mechanical strength steels and the importance of the addition of alloying elements in their manufacturing and welding processes. The research included studies published between 1967 and 2021, through reading scientific journals, scientific articles, academic books and undergraduate thesis related to the topic. The studies show that the manufacturing process, as well as the addition of alloying metals, are able to change the mechanical properties of steels and also influence the formation of their microstructures during the welding process, enabling, among others, improvement of toughness in steels their ZAC. In this way, it is concluded that studies on the addition of alloying elements in high mechanical strength steels are capable of improving mechanical properties of these steels, allowing their application in line tubes for different models of industries.

Keywords: API 5L, Welding, Microalloyed Steels,

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Desenvolvimento dos Aços API 5L desde o grau X-42.	11
Figura 2 - Ilustração do processo de laminação dos aços API 5L com e sem o resfriamento acelerado.	15
Figura 3 - Desenvolvimento de Aços API 5L, Rotas de Produção e seus Elementos de Liga.	16
Figura 4 - Microestrutura de normalização, laminação controlada convencional e resfriamento rápido.	16
Figura 5 - Montagem de tubulações de aço pelo processo de soldagem oxiacetileno no início da década de 1920.	23
Figura 6 - Microestrutura dos aços TiN, TiO e HTUFF.	32
Figura 7 - Grãos de austenita de aço TiO e HTUFF aquecidos a 1400°C por 1 minuto.	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Diferenças entre os tubos API 5L PSL 1 e PSL 2 com base nas propriedades mecânicas.....	12
Tabela 2 - Composição química do aço para dutos de grau X70 a X120.....	18
Tabela 3 - Propriedades mecânicas de dutos dos aços de grau X70 a X120.....	19
Tabela 4 – Processos de soldagem de acordo com o nível de especificação dos aços de tubulação ARBL.....	22
Tabela 5 – Falhas em soldagem de Tubos API 5L e suas respectivas causas.....	28
Tabela 6 – Métodos para melhoria da resistência na ZAC em tubulações API 5L.....	32

LISTA DE SIGLAS

API – Instituto Americano de Petróleo
ARBL – Aço Alta Resistência e Baixa Liga
AS – Soldagem a Arco Submerso
ASM - Sociedade Americana de Metais
BISRA – Associação Britânica de Pesquisa de Ferro e Aço
CE – Carbono Equivalente
ERW – Soldagem por Resistência Elétrica
FCAW – Soldagem com Arame Tubular
GMAW/ (MIG/MAG) – Soldagem a Arco Elétrico com Atmosfera de Proteção Gasosa
GTAW/TIG – Soldagem por Arco de Tungstênio com Blindagem a Gás/Gás Inerte de Tungstênio
HTP – Processo de Alta Temperatura
MA – Martensita-Austenita
MB – Metal Base
MS – Metal Solda
PSL – Níveis de Especificação do Produto
RA – Resfriamento Acelerado
SMAW – Soldagem a Arco Elétrico com Eletrodo Revestido
TMCP – Processo Termomecânico Controlado
TMCR – Laminação Termomecânica Controlada
ZAC – Zona Afetada pelo Calor
ZTA – Zona Termicamente Afetada

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	7
2 OBJETIVOS.....	9
2.1 Objetivo Geral	9
2.2 Objetivo Específicos.....	9
3 DESENVOLVIMENTO.....	10
3.1 Tipo de estudo	10
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
4.1 História e desenvolvimento dos Aços de Alta Resistência e Baixa Liga	11
4.1.1 Composição Química	16
4.2 Efeito dos elementos de liga nos aços API de elevada resistência mecânica.....	19
4.3 Processo de soldagem para Tubos API 5L	22
4.3.1 Processos de Soldagem para Tubos API.	22
4.3.1.1 Processo de Soldagem para Fabricação de Tubos API.....	24
4.3.1.2 Processo de Soldagem em Campo de Tubos API.....	24
4.3.2 Soldabilidade	26
4.4 Efeito dos elementos de liga na soldagem dos aços API 5L	30
5 CONDISERAÇÕES FINAIS	33
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	34

1 INTRODUÇÃO

O Avanço populacional contribuiu para o desenvolvimento das indústrias de petróleo e gás em diversos países (SHARMA; MAHESHWARI, 2016). Estas atividades estão atreladas ao crescimento econômico, conseqüentemente a busca por estes produtos tem aumentado significativamente. Dessa maneira, a necessidade de transportar tais materiais de zonas remotas aos grandes centros urbanos se tornou um desafio tanto às indústrias exploradoras dos bens quanto aos fabricantes de dutos. Assim, para obter um negócio viável economicamente e ambientalmente sustentável, é de suma importância identificar a relação custo/rendimento/benefício. Com o uso de aços de alta resistência mecânica se tem a redução dos custos, sendo possível obter melhores resultados econômicos, viabilizando a relação citada anteriormente (SILVA, 2009).

O transporte através de dutos é o método mais econômico para o deslocamento de materiais como óleo e gás, entretanto, este deve ser realizado de maneira confiável e segura, evitando danos ambientais e econômicos. Tubos com elevada resistência mecânica e grandes diâmetros são comumente utilizados na construção de linhas de dutos terrestres. Durante a operação, os dutos são submetidos a elevadas pressões o que exige das empresas constante desenvolvimento em seus processos de fabricação (JUNIOR *et al.*, 2013).

Os Aços API 5L são aços do tipo ARBL (Alta Resistência e Baixa Liga), especificados como aços microligados, estes são aqueles que apresentam pequenas proporções de elementos de liga em sua composição. Normalmente se utiliza elementos como nióbio, titânio, vanádio, o que permite melhor controle microestrutural, e assim, ganhos relevantes nas propriedades mecânicas. (GUIMARÃES, 1997). Tais elementos permitem que o aço apresente boa tenacidade, boa conformabilidade, boa soldabilidade e boa resistência a trincas induzidas pelo hidrogênio.

Assim, aços de alta resistência mecânica e baixa liga, são aplicados em dutos para diferentes modelos de indústria, principalmente refinarias e plataformas de petróleo, além de servir a outras destinações, tais como, vagões, estruturas navais, componentes automotivos, construção civil, entre outros (CHEN, 1984; AKSELSEN, 1990).

O Instituto Americano de Petróleo (API) é o órgão que especifica a fabricação de tubos

para dutos através da norma API 5L (JUNIOR et al, 2013). A norma exige que os aços sejam produzidos com as melhores práticas, com elevada limpidez, assegurando sua aplicação em atividades nas quais uma boa tenacidade é um requisito essencial. Dessa maneira, um aço para ser caracterizado como API 5L tem que obedecer a condições de composição química, tenacidade e controle dimensional (ALBUQUERQUE *et al.*, 2012). Segundo a norma existem diversas classes para tubos API 5L, e para cada classe de alta resistência mecânica tem-se uma identificação dada por: X seguido do valor numérico de seu limite de escoamento dado em ksi (BRITO, 2000).

A Sociedade Americana de Metais (ASM), especifica que aços de baixa liga que apresentam resistência ao escoamento de no mínimo 290 MPa é considerado e se enquadra na categoria como aço de alta resistência mecânica (ASM Metals Handbook, 1994).

Para a soldagem dos aços ARBL, é necessário entender questões relacionadas à soldabilidade, sendo de extrema importância saber características sobre as composições químicas e propriedades mecânicas (SHARMA; MAHESHWARI, 2016).

Neste contexto, a soldagem dos aços API 5L com elevada resistência mecânica deve ser estudada e desenvolvida, não somente em relação às propriedades e a soldabilidade do aço, mas também de maneira mais abrangente, englobando entre outros: qualidade, custo, produtividade, viabilidade e facilidade de execução, sempre em atendimento as normas aplicáveis (JUNIOR *et al.*, 2013).

Considerando tudo isso, propõe-se uma revisão bibliográfica sobre a soldagem de aços API 5L de alta resistência mecânica, com destaque para os efeitos dos elementos de liga e seus efeitos na soldabilidade, evolução microestrutural e propriedades mecânicas das juntas soldadas.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é fazer uma revisão bibliográfica sobre o desenvolvimento dos procedimentos de soldagem dos aços API 5L de alta resistência mecânica utilizados na produção de tubulações das indústrias de óleo e gás.

2.2 Objetivo Específicos

De forma a atingir o objetivo geral foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- a) Avaliar a história de desenvolvimento dos aços API;
- b) Avaliar os efeitos de elementos de liga em aços API de alta resistência mecânica;
- c) Avaliar os processos de soldagem para tubos de aços API 5L;
- d) Avaliar o efeito de elementos de ligas na soldagem dos aços de alta resistência mecânica.

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 Tipo de estudo

A monografia desenvolvida seguiu os parâmetros estabelecidos para estudo exploratório, por meio de pesquisa bibliográfica desenvolvida através de materiais já elaborados como artigos científicos e dissertações de mestrado e doutorado.

PASSO 1 – Fontes

A seguir estão descritas as fontes que fornecerem as respostas adequadas à solução do problema proposto. Nesta etapa tem-se o acervo pesquisado e suas informações:

- a) Foram utilizados 48 artigos científicos sobre o conteúdo e que foram acessados pelo Google Scholar publicados nos últimos 54 anos (1967 a 2021). O foco das pesquisas foram os temas: Desenvolvimento dos aços API, Soldabilidade dos aços de alta resistência mecânica, Elementos de liga em aços ARBL. Nesta pesquisa contemplaram 32 artigos em língua inglesa e 16 artigos em língua portuguesa.
- b) Uma dissertação de mestrado foi consultada sobre o assunto: Tenacidade à Fratura da Junta Soldada Obtida a Arco Submerso de Aço API 5L X80, publicada no ano 2005, disponível em Scientific Electronic Library Online.
- c) Uma dissertação de doutorado foi consultada sobre o assunto: Determinação experimental da tenacidade à fratura da zona termicamente afetada de junta soldada de aço API 5L X80, publicada no ano 2000, disponível em Google Scholar.

PASSO 2 – Seleção de Dados

Para se obter os dados foram realizadas pesquisas através da internet, abordando os assuntos, sendo elas:

- a) Leitura exploratória dos materiais escolhidos através de rápidas leituras, identificando se o material acrescentava informações ao trabalho;
- b) Leitura seletiva dos materiais selecionados identificando os trechos mais relevantes a serem utilizados como base;
- c) Registro das informações pesquisadas, tais como títulos, autores e metodologias.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A finalidade dessa Revisão Bibliográfica é embasar tecnicamente o trabalho com informações sobre o desenvolvimento, a evolução e produção de aços API de elevada resistência mecânica além das consequências da presença de elementos de liga na soldagem destes aços.

4.1 História e desenvolvimento dos Aços de Alta Resistência e Baixa Liga

Os tubos API 5L são fabricados em aço carbono e são desenvolvidos principalmente para a indústria de óleo e gás, possibilitando o transporte destes materiais através de sistemas dutoviários. Os aços utilizados na produção destes tubos, a partir do grau X42 são do tipo ARBL, aços de alta resistência e baixa liga, também conhecidos como aços microligados. Estes possuem adição de pequenas quantidades de elementos de ligas, o que permite se obter limite de escoamento acima de 40ksi na condição laminada, tendo como característica uma boa relação resistência mecânica e tenacidade. O limite máximo considerado de elementos de liga em aços ARBL são de 2% de elementos totais e 0,2% de carbono. A Figura 1 detalha a evolução dos aços API 5L a partir da década de 1950.

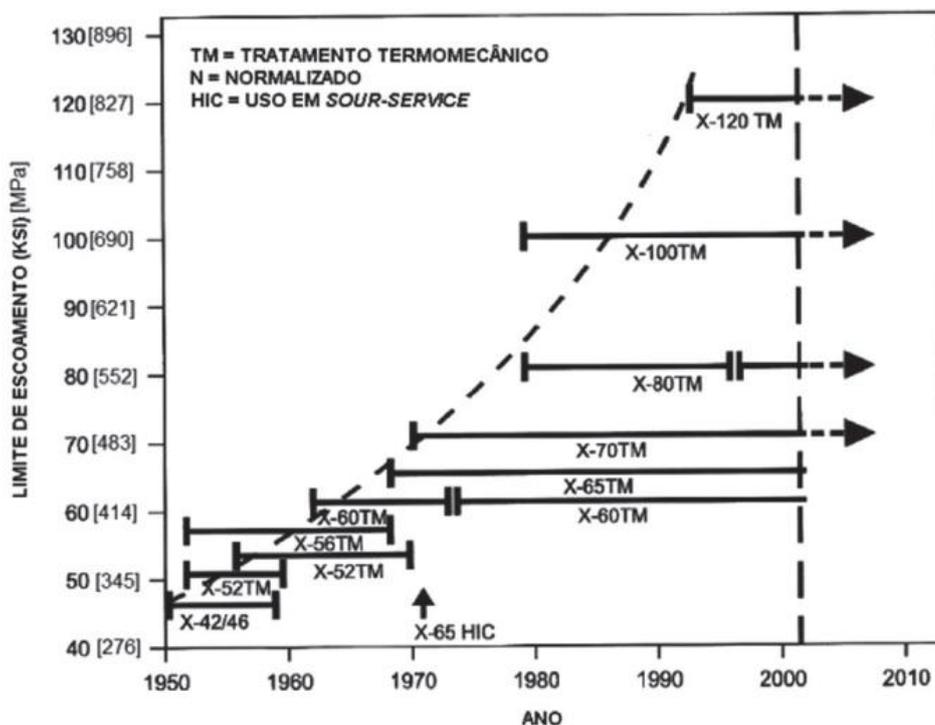


Figura 1- Desenvolvimento dos Aços API 5L desde o grau X-42 (MALCOLN, 2007).

Os aços API 5L possuem boa soldabilidade devido ao seu baixo teor de carbono quando comparados aos aços carbono convencionais. Como consequência, por possuir maior resistência mecânica, a espessura da parede dos tubos produzidos pode ser diminuída, reduzindo assim o seu peso e seus custos construtivos (JUNIOR *et al.*, 2013).

De acordo com a norma API 5L, os materiais dos tubos de linha são fabricados ou fornecidos com dois níveis de especificação de produto (PSL) conhecidos, sendo eles PSL 1 e PSL 2. A diferença entre eles é que os PSL 1 possuem especificações mínimas para a resistência ao escoamento e à tração, e não exige limites especificados para o carbono equivalente, diferentemente do que ocorre com o grau PSL 2, que possui requisitos obrigatórios para o carbono equivalente, além de exigir limites maiores para a resistência ao escoamento e à tração. Outra diferença está no tipo de extremidade de cada um, os tubos PSL 1 podem ser fabricados com pontas do tipo lisa ou roscável, enquanto os tubos PSL 2 são produzidos apenas com extremidades planas (SHARMA; MAHESHWARI, 2016).

A Tabela 1 fornece informações sobre as propriedades mecânicas, tais como resistência ao escoamento e à tração, de tubos API 5L.

Tabela 1 – Diferenças entre os tubos API 5L PSL 1 e PSL 2 com base nas propriedades mecânicas (INSTITUTO AMERICANO DE PETROLEO, 2012).

Tubo API 5L	Resistência ao escoamento, Mínima (MPa)	Resistência ao escoamento, Máxima (MPa) apenas para PSL 2	Resistência à tração, Mínima (MPa)	Resistência à tração, Máxima (MPa) apenas para PSL 2
X42	290	496	414	758
X46	317	524	434	758
X52	359	531	455	758
X56	386	544	490	758
X60	414	565	517	758
X65	448	600	531	758
X70	483	621	565	758
X80 (para PSL2)	552	690	621	827
X90 (para PSL2)	625	775	695	915
X100 (para PSL2)	690	840	760	990
X120 (para PSL2)	830	1050	915	1145

Nos aços ARBL a adição de elementos de liga promove um efeito de endurecimento, assim, o teor de carbono pode ser reduzido, proporcionando melhor soldabilidade e boa

tenacidade à fratura (AKSELSSEN et al., 1987; AKSELSSEN et al., 1988). A soldabilidade do aço é fortemente dependente da composição química e pode ser quantificada por meio do cálculo do carbono equivalente, CE. Este, relaciona a soldabilidade com a temperabilidade do aço. Quanto maior o valor do CE mais temperável é o aço, e consequentemente, diminui sua soldabilidade (GRONG; MATLOCK, 1986).

Na especificação de dutos de linha, a API determinou que os limites CEIIW serão considerados quando a fração de massa de carbono for maior que 0,12%. Já CEPcm será adotada quando a fração de massa de carbono na composição do aço for menor ou igual a 0,12% (INSTITUTO AMERICANO DE PETRÓLEO, 2012).

$$CE_{IIW} = \%C + \frac{\%Mn}{6} + \frac{\%Cr + \%Mn + \%V}{5} + \frac{\%Ni + \%Cu}{15}$$

$$P_{cm} = \%C + \frac{\%Si}{30} + \frac{\%Cr + \%Mn + \%Cu}{20} + \frac{\%Ni}{60} + \frac{\%Mo}{15} + \frac{\%V}{10} + 5B$$

A resistência mecânica e a tenacidade a fratura resultam da combinação de uma microestrutura formada por grãos finos, alta densidade de discordância (geradas pela deformação a frio do material), endurecimento por precipitação (causado por carbonetos de titânio, vanádio ou nióbio, finamente dispersos na matriz), além de uma textura adequada. A adição de elementos microligantes permitiu, inicialmente, uma significativa redução no carbono equivalente. Porém, uma maior redução no carbono equivalente tornou-se possível com procedimentos de melhoria no processo termomecânico, como a laminação controlada, entre outros (ASKSELSSEN, 1988; ASKSELSSEN, 1990).

Na Europa, entre as décadas de 1950 e 1960 iniciaram-se os estudos para o desenvolvimento dos aços ARBL pelo BISRA (Associação Britânica de Pesquisa de Ferro e Aço). Paralelamente, em 1948, se introduzia a especificação API 5LX, apenas com tubos de grau X42. Em 1959, nos Estados Unidos, ocorreram avanços nos estudos e na fabricação de aços API, sendo desenvolvido o primeiro aço X52 microligado, contendo baixo teor de carbono e endurecido pela adição de elementos microligantes, tais como: nióbio e vanádio, na ordem de 0,10% (JUNIOR et al, 2013).

Até o fim dos anos de 1960 a rota de produção dos aços API 5L se baseava na laminação a quente seguida de normalização, este processo tinha como objetivo obter estruturas

compostas de finas lamelas de austenita, perlita e maiores grãos de ferrita. Já em meados dos anos 70 foi introduzida a rota de produção TMCR (Thermomechanical Controlled Rolling - Laminação controlada). Nesta nova rota foi possível produzir aços com maiores valores de tenacidade, como o grau X70 microligado ao nióbio e vanádio, obtendo aços com microestrutura ferrita+perlita, grãos refinados e baixo teor de carbono. Observa-se uma redução de custos neste processo, uma vez que a etapa de normalização não é mais necessária. (JUNIOR *et al.*, 2013).

Já nos anos de 1980, foram produzidos os aços da classe API 5L X80, microligados ao Mo, Nb e Ti. Este, quando comparados aos aços API 5L X70, permitiu a produção de um sistema de dutos com espessura de parede mais fina, além de atuar em condições de pressão de operação maiores (LIU; BHOLE, 2013). A obtenção dos aços API 5L X80 se deu através do aperfeiçoamento da rota de fabricação do processo TMCR, sendo possível produzir um novo aço com menores teores de carbono e com microestruturas do tipo ferrítica-bainítica ainda mais refinadas (FOSCA, 2003).

A evolução do processo TMCR ficou conhecida como TMCP (Thermomechanical Controlled Process - Laminação controlada seguido de resfriamento acelerado). O TMCP tem como objetivo criar grãos extremamente finos a partir da combinação de etapas de laminação com elevada precisão a uma temperatura específica. Este processo de refinamento do grão permite obtenção de resistência mecânica sem comprometimento da tenacidade, além de permitir a redução efetiva dos teores de carbono, desejável para materiais que sofrerão o processo de soldagem (LIU; BHOLE, 2013).

As adições de molibdênio, de cobre e níquel permitiram elevar o nível da resistência para a classe X100, quando o aço é processado em chapas pela laminação controlada seguido do resfriamento acelerado (RA). Para a fabricação do X100 e X120 comumente utiliza-se TMCP seguido de resfriamento acelerado, capaz de promover uma redução ainda maior do tamanho médio do grão e, conseqüentemente, aumento da resistência mecânica sem perda de tenacidade a fratura, e redução do teor de carbono do material (YSHII; CHIODO, 2007).

Abaixo, através da Figura 2, observa-se as etapas de laminação dos Aços API 5L, tal como o comportamento dos grãos de austenita durante este processo.

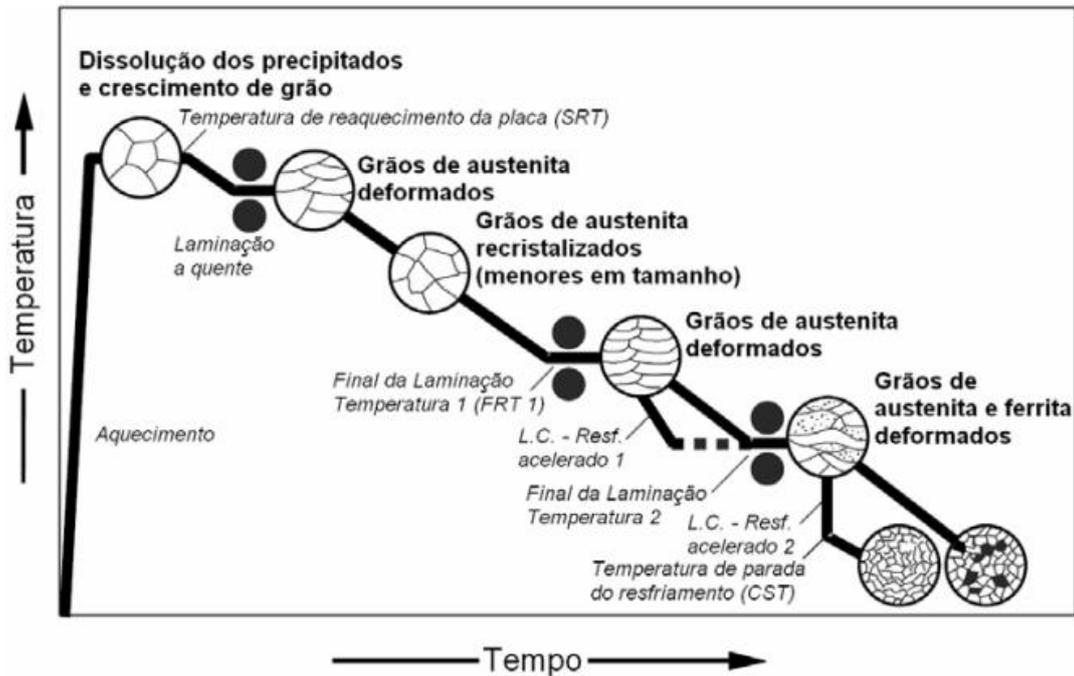


Figura 2 - Ilustração do processo de laminação dos aços API 5L com e sem o resfriamento acelerado (HILLENBRAND et al., 2001).

Soeiro Jr et. al. (2013) dizem que as classes X100 e X120 podem obtidas através da adição de maior quantidade de elementos de liga. Nestes aços deve-se diminuir o valor do carbono equivalente, a fim de proporcionar boa tenacidade e soldabilidade. Esta é a principal razão do uso preferencial de resfriamento acelerado com taxa de resfriamento incrementada ao invés da simples adição de elementos de liga. O aumento na taxa de resfriamento é mais eficaz na redução do tamanho de grão do que a adição de elementos de liga. Dentre os elementos utilizados no sistema de liga dos aços X100 e X120, o boro favorece a formação de microestruturas de bainita inferior e martensita. O teor de carbono não deve exceder 0,04% de modo a prevenir dureza elevada na linha de micro segregação central.

Além da adição de elementos de liga e das etapas de laminação, a soldagem é outro processo extremamente importante na formação das microestruturas destes aços. Os consumíveis de soldagem utilizados tais como as condições de preparo para execução da solda também devem ser levados em consideração antes de se prever o comportamento do aço durante e após o processo de soldagem (API ENERGY, 2008).

Através da figura 3 é possível identificar a evolução dos aços microligados, tais como a

adição dos elementos de liga e seus processos de fabricação ao longo dos anos. De forma complementar a figura 4 ilustra as características das microestruturas dos tubos em suas respectivas etapas de laminação.

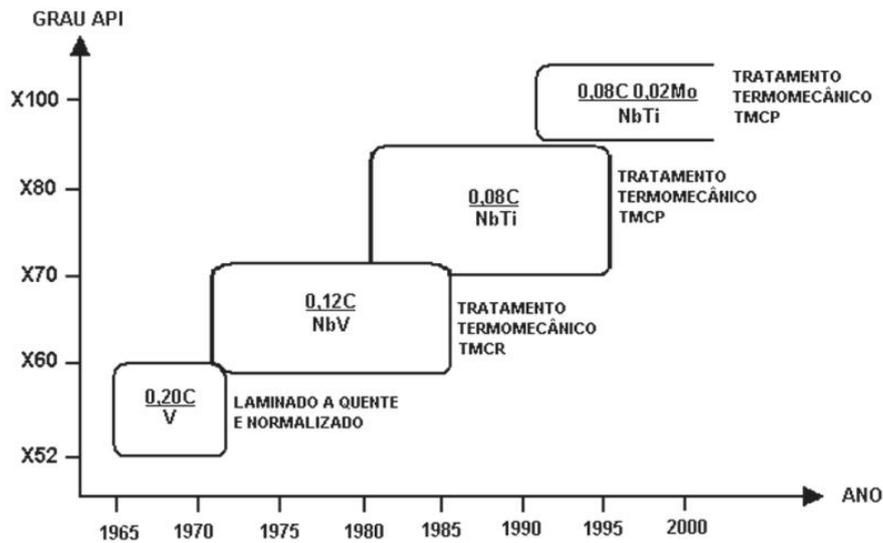
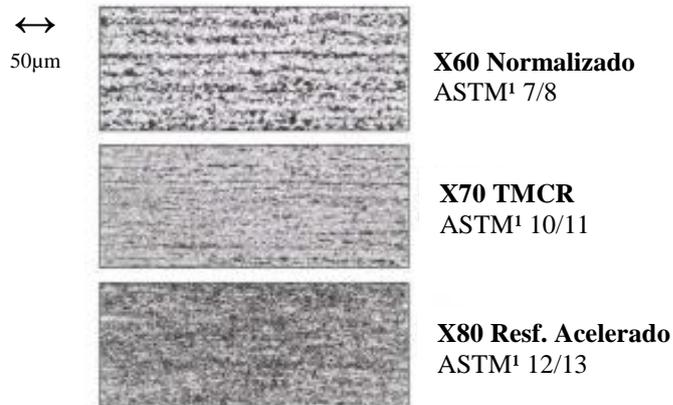


Figura 3 - Desenvolvimento de Aços API 5L, Rotas de Produção e seus Elementos de Liga (SICILIANO, 2008).



¹ASTM se refere ao tamanho do grão

Figura 4 - Microestrutura de normalização, laminação controlada convencional e resfriamento rápido (HILLENBRAND et al., 2001).

4.1.1 Composição Química

A composição química do aço determina as características para sua aplicação. Na fabricação dos aços o aumento do teor de carbono é o método mais econômico para a obtenção de uma boa resistência mecânica, principalmente no limite de escoamento,

porém, é inversamente proporcional quanto a tenacidade a fratura do mesmo, sendo extremamente prejudicial neste ponto (HULKA; HEISTERKAM, 2003).

Por toda sua importância no processo de fabricação, o carbono determina diretamente a microestrutura do aço, assim, baixos teores de carbono têm a função de evitar a precipitação elevada dos carbonetos e também refinar a microestrutura (RASANEM; TENKULA, 1982).

O Manganês é capaz de provocar o aumento da resistência mecânica e da resistência à fadiga (CALDEIRA *et al.*, 2005). Este elemento combinado ao enxofre produz inclusões alongadas no interior da matriz, estas podem atuar como concentradoras de tensões, diminuindo a ductilidade e a tenacidade a fratura (GRAY, 2007).

A adição de Silício promove aumento da resistência mecânica e à corrosão, entretanto como o C e o Mn, este elemento reduz a soldabilidade do aço. O Si juntamente com o Al é amplamente utilizado como desoxidantes (GRAY, 2007).

Inevitavelmente tem-se a presença de enxofre no processo de fabricação, elemento considerado como impureza residual. Este, diminui a ductilidade, a soldabilidade e a tenacidade à fratura, sendo extremamente prejudicial à microestrutura do aço (COSTA E SILVA; MEI., 2006).

O Fósforo, outro elemento considerado como impureza residual, aumenta o limite de escoamento e a resistência à corrosão, entretanto promove diminuição da tenacidade à fratura, da ductilidade e da soldabilidade (COSTA E SILVA; MEI., 2006). Além do mais este elemento tende a segregar durante o processo de solidificação do aço (CALDEIRA *et al.*, 2005; GRAY, 2007).

O Nióbio pode ser considerado como um dos principais elementos de liga dos aços microligados. Sua adição em pequenas quantidades aumentam os limites de resistência e escoamento. O mesmo faz com que os teores de carbono e manganês sejam diminuídos, viabilizando a produção de aços com baixos teores de carbono. Apesar de ser um importante elemento de liga, sua utilização em larga escala se restringe ao seu alto valor econômico (IMLAU; HEKKERT., 2007).

A adição de Titânio nos processos de fabricação promove o aumento do limite de resistência e melhora o desempenho em temperaturas mais elevadas (HONEYCOMBE, 1982).

A presença do Vanádio atua como estabilizador da ferrita, seus precipitados se formam em baixas temperaturas, sendo conseqüentemente mais finos (KORCHYNSKY, 2000).

A presença de Nióbio, Vanádio e Titânio juntos no processo de fabricação do aço não podem ser maiores que 0,1% para que não haja um endurecimento demasiadamente elevado, prejudicando as propriedades de cada um destes elementos, principalmente a tenacidade à fratura (RATNAPULI, 2007).

Pela tabela 2 é possível comparar a composição química dos aços API X70 e X80 fabricados por TMCP e os aços API X100 e X120 fabricados por TMCP seguido de resfriamento acelerado, utilizados no estudo de Liu e Bhole (2013).

Tabela 2 - Composição química do aço para dutos de grau X70 a X120 (LIU; BHOLE, 2013).

GRAU	X70	X80	X100	X120
C	0,095	0,075	0,06	0,03-0,06
Si	0,32	0,31	0,35	0,36
Mn	1,55	1,59	1,90	1,95
P	0,015	0,018	NE	NE
S	0,001	0,001	NE	NE
Nb	0,040	0,057	0,05	0,04
Ti	0,013	0,013	0,018	0,02
Al	0,030	0,026	NE	NE
V	0,06	NE	NE	NE
Mo	NE	0,22	0,28	0,20
Ni	NE	NE	0,25	NE
Cu	NE	NE	NE	NE
Cr	NE	NE	NE	NE
B (ppm)	2	NE	NE	10-20
N (ppm)	52	60	40	40
Ca (ppm)	8	11	NE	NE
Ceq	0,37	0,39	0,43	0,40-0,43

NE: Não Especificado

A Tabela 3 traz a relação entre as propriedades mecânicas dos aços API 5L X70, X80,

X100 e X120 sendo possível identificar as relações de tenacidade e resistência de cada um. Os aços X100 e X120 foram obtidos pelo processo TMCP acompanhado pelo RA, enquanto os demais foram fabricados pelo mesmo processo sem a etapa de RA.

Tabela 3 - Propriedades mecânicas de dutos dos aços de grau X70, X80, X100 e X120 (LIU; BHOLE, 2013).

Grau		X70	X80	X100	X120
Tamanho do Tubo	Espessura (mm)	5,2	3	16	15-18
Propriedades Mecânicas	Tensão de Escoamento (MPa)	580	685	752	843
	Tensão de resistência (MPa)	630	718	816	1128
	Alongamento (%)	35	28	18	14,3
Tenacidade ao impacto Charpy – entalhe V	Temperatura de Teste (°C)	10	-15	20	-40
	Energia (J)	70	32	270	227
	50% FATT ¹ (°C)	-100	<-125	NE	NE
NE: Não Especificado					

¹Temperatura de transição de fratura de aparência dúctil para 50% frágil medida no teste de impacto Charpy.

Nota-se que o resfriamento acelerado permite a criação de aços com elevada resistência à tração e tenacidade ao impacto com manutenção de um carbono equivalente mais baixo.

Dessa forma as diversas microestruturas permitem com que diferentes propriedades mecânicas sejam alcançadas em função da composição química e do processamento do material. Esta gama de microestruturas pode influenciar diretamente nas etapas de fabricação dos tubos, além de determinar etapas subsequentes de utilização do aço, como em processos que envolvem conformação plástica e soldagem (FERREIRA, 2021).

4.2 Efeito dos elementos de liga nos aços API de elevada resistência mecânica

Elementos de ligas são adicionadas aos aços visando ajustar suas propriedades de acordo com seu uso. Essas propriedades estão diretamente ligadas à melhora da resistência mecânica em ambiente de elevadas pressões, da tenacidade à fratura em baixas temperatura, além de facilitar no processo de soldagem. Para os aços regulamentados pela norma API 5L tem-se o acréscimo de elementos como: C, Mn, P, S, Cr, Nb, Cu, Mo, Ni, Si, Ti e V (SILVA, 2009).

A microestrutura dos aços ARBL é completamente dependente de suas composições químicas e dos processos de laminação/resfriamento acelerado. Para estes modelos de

aços encontram-se diferentes microestruturas, tais como: Ferrita Poligonal/Perlita, Ferrita Acicular, Bainita e Constituinte A-M (Austenita-Martensita) (COLLINS *et al.*, 1983).

A Ferrita Poligonal/Perlita é comumente encontrada em aços convencionais que não sofreram processo de resfriamento acelerado após a etapa de laminação. Os grãos de ferrita apresentam baixa densidade de discordâncias e são normalmente equiaxiais. A porcentagem e a distribuição de perlita nessas microestruturas são fortemente dependentes do teor de carbono e dos elementos de liga presentes. A Ferrita Acicular é uma ferrita não equiaxial. Quando se deseja obter esta microestrutura e a taxa de resfriamento é limitada opta-se por aumentar o teor de Mn (cerca de 2%) além da adição de Mo entre 0,25% e 0,35%, finalizando a obtenção desta microestrutura através do resfriamento até a temperatura ambiente.

A Bainita é uma microestrutura parecida com a ferrita acicular, sendo muito difícil sua diferenciação por meio da microscopia ótica. Suas ripas apresentam densidade de discordância e razão de aspecto mais elevadas que a ferrita acicular, sendo este um diferencial entre elas.

O Constituinte MA (Austenita-Martensita) é formado por minúsculas regiões de martensita com austenita retida, que podem vir a aparecer de maneira alongada ou massiva, sendo identificada por meio de microscopia eletrônica de varredura. Com ataque adequado, este constituinte se apresenta em alto relevo em relação à matriz e com contornos bem definidos. Quando presente em quantidades acima de 6% a 7% o constituinte reduz a tenacidade a fratura do aço (RATNAPULI; ALÍPIO, 1999).

Com a inclusão de elementos de liga, o campo austenita pode expandir ou contrair. Essa expansão está diretamente ligada aos elementos gamagênicos enquanto a contração está relacionada aos elementos alfa gênicos. Como exemplo, a adição de vanádio, contrai o domínio da austenita, precipitando na forma de carboneto de vanádio em equilíbrio no contorno da ferrita (HONEYCOMBE, 1982).

Existem duas categorias presentes na decomposição da austenita de aços que se submeteram a adição de elementos de liga, sendo que a primeira categoria, formada pelos elementos Ni, P, Si e Cu, não se precipitam em forma de carbonetos, permanecendo

apenas em solução sólida de ferrita o que possibilita a formação do constituinte MA (austenita/martensita). Já a segunda categoria é formada pelos elementos que se precipitam na forma de carbonetos na liga, tais como: Mn, Cr, Mo, V, Ti, W e Nb. Dessa forma, a ferrita é endurecida por solução sólida elevando a resistência mecânica do aço (HONEYCOMBE, 1982).

A adição de Ni e Cr em aços ARBL com baixos teores de carbono, possibilita o aumento da resistência mecânica, sendo que o Cr atua na formação da bainita. O nióbio eleva o refino de grãos, o que faz aumentar a temperatura de recristalização, possibilitando laminar o material em temperaturas elevadas. Este processo é conhecido como HTP (High Temperature Processing - Processo a alta temperatura). Nestes casos a laminação do aço termina na faixa de temperatura entre 860° a 820°C, sendo aplicado menos força na etapa de laminação (SICILIANO, 2008). Deve-se atentar que não basta apenas adicionar elementos de ligas para se garantir alta tenacidade a fratura aos aços para fabricação de dutos, sendo necessário também um bom controle na etapa de laminação BRITO *et al.*, 2003).

Para os aços ARBL, teores de carbono acima de 0,10% são evitados, uma vez que diminuem a ductilidade e a tenacidade a fratura, e, paralelamente, aumentam a probabilidade de defeitos superficiais, elevam a possibilidade de ocorrência de segregação durante a solidificação, além de aumentar a quantidade de perlita, o limite de resistência e o valor do carbono equivalente, sendo um complicador quanto a soldabilidade (IRVINE *et al.*, 1967).

Roza *et al.* (2006), citam que adições complementares de cromo e molibdênio são utilizadas a fim de diminuir o teor de carbono e manganês necessários para atingir a resistência mecânica necessária, evitando a formação de linha de segregação central.

O manganês atua como inibidor de produtos de transformação, como a ferrita poligonal, e aumenta a resistência mecânica da ferrita por solução sólida. Outro efeito ligado ao manganês é a eliminação da fragilidade a quente devido a formação de MnS. O Al é adicionado com a finalidade de atuar como agente desoxidante e de refino de grão. Quando presente em solução sólida (teores acima de 0,015%) garante que, quando o aço for aquecido durante as operações de soldagem ou tratamento térmico, o tamanho de grão

austenítico será reduzido (MALCOLN, 2007).

4.3 Processo de soldagem para Tubos API 5L

Os processos de soldagem utilizados em tubos de grau API podem ser classificados como processos sem a utilização de metal de adição, como soldagem contínua, soldagem elétrica e soldagem a laser ou com o uso de metal de adição, como soldagem com arco submerso e soldagem com arco metálico a gás. A tabela 4 apresenta processos de soldagem utilizados na fabricação de aços ARBL PLS1 e PLS2 (INSTITUTO AMERICANO DE PETRÓLEO, 2012).

Tabela 4 – Processos de soldagem de acordo com o nível de especificação dos aços de tubulação ARBL (INSTITUTO AMERICANO DE PETRÓLEO, 2012).

Processos de Soldagem	PSL 1		PSL 2	
	X42 a X70	X42 a X80	X90 a X120	
<i>Soldado sem Metal de Adição</i>				
Soldagem Elétrica	√	√	-	
Soldagem a Laser	√	-	-	
<i>Soldado com Metal de Adição</i>				
Soldado por Arco Submerso	√	√	√	

Pela norma API 5L, os tubos podem ser fabricados com ou sem costura. Este segundo é obtido pelo processo de conformação a quente, através de laminação oblíqua ou extrusão, produzindo um produto tubular. Já os tubos fabricados com costura (soldados) são obtidos pela conformação a frio de chapas planas em formato cilíndrico, podendo ser soldado na longitudinal ou helicoidal, sendo utilizado ou não metal de adição (SPECIFICATION, 2000).

4.3.1 Processos de Soldagem para Tubos API.

A partir de 1920 adotou-se os primeiros processos de soldagem na construção de tubulações de aços convencionais. O primeiro processo de soldagem utilizado na soldagem de dutos foi o processo de soldagem oxiacetileno, como mostra a Figura 5. Posteriormente, optou-se pela utilização de processos de soldagem a arco elétrico (KENNEDY, 1993).

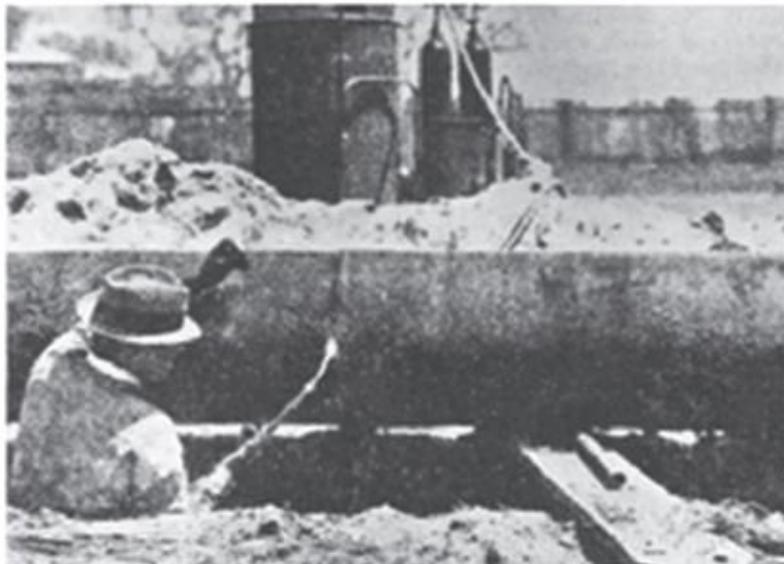


Figura 5 - Montagem de tubulações de aço pelo processo de soldagem oxiacetileno no início da década de 1920 (KENNEDY, 1993).

Se tratando de soldagem para tubos ARBL, pode-se dividir os processos de soldagem em dois grupos: Processos de Fabricação de Tubos e Processos de Montagem dos Tubos. Para os Processos de Fabricação de Tubos são considerados os seguintes processos de soldagem: Soldagem a Arco Submerso (AS), Soldagem por Arco de Tungstênio com Blindagem a Gás/Gás Inerte de Tungstênio (GTAW/TIG), Soldagem por Resistência Elétrica (ERW), Soldagem por Feixe de Elétrons e Soldagem a Laser (SICILIANO, 2008).

Já os processos de soldagem utilizados na montagem são descritos como: Soldagem a Arco Elétrico com Atmosfera de Proteção Gasosa (GMAW) ou simplesmente Processo MIG/MAG, TIG, Soldagem a Arco Elétrico com Eletrodo Revestido (SMAW), Soldagem com Arame Tubular (FCAW), Plasma, Oxiacetileno e a soldagem por Resistência Elétrica. Esses processos podem ser utilizados em combinações entre eles, seja por meio manual, mecanizado, semiautomático ou automatizado. Para os processos de soldagem, seus testes, e trabalhos de reparo de solda, o padrão API 1104 deve ser consultado. Este padrão faz referência a "soldagem de dutos e instalações relacionadas". Através dele tem-se o fornecimento de especificações sobre soldagem de dutos, ensaios em juntas soldadas, qualificação de soldadores, ensaios radiográficos e métodos de inspeção da solda (WELDING, 2005).

4.3.1.1 Processo de Soldagem para Fabricação de Tubos API.

Dentre os processos de soldagem mais utilizados para fabricação de tubos destaca-se o processo a Arco Submerso, uma vez que este proporciona alta taxa de deposição com alta qualidade de metal de solda e ainda, possibilita algumas vantagens, como: alta velocidade, elevada eficiência energética, uniformidade do cordão de solda, ausência de respingos e fácil automatização (WELDING, 2000).

Soldagens TIG geram soldas com excelente qualidade, entretanto esbarram em baixas produtividades, dificultando sua utilização em larga escala. O processo de Soldagem por Resistência Elétrica (ERW) consiste na junção dos materiais através do aquecimento das juntas por passagem de corrente elétrica, sendo necessária a aplicação de pressão entre as peças. Este processo não utiliza metal de adição (WAINER et al. 1995). O processo ERW gera boa tenacidade à baixa temperatura, excelente para aplicações em tais condições, como nas regiões árticas (FUKAI, 1988).

Uma outra forma empregada para se soldar tubulações API 5L X80 se dá através de processos não convencionais, tais como Soldagem por Feixe de Elétrons e Soldagem a Laser. Através destes, tem-se elevado ganho nas propriedades mecânicas, gerando baixas ZAC (Zona Afetada pelo Calor), possibilitando grande aumento de produtividade. Para estes processos são necessários alto nível de atenção e cuidados com a quantidades de energias empregadas (STEELS, 1978).

A soldagem por Atrito Linear com Mistura, também é descrita como possíveis substitutos dos processos por fusão. Este, também apresenta melhorias às propriedades da ZAC, entretanto enfrenta limitações pelo material de confecção da ferramenta. Esta soldagem pode ser aplicada tanto na fabricação quanto na montagem de tubulações (OZEKICIN *et al.*, 2013).

4.3.1.2 Processo de Soldagem em Campo de Tubos API.

Os processos de soldagem comumente utilizados na soldagem em campo de dutos ARBL são: SMAW, MIG/MAG, FCAW, TIG (PARANHOS, 2000).

Bai 2001, recomenda que, independente do processo de soldagem aplicado em campo,

principalmente em tubulações do grau acima do X70, deve-se atentar para os defeitos provenientes do processo de soldagem, entre eles: a preparação da junta e alinhamento, limpeza entre os passes de solda, pré-aquecimento adequado, parâmetros de soldagem, não movimentar o tubo antes de completar o passe de raiz.

O processo de Soldagem a Arco Elétrico com Eletrodo Revestido (SMAW) é o mais utilizado na soldagem de dutos em campo (BAI, 2001).

Atualmente, mesmo com o desenvolvimento de novos materiais e processos de soldagem, o processo com Eletrodo Revestido continua sendo altamente utilizado devido principalmente à boa usabilidade, possibilidade de soldagem em difíceis condições de acesso, e finalmente por não necessitarem de gás de proteção (JUERS, 1998). Outra vantagem do processo SMAW se dá pela possibilidade do uso de fontes de soldagem rotativas, ou geradoras. Estas são fontes de energia geradas pela própria fonte no local de soldagem (MODENESI, 2009).

Os processos de soldagem que apresentam maior possibilidade de substituição ao processo com Eletrodo Revestido são o MIG/MAG e o processo a Arame Tubular (FCAW). Estes permitem aumentar a produtividade e reduzir o custo de soldagem, em contrapartida exigem equipamentos mais sofisticados e podem necessitar de gás de proteção (HOLLIDAY, 1998)

O processo MIG/MAG é mais sensível a variações no valor do CE e principalmente ao teor de boro do Metal Base. Já para reparo em dutos, a soldagem com arame tubular é mais adequada, sendo utilizada com maior frequência para este fim. Bai (2001), atenta que, embora as propriedades do Arame Tubular são boas, historicamente existem restrições quanto à tenacidade a fratura.

Em processo de soldagem por AS, os tubos soldados são geralmente formados por um método duplo, no qual a junta de topo é soldada em pelo menos dois passes, um dos quais está localizado no interior do tubo. As soldas são feitas por aquecimento através do arco elétrico entre os eletrodos, neste caso a pressão é desconsiderada. O metal de adição para estas soldas é obtido a partir dos eletrodos. Esta soldagem pode penetrar em toda a espessura do tubo o que possibilita alta produtividade com boas propriedades mecânicas e uma baixa taxa de reparo (OZEKCIN *et al.*, 2013)

Conforme verificado acima, os métodos de Soldagem a Arco Submerso (AS), com Eletrodo Revestido (SMAW) e MIG/MAG (GMAW) são métodos bem estabelecidos e considerados suficientemente validados para uso em larga escala. Assim, para determinar a utilização desses métodos diversos fatores devem ser avaliados. Por exemplo, mesmo o processo de Soldagem MIG/MAG sendo um dos mais econômicos, sua aplicação ainda depende de outros fatores, como o tipo de soldagem mecanizada considerada, o comprimento de cada construção individual e a topografia do terreno (WIDGREY, 2002).

Dentre os processos mais econômicos de soldagem dos dutos API os processos através de Eletrodo Revestido (SMAW) manual e o MIG/MAG (GMAW) mecanizado. Tradicionalmente o processo SMAW manual tem sido utilizado para soldagem em campo, entretanto, o processo GMAW mecanizado tem ganhado cada vez mais espaço quando se trata da soldagem de tubulações de grandes diâmetros (PRICE, 1993).

Entre as vantagens do processo GMAW mecanizado sobre processos manuais, tem-se: altas taxas de deposição do metal, baixos teores de hidrogênio, elevada consistência em resistência e tenacidade a fratura, soldas estreitas, blindagem de gás, baixa entrada de calor relativamente e tempo de soldagem (OZEKCIN *et al.*, 2013).

Para soldagem dos aços de grau X70 através do processo SMAW manual diferentemente do que ocorre no processo GMAW mecanizado para aços de grau X80, este requer a utilização de um escudo de gás inerte, que proporciona o aumento de entalhe e a tenacidade à fratura do Metal Solda, e conseqüentemente, elimina a presença de defeitos (PRICE, 1993).

É importante ressaltar que mesmo com o constante desenvolvimento do processo GMAW mecanizado, o processo SMAW manual continua de extrema importância para reparos e manutenções futuras dentro do processo de fabricação de sistemas dutoviários por aços mircoligados (LIU; BHOLE, 2013).

4.3.2 Soldabilidade

O conceito de soldabilidade pode ser definido ‘como a capacidade de um material ser

soldado sob as condições impostas de fabricação em uma estrutura específica e convenientemente projetada, de modo a executar satisfatoriamente o serviço pretendido'. Dessa forma o conceito, embora único, pode ser subdividido em três categorias: soldabilidade operacional, soldabilidade em serviço e soldabilidade metalúrgica (BRANDI, 1997).

Temos que a soldabilidade operacional está atrelada às condições de operação, como: relação entre processo e natureza do metal base; posição de soldagem; habilidade do soldador; técnicas de montagem das juntas, entre outros. Já a soldabilidade em serviço está relacionada à vida útil dos componentes soldados. Por fim, temos que a soldabilidade metalúrgica relaciona as condições térmicas e químicas que podem ocasionar defeitos, falhas ou propriedades mecânicas indesejadas, e nas juntas soldadas, sendo associadas a fenômenos metalúrgicos como transformação de fases e micro segregação. Ao se comentar sobre soldabilidade metalúrgica dos aços deve-se atentar ao fato de que esta é totalmente dependente da composição química e das condições térmicas que determinam a microestrutura das juntas soldadas (OZEKICIN *et al.*, 2013).

Durante o processo de soldagem é formada uma região conhecida como Zona Afetada pelo Calor (ZAC), região adjacente à zona fundida. A ZAC no metal base é submetida a um rápido ciclo térmico durante a etapa de soldagem, onde a temperatura alcançada não é suficiente para provocar a fusão do metal base, mas é suficiente para que ocorram transformações de fase de ferrita para austenita durante o aquecimento e de austenita para diferentes fases e microconstituintes durante o resfriamento. A depender da composição química do metal base, de sua temperatura máxima atingida e de sua taxa de resfriamento, pode ocorrer o processo de têmpera localizada, possibilitando aumento ou redução do tamanho de grão, formando microestruturas duras e frágeis na ZAC (CAMPBELL; WALSH, 1998).

As propriedades mecânicas envolvendo a ZAC e o Metal Solda, desempenham funções muito importantes para a aplicação de soldas em tubulação. Geralmente, a junta soldada é constituída de três diferentes regiões: Metal Solda (MS), Zona Termicamente Afetada (ZTA) e Metal Base (MB). Desta forma se uma falha ou defeito ocorrer no Metal Solda, o material não será aprovado, uma vez este metal deve ser projetado para ter maior resistência do que o Metal Base. Se a falha ocorre na Zona Termicamente Afetada, diz-se que está fragilizado. Assim, o melhor resultado para uma junta é quando a falha ocorre

no MB (BOTT *et al.*, 2003).

Condições ambientais, projetos de soldagem impróprios ou procedimentos em conjunto, levam às falhas das estruturas soldadas. Soldagens inadequadas provocam diversos tipos de fragilizações e/ou defeitos, ocasionando locais favoráveis para corrosão, formação de trincas por hidrogênio e tensões residuais. Efeitos prejudiciais das condições ambientais e do calor térmico da soldagem pode ser controlada ou minimizada, mas nem sempre são considerados viáveis economicamente (SHARMA; MAHESHWARI, 2016). A tabela 5 demonstra as investigações sobre falha em processos de soldagem de dutos, revelando suas possíveis causas.

Tabela 5 – Falhas em soldagem de Tubos API 5L e suas respectivas causas (SHARMA; MAHESHWARI, 2016).

Aço API 5L	Causa da Falha	Local da Falha	Referência
X42	Erosão devido à corrosão	Metal Solda	Majid et al. (2010); Majid et al. (2012); Majid and Mohsin (2012).
X46	Rachadura na Zona de Fusão	Metal Solda	Datta and Deva (2002).
X46	Trinca por fadiga na solda	Metal Solda	Chapetti et al. (2002).
X46	Defeitos de Solda	Metal Solda	Fazzini et al. (2005).
X46	Trinca por Hidrogênio	ZAC	Azevedo (2007).
X52	Desalinhamento da solda (internas e externas)	Interface Solda/ZAC	Fazzini et al. (2007).
X65	Rachadura ao longo da solda devido à tensão residual	Interface Solda/ZAC	Al-Anezi et al. (2009).

Apesar do grande desenvolvimento de materiais cada vez mais resistentes, a corrosão em dutos se torna um processo quase que inevitável. Prevenir a corrosão em dutos é necessário visto que grandes quantias de dinheiro são destinadas para consertos ou substituição de tubos danificados por este defeito. A junta soldada está propensa a sofrer corrosão principalmente devido às variações na composição química, na estrutura metalúrgica e nos diferentes níveis de tensão residual dentro de uma estrutura soldada. As composições químicas da solda podem sofrer variação devido à composição diferente dos consumíveis de soldagem ou remoção de elementos na escória. Com o objetivo de alcançar dutos cada vez mais seguros com maior longevidade e integridade, pesquisadores sugeriram algumas estratégias para mitigar a corrosão, entre elas estão uma seleção adequada do material do tubo e do material de revestimento da superfície do tubo para as condições particulares de aplicação. Os soldadores devem ter conhecimento sobre os consumíveis selecionados para a soldagem, devem fazer a preparação da superfície de

maneira correta, entender sobre as práticas de soldagem tais como os acabamentos das soldas nas superfícies, uso de temperatura de pré-aquecimento / interpasse e calor pós-soldagem tratamento, além de ter um entendimento refinado do projeto em atuação (SHARMA; MAHESHWARI, 2016).

O hidrogênio é um gás altamente prejudicial para o aço. As trincas ocasionadas pelo aprisionamento de hidrogênio nas etapas de soldagem ocorrem preferencialmente na ZAC ou na interface entre a ZAC e a solda. A composição do aço e a microestrutura da solda desempenham um papel importante na ocorrência de trincas por hidrogênio. Microestruturas com elevada dureza, como a martensita, tem uma menor solubilidade para o hidrogênio, mas uma maior tendência para o craqueamento induzido pelo mesmo. Isso ocorre pois, durante o resfriamento rápido, a austenita se transforma em martensita e o hidrogênio fica preso nesta microestrutura. Tem-se que, pequenos tamanhos de grãos são mais propícios ao aprisionamento de átomos de hidrogênio em suas estruturas. Por outro lado, em grãos maiores, o escape dos átomos de hidrogênio se tornam mais fáceis. Através do controle dos consumíveis de soldagem e utilizando eletrodos com baixos teores de hidrogênio é possível minimizar a presença deste gás durante o processo de soldagem, visando diminuir as taxas de resfriamento rápidas, possibilitando maior tempo para que os átomos de hidrogênio se difundam (SHARMA; MAHESHWARI, 2016).

Materiais metálicos quando submetido a um ciclo térmico de soldagem sofrem muitas alterações metalúrgicas, como por exemplo o surgimento de tensões residuais. Essas tensões, após um processo de soldagem, exercem uma influência significativa sobre as propriedades das juntas soldadas e seu controle permite evitar possíveis falhas da estrutura soldada (ARAÚJO et al, 2013).

As tensões residuais têm um efeito prejudicial na vida útil de uma estrutura soldada. Os fatores responsáveis por ocasionar tensões residuais em estruturas soldadas podem ser divididos em três grupos, como fatores estruturais, materiais e parâmetros do processo de soldagem (AKBARI; SATTARI-FAR, 2009).

Dentre os fatores estruturais, a geometria das soldas e a espessura da estrutura são itens importantes e devem ser considerados. Já os fatores materiais incluem as propriedades mecânicas dos materiais base, bem como dos materiais de enchimento. Para os parâmetros do processo de soldagem, o tipo de processo de soldagem empregado e seu

aporte de calor desempenham um papel importante para decidir a quantidade de tensões residuais nas estruturas soldadas. Desta forma, com a seleção e controle adequados desses parâmetros, as tensões residuais nas juntas soldadas podem ser minimizadas (SHARMA; MAHESHWARI, 2016).

4.4 Efeito dos elementos de liga na soldagem dos aços API 5L

As tendências atuais de desenvolvimento de pesquisas têm o propósito de melhorar a microestrutura do material levando a propriedades aprimoradas em juntas soldadas, principalmente com a adição e otimização de elementos de liga na solda (SHARMA; MAHESHWARI, 2016). As soldas a arco submerso em tubulações X70 geralmente são feitas com eletrodos ligados ao Mn e Mo ou com eletrodos ligados ao Mn, Mo e Ni (COIFFIER *et al.*, 1997).

A composição química dos fios neste tipo de solda é ajustada de tal forma que os metais de soldas que contenham entre 60 e 70% de metais de base possam apresentar altos parâmetros de tenacidade. Um equilíbrio adequado entre constituintes de C, Mn e Mo microligados com Ti e B tem um efeito benéfico sobre a resistência dos metais de solda (SIREESHA *et al.*, 2001).

A alta entrada de calor em dutos ARBL soldados pelo processo a arco submerso resultam em um aumento dos tamanhos de grão nas ZAC, ocasionando redução da dureza e conseqüentemente, prejudicando as propriedades das juntas soldadas (LAN *et al.*, 2012).

Jansen *et al.* (2000), apontaram que este problema se tornou ainda pior para o tubo de parede fina devido a penetração profunda do segundo passe de solda. Assim, os fabricantes de tubos devem se atentar a este fato, ajustando as composições químicas de metais base e metais de solda (LAN *et al.*, 2012).

O desenvolvimento de consumíveis nos processos de soldagem são de extrema importância para o desenvolvimento das atividades envolvendo a junção de aços API. Introdução de novas classes de eletrodos, bem como a utilização de materiais refinados com maior resistência são fundamentais para obter propriedades adequadas nas juntas soldadas. Dessa forma, para o grau X65, quatro diferentes composições químicas de eletrodos foram testadas para soldagem, com duas composições diferentes. A tenacidade

a fratura no metal de solda melhorou com o aumento do teor de elementos microligantes como B e Ti no eletrodo (SIRIN *et al.*, 2016).

De forma similar, Midawi et al. (2015) comparou a adequação de dois consumíveis de soldagem para unir aço de tubulação de grau X80 comparando a resistência ao impacto, propriedades de tração, dureza e microestruturas em metais de solda. Os resultados revelaram que a solda produzida com consumíveis com maiores quantidades de C, Ni e Ti exibiram maior resistência e dureza devido à sua microestrutura final no metal de solda, mas menor tenacidade a baixa temperatura devido à presença de inclusões de Ti, que podem fornecer locais de iniciação de trincas (MIDAWI *et al.*, 2015).

Alguns métodos foram desenvolvidos para aumentar a resistência na ZAC. Dentre os métodos desenvolvidos tem-se a utilização de titânio como TiN para melhorar a tenacidade na ZAC. Por este método a dureza da ZAC é reduzida pelo refinamento do tamanho de grão da austenita de 95mm para 63 mm, sendo controlada pelo ajuste da relação Ti/N (BELAYAEY *et al.*,2011).

No entanto, este método nem sempre é satisfatório no refinamento do tamanho de grão, porque as partículas de TiN ficam mais grossas ou desaparecem perto da linha de fusão, onde a solda é aquecida a uma temperatura de 1400°C ou superior, e, como resultado, seu efeito para gerar o refinamento do grão de austenita é perdido (NISHIOKA; ICHIKAWA, 2012).

Com estas circunstâncias, foi desenvolvida uma nova tecnologia onde finas partículas de TiO dispersas em aço são utilizados. Neste aço, partículas de TiO existentes dentro de um grão servem como núcleos de ferrita intragranular. Como resultado, grosseiros grãos de austenita são divididos em grãos finos de ferrita, possibilitando excelente tenacidade na ZAC (NISHIOKA; ICHIKAWA, 2012).

Com base nisso, uma inovadora tecnologia foi desenvolvida, conhecida como HTUFF. Através desta tecnologia, os grãos de austenita formados perto da linha de fusão são suprimidos, fixando partículas de óxidos, nas quais a ferrita intragranular se forma dentro deles. Como consequência, as microestruturas da ZAC são notavelmente bem definidas. O tamanho médio do grão em tubos HTUFF é muito mais fino do que no tubo de aço TiO (TERADA et al., 2004). A Tabela 6 e a Figura 6 exemplificam, respectivamente, os

métodos para melhoria da resistência na ZAC em tubulações API 5L e suas microestruturas.

Tabela 6 – Métodos para melhoria da resistência na ZAC em tubulações API 5L (LIU; BHOLE, 2013).

i	Refinamento do tamanho de grão	Método TiN: Refinamento do grão de austenita por partículas finas como TiN. Método TiO: Utilização de ferrita intragranular nucleada a partir de precipitados, como TiO. Método HTUFF: Refinamento de grãos de austenita próximo à linha de fusão e formação de ferrita intragranular.
ii	Diminuição do constituinte MA	Redução no percentual de C e no valor do CE.
iii	Resistência da matriz	Adição de Ni.

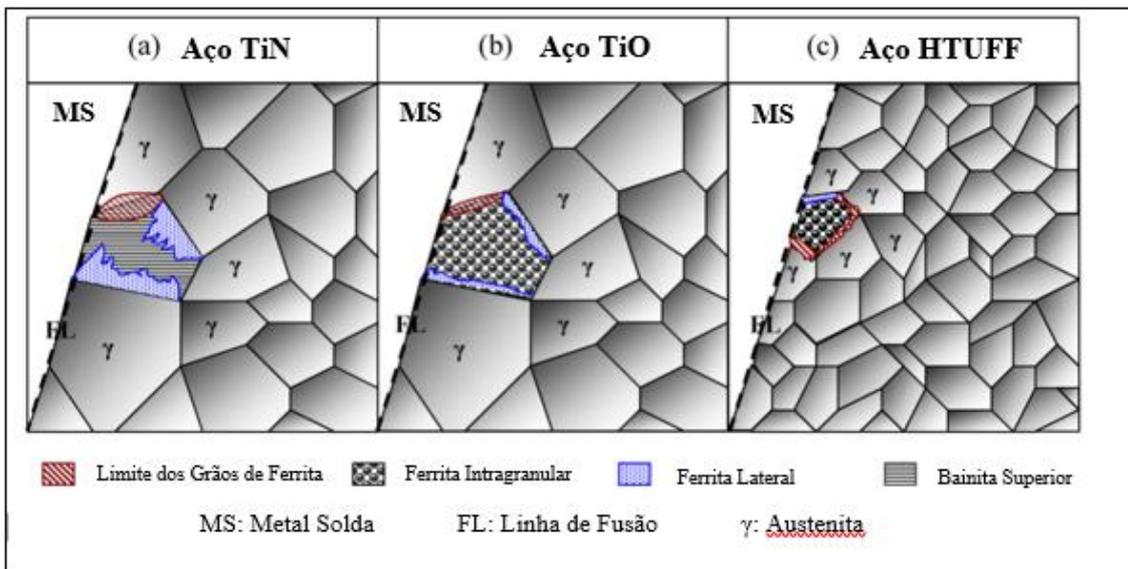


Figura 6 - Microestrutura dos aços TiN, TiO e HTUFF (LIU; BHOLE, 2013).

Pode-se observar pela figura 7 o comportamento dos grãos de austenita de um aço TiO e de um aço HTUFF aquecidos durante 1 minuto a 1400°C e sendo resfriados posteriormente. Para o aço TiO foi observado tamanhos de grãos de austenita de 500µm ou superiores, já para os grãos proveniente do processo HTUFF foi possível notar diminuição de seu tamanho em 200µm ou menos. Esta redução é resultado da supressão dos grãos de austenita próximos à linha de fusão, gerando microestruturas da ZAC notavelmente mais finas.

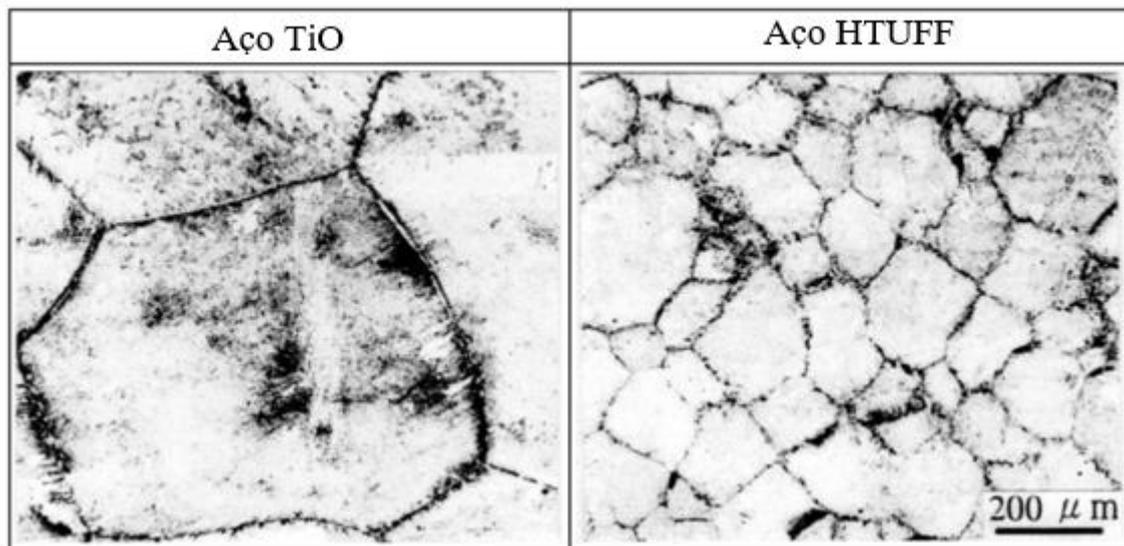


Figura 7 - Grãos de austenita de aço TiO e HTUFF aquecidos a 1400°C por 1 minuto (TERADA, 2004).

5 CONDISERAÇÕES FINAIS

- Os estudos informam que a inclusão de elementos de liga promove redução significativa nos valores do CE. Entretanto, além da adição de tais elementos, para se obter maior redução nos teores do CE deve-se atentar aos processos de laminação controlada seguida da etapa de RA. Assim é possível proporcionar melhoria em propriedades como tenacidade e soldabilidade de aços API 5L.
- A soldagem de aços API 5L pode ser executada por meio de diferentes métodos, sendo estes, escolhidos através de requisitos como as condições do local, o valor econômico da operação e da disponibilidade de ferramentas. Independentemente do método considerado, de acordo com a bibliografia, deve-se atentar a possíveis falhas durante a soldagem, sendo menos prejudicial ao processo falhas que ocorrem no MB e não em áreas como a ZTA e o MS.
- Melhorar a tenacidade na ZAC durante a soldagem é um desafio para a indústria de aços API 5L. Alguns autores evidenciam estas melhorias por meio de métodos que proporcionam o refinamento de grãos de austenita próximos a linha de fusão através da adição de elementos de liga no processo de soldagem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKBARI, D., SATTARI-FAR, I. **Effect of the welding heat input on residual stresses in butt-welds of dissimilar pipe joints.** Int. J. Press. Vessel. Pip. 86, 769-776, 2009.

AKSELSSEN, O. M., GRONG, O., RORVIK, K. Embrittlement phenomena in the grain coarsened heat affected zone of low carbon microalloyed steels. **Scandinavian Journal Materials Science and Technology of Metallurgy**, v. 19, p. 258-264, 1990.

AKSELSSEN, O. M., GRONG, O., SOLBERG, J. K. Structure-property relationship in intercritical heat affected zone of low-carbon microalloyed steels. **Materials Science and Technology**, v. 3, n 8, p. 649-655, 1987.

AKSELSSEN, O. M.; SOLBERG, J. K.; GRONG, O. Effects of martensite-austenite (M-A) island. on intercritical heat-affected zone toughness of low carbon microalloyed. ISI International steels. **Scandinavian Journal of Metallurgy**, v. 17, p. 194-200, 1988.

AL-ANEZI, M.A., RAO, S., LOBLEY, G.R., 2009. **Pipeline failure by transit fatigue.** J. Fail. Anal. Prev. 9, 35-38.

ALBUQUERQUE, S. F; SILVA, R. S; MACIEL, T. M; ALMEIDA, D. M.; QUEIROZ, A. Estudo do Comportamento do Aço API 5L X80 quando submetido à Soldagem por Processo Automatizado. **Soldagem e Inspeção**, São Paulo, Vol. 17, N°. 2, p. 137-146, Abr/Jun 2012.

API ENERGY, 2008. Comparison of API Spec 5L 43rd Edition and ISO 3183, second ed. API Spec 5L 44th edition.

ARAÚJO, B.A.; LIMA, M. S. S. S.; MACIEL, T. M.; SILVA, A. A.; SOARES, E. P. Estudo das Tensões Residuais de Juntas Soldadas de Aço API 5L X80. **Soldagem e Inspeção**, São Paulo, Vol. 18, N°. 3, p. 217-226, Jul/Set 2013.

ASM METALS HANDBOOK, 1994. **Welding, Brazing and Soldering**, Vol. 6. ASM International.

AZEVEDO, C.R.F., 2007. **Failure analysis of a crude oil pipeline.** Eng. Fail. Anal. 14, 978-994.

- BAI, Y. **Pipelines and Risers**. Elsevier. 2001. p. 353 – 380.
- BELYAEY, K. A., POLYANSKIY, V. A., YAKOVLEV, Y. A.: ‘**Stresses in a pipeline affected by hydrogen**’, J. Mater. Sci., 2011, 46, 715–722.
- BOTT, I. S.; KOJIMA, S. S.; SAMPAIO, M. A. **The Development of API 5L X80 Steel For Pipeline Productions by the TMCR Process**. T&B Petroleum, Rio de Janeiro, N° 15, p. 68 – 70, 2003.
- BOTT, S., SOUZA, L. F. G. D., TEIXEIRA, A.J.C.G., RIOS, P.R.: ‘**High strength steel development for pipelines: a Brazilian perspective**’, Metall. Mater. Trans. A, 2005, 36A, 443–454.
- BRANDI, S. D.; “**Metalurgia da soldagem: soldabilidade de alguns materiais**”. In: Zieldas, S; Tatini, I; org. Soldagem. São Paulo : SENAI, pp. 115-123, 1997.
- BRITO, V. L. O. et al. Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2000, São Paulo. **Evolução dos aços para tubos API utilizados no transporte de óleo e gás**. São Paulo: 2000.
- CALDEIRA, E. A. et. Al. **Desenvolvimento de aços atendendo a norma API 5L, no laminador de tiras a quente da Companhia Siderúrgica de Tubarão (CST)**. CONGRESSO ANUAL DA ABM, 60., 2005, Belo Horizonte.
- CAMPBELL, R. D.; WALSH, D. W. **Weldability Testing. Welding Brazing and Soldering**. Metals Handbook, Vol 6, 10 Ed. American Society of Metals, 1998. p. 1484 – 1514.
- CHAPETTI, M.D., OTEGUI, J.L., MOTYLICKI, J., 2002. **Fatigue assessment of an electrical resistance welded oil pipeline**. Int. J. Fatigue 24, 21-28.
- CHEN, J. H. et. Al. **Micro-fracture behavior induced by MA constituinte (island. martensite) in simulated welding heat affected zone of HT80 high strength low alloyed steel**. Acta Metallurgica, v. 32, n. 10, p. 1779-1788, 1984.
- COIFFIER, J. C., JANSEN, J. P., PERU, G., CLAYS, J.: ‘**Combination of laser beam and submerged arc process for the longitudinal welding of large-diameter welded pipes**’, Proc. Int. Symp. on ‘Safety in application of high strength steel’, Trondheim,

Norway, July 1997, Statoil Research Centre, 235–252.

COLLINS, L. E. et al. **Microstructures of linepipe steels**. Canadian Metallurgical Quarterly, vol. 22, no. 2, pp 169-179, 1983.

COSTA E SILVA, A.; MEI, PR. **Aços e ligas especiais**. São Paulo: Edgard Blucher, 2006.

DATTA, R., DEVA, A., 2002. **An investigation into the failure of API 5L X-46 Grade ERW linepipes**. Pract. Fail. Anal. 2, 59-62.

FAZZINI, P.G., BELMONTE, J.C., CHAPETTI, M.D., OTEGUI, J.L., 2007. **Fatigue assessment of a double submerged arc welded gas pipeline**. Int. J. Fatigue 29, 1115-1124.

FAZZINI, P.G., CISILINO, A.P., OTEGUI, J.L., 2005. **Experimental validation of the influence of lamination defects in electrical resistance seam welded pipelines**. Int. J. Press. Vessel. Pip. 82, 896-904.

FERREIRA, L. H. R. **Aplicação de aços API 5L X100 e X120 na construção de gasodutos na indústria de petróleo**. Monografia. Escola de Engenharia, Universidade Federal Fluminense, Niterói, p.14. 2021.

FOSCA P.C. **Introducción a la Metalurgia de la Soldadura**. Pontificia Universidad Católica del Perú, 4º Ed. Lima, Perú, 2003.

FUKAI, M. et al. **Manufacturing techniques and Characteristics of High Grade ERW Line Pipe API 5L X80**. Kawasaki Steel Technical Report. N°18. Maio. 7 p. 1988.

GRAY, MJ. **A guide for Understanding & Specifying Chemical Composition of High-Strength Linepipe Steels**. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 60., 2007, Vitória.

GRONG, O.; MATLOCK, D. K. Microstructural Development in Mild and Low-Alloy Steel Weld Metal. **International Materials Reviews**, v. 31, p. 27-48, 1986.

GUIMARÃES, V.A. **Influência da Taxa de resfriamento nas Propriedades Mecânicas e no Micromecanismo de Fratura de um Aço Microligado com Nióbio e Titânio**. 1997. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, p. 157.

HILLENBRAND, H. G., KA NIEDERHOFF, G. HAUCK, E. PPERTENEDER and G. WELLNITZ: '**Procedures, considerations for welding X-80 line pipe established**', Oil Gas J., 1997, 95, 47–56.

HILLENBRAND, H.G.; GRAS, M.; KALMA, M. “Development and production of high strength pipe steels”, International Symposium Niobium 2001. Orlando, Florida, USA, 2001.

HOLLIDAY, D. B. Gas-Metal Arc Welding. Welding Brazing and Soldering. Metals Handbook, Vol 6, 10 Ed. American Society of Metals, 1998. p. 569 – 581.

HONEYCOMBE, R.W.K. – Aços, microestrutura e propriedades. **Fundação Calouste Gulbenkian**. Cap.4, 1982.

HULKA, K; HEISTERKAMP, F. Weldability consideration in the development of structural steels. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON HSLA STEELS, 3., 1995, Beijing. **Proceedings** Beijing: The Chinese Society for Metals, 1995. P. 543-551.

IMLAU, K. P.; HELLERT, T. New steel solution for the worldwide car. Steel Research International, v. 78, n. 3, p. 180-184, 2007.

INSTITUTO AMERICANO DE PETROLEO, 2012. API Specification 5L, 45th Edition. API Publishing Services, Washington DC.

IRVINE, K. J.; PICKERING, F. B.; GLADMAN, T. Journal Iron Steel Inst., No. 205, 1967, p. 161.

JANSEN, J.P., COIFFIER, J.C., THILLOU, V.: '**How to improve the toughness at low temperature of the longitudinal weld seam of pipes with wt 12,7 mm**', Proc. 3rd Int. Pipeline Technology Conf., Bruges, Belgium, May 2000, Technologisch Instituut, 527–543.

JUERS, R. H. **Shielded Metal Arc Welding. Welding Brazing and Soldering**. Metals Handbook, Vol 6, 10 Ed. American Society of Metals, 1998. p. 558 – 569.

JUNIOR, J. C. S. et al. Uma breve revisão histórica do desenvolvimento da soldagem dos aços API para tubulações. **Soldagem e Inspeção**, São Paulo, Vol. 18, N°. 2, p. 176-195, Jun/2013.

KENNEDY, J. L. **Oil and Gas Pipeline Fundamentals**. 2° ed. by PennWell Books, Tulsa, U.S.A. 3-4 p. 1993.

KORCHYNSKY, M. **Use of vanadium in flat products (plate and strip)**. IN: VANITEC SEMINAR ON VANADIUM STEEL GUILIN, NOVEMBER 6-7, 2000. **Proceedings**. London, UK: Vanitec, 2000. V. 101, p. 42-47.

LAN, L.Y., OIU, C.L., ZHAO, D.W., GAO, X.H., D, L.X.: **'Effect of single pass welding heat input on microstructure and hardness of submerged arc welded high strength low carbon bainitic steel'**. Sci. Technol. Soldar. Join., 2012, 17, 564–570.

LIU, C.; BHOLE, S. D. **Challenges and developments in pipeline weldability and mechanical properties**. **Science and Technology of Welding and Joining**, Yangzhou, China, Vol. 18, N° 2, p. 169-181, Fev/ 2013.

MAJID, Z.A., MOHSIN, R., 2012. **Failure investigation of natural gas pipeline**. Arab. J. Sci. Eng. 37, 1083-1088.

MAJID, Z.A., MOHSIN, R., YAACOB, Z., HASSAN, Z., 2010. **Failure analysis of natural gas pipes**. Eng. Fail. Anal. 17, 818-837.

MAJID, Z.A., MOSHIN, R., YUSOF, M.Z., 2012. **Experimental and computational failure analysis of natural gas pipe**. Eng. Fail. Anal. 19, 32-42.

MALCOLN, J. G. A Guide for Understanding & Specifying Chemical Composition of High Strength Linepipe Steels. **Companhia Brasileira de Metalurgia e Mineração**, 2007. 37 p. (Relatório Técnico).

MIDAWI, A.R.H., SANTOS, E.B.F., HUDA, N., SINHA, A.K., LAZOR, R., GERLICH, A.P., 2015. **Microstructures and mechanical properties in two X80 weld metals produced using similar heat input**. J. Mat. Process. Technol. 226, 272-279.

MODENESI, J. **Fontes de Energia para a Soldagem a Arco**. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Universidade Federal de Minas Gerais, Professor Paulo J. Modenesi. p. 10. 2009.

NISHIOKA, K., ICHIKAWA, K.: **'Progress in the thermomechanical control of steel**

plates and their commercialization', Sci. Technol. Adv. Mater., 2012, 13, 1–20.

OZEKIN, A. et al. **A Microstructural Study of Friction Stir Welded Joints of Carbon Steels**. International journal of offshore and polar engineering. Vol.14. N°4. December. 5 p. 2004.

PARANHOS, R.; SOUZA, A. C. **Soldagem ao Arco Submerso**. Coleção Soldagem 2000. Rio de Janeiro: Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial, 2000. 77 p.

PRICE, J. C.: **'Welding needs specified for X80 offshore line pipe'**. Oil Gas J., 1993, 91, 95–100.

RASANEM, E; TENKULA, J. **Phase Changes in the Welded Joints of Construction Steels**, Scandinavian Journal of Metallurgy, v. 1, p. 75-80, 1982.

RATNAPULI, R. C. **Considerações Metalúrgicas de Fabricação dos Aços para Tubos API 5L**. 62º Congresso Anual da ABM, 2007, Vitória – ES. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais. 2007.

RATNAPULI, R. C. e ALÍPIO, P. H. **Desenvolvimento de aços API-X80 e superiores com alto teor de Mn**. USIMINAS, dez/1999.

ROZA, E. J. et al. **API 5L X80 ERW Pipelines: TenarisConfab & Usiminas Development. 6th, International Pipeline Conference**, 2006. Proceedings. Alberta, Canadá, American Society of Mechanical Engineers, 2006. 7 p.

SHARMA, S. K; MAHESHWARI, S. A review on welding of high strength oil and gas pipeline steels – **Journal of Natural Gas Science and Engineering**, India, Vol. 38, p. 203-217, Dez/2016.

SICILIANO, F. **Materiais para Gasodutos: Aços de Alta Resistência para Dutos de Transporte de Gás e Petróleo – Tendências Atuais**. Metalurgia & Materiais. São Paulo: Vol. 64, N°. 588, p. 208 – 211, Mai/2008.

SILVA, M. C. **Determinação experimental da tenacidade à fratura da zona termicamente afetada de junta soldada de aço API 5L X80**. 2009. Tese (Doutorado em engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009

SIREESHA, M., ALBERT, S. K., SUNDARESAN, S.: **'Importance of filler material chemistry for optimising weld metal mechanical properties in modified 9Cr–1Mo steel'**, Sci. Technol. Soldar. Join., 2001, 6, 247– 254

SIRIN, K., SIRIN, S.Y., KALUC, E., 2016. Influence of the chemical composition of weld electrode on the mechanical properties of submerged arc welded pipe. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 1-10.

SOEIRO JUNIOR, Jaime Casanova e ROCHA, David Bellentani e BRANDI, Sérgio Duarte. **Uma breve revisão histórica do desenvolvimento da soldagem dos aços API para tubulações.** Soldagem e Inspeção, v. 18, n. 2, p. 176-195, 2013.

SPECIFICATION, for Line Pipe: API Specification 5L. American Petroleum Institute. 43° Ed. Washington. 154p. 2000.

STEELS, Welding of HSLA [Microalloyed] Structural. Rothwell, A. B.; Gray, J. M. American Society for Metals, Joining Division, Associazione italiana di metallurgia. 604-644 p. 1978.

WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELO, F. D. H. Soldagem: Processos e Metalurgia. São Paulo: Edgar Blücher, 1995. 494 p.

WELDING of Pipelines and Related Facilities: API Standard 1104. American Petroleum Institute. 20° ed. Washington. 84p. 2005.

WELDING Process. The Procedure Handbook of Arc Welding. 43° Ed. Cleveland: The James F. Lincoln Arc Welding Foundation, 2000. 742 p.

WIDGREY, D. J.: **'Welding high strength pipelines: from laboratory to field'**, Svetsaren, 2002, 57, 22–25.

YSHII, L. N., CHIODO, N. M. S. G. **Aplicação de Aços de Alta Resistência em Dutos e Transporte de Óleo e Gás: Implicações Sobre o Projeto e Construção.** São Paulo 2007.