

CENTRO UNIVERSITÁRIO DE FORMIGA – UNIFOR-MG
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA
CECÍLIA SOUZA E CASTRO

**UM ESTUDO SOBRE A FADIGA E A OCORRÊNCIA DE TRINCAS EM
TUBULAÇÕES DE AÇO API 5L X80 QUE APRESENTAM SOLDAGEM MANUAL
A ARCO ELÉTRICO REVESTIDO (SMAW)**

FORMIGA – MG

2017

CECÍLIA SOUZA E CASTRO

UM ESTUDO SOBRE A FADIGA E A OCORRÊNCIA DE TRINCAS EM
TUBULAÇÕES DE AÇO API 5L X80 QUE APRESENTAM SOLDAGEM MANUAL A
ARCO ELÉTRICO REVESTIDO (SMAW)

Trabalho de conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Química do UNIFOR-MG, como requisito
parcial para a obtenção do título de
bacharel em Engenharia Química.
Orientador: Neylor Makalister Ribeiro
Vieira

FORMIGA – MG

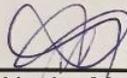
2017

Cecília Souza e Castro

UM ESTUDO SOBRE A FADIGA E A OCORRÊNCIA DE TRINCAS EM
TUBULAÇÕES DE AÇO API 5L X80 QUE APRESENTAM SOLDAGEM MANUAL A
ARCO ELÉTRICO REVESTIDO (SMAW)

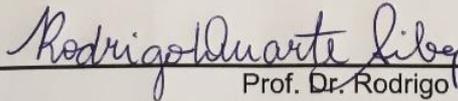
Trabalho de conclusão de curso apresentado
ao Curso de Engenharia Química do
UNIFOR-MG, como requisito parcial para
obtenção do título de bacharel em
Engenharia Química.

BANCA EXAMINADORA



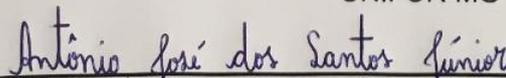
Prof. Neylor Makalister Ribeiro Vieira

Orientador



Prof. Dr. Rodrigo Duarte Silva

UNIFOR-MG



Prof. Me. Antônio José dos Santos Júnior

UNIFOR-MG

Formiga, 01 de Novembro de 2017.

Aos meus pais de modo especial, pela
dedicação à minha formação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ser fonte de sabedoria divina e alimento para minha alma.

Ao meu orientador Professor Me. Neylor Makalister Ribeiro Vieira pela orientação acadêmica, presteza e incentivo.

Aos meus pais, Guilherme e Magna, pelos sábios conselhos e por dedicarem parte de suas vidas à minha formação profissional.

Ao meu esposo Ronan pela paciência e por sempre acreditar na minha capacidade.

Aos meus irmãos Guilherme e Déborah pelo companheirismo e apoio.

Aos meus colegas de sala pela constante amizade.

A todos aqueles que diretamente ou indiretamente colaboraram para o desenvolvimento deste trabalho.

“Na vida, não existe nada a temer, mas a entender.”

Marie Curie

RESUMO

Tubos de aço soldados podem sofrer vários danos durante o seu transporte ou utilização. O tipo específico de dano escolhido para este estudo foi o de trinca em consequência da fadiga, o qual é considerado como um dos mais comuns e de alto grau de risco. Neste trabalho foram estudados, através de revisão bibliográfica, tubos de aço soldados pelo método de soldagem manual a arco elétrico revestido, fabricados de acordo com a norma técnica API 5L. A ênfase maior do estudo foi dada ao tema da ocorrência de trincas por fadiga em soldas. Foi possível concluir que em tubos soldados por arco elétrico revestido, a região adjacente ao cordão de solda é a mais crítica e que quando a disposição do tubo na carga é efetuada de maneira que a solda fique apoiada sobre alguma superfície firme, a ocorrência de trinca por fadiga torna-se plausível, principalmente se os procedimentos de manejo, carregamento e transporte não forem realizados da maneira como recomendada pelos fabricantes de tubos e pela norma API.

PALAVRAS-CHAVE: Arco elétrico. Fadiga. Trinca. Solda.

ABSTRACT

Welded steel pipes can be damaged during transport or use. The specific type of damage chosen for this study was the result of cracking due to of fatigue, which is considered to be one of the most common forms of damage, as well as being high risk. In this paper we have studied, through a bibliographical review, steel tubes welded by the manual electric arc welding method, which is manufactured in accordance with API L5. The major emphasis of this study was in the occurrence of fatigue cracks in welds. It was possible to conclude that in tubes welded by coated electric arc, the region adjacent to the weld bead is the most critical, and that when the tube is placed in the load in a such a way that the solder is supported on a firm surface, the occurrence of crack due to fatigue becomes plausible, especially if handling loading, and transportation procedures are not performed in the manner recommended by the tube manufactures and the API standart.

KEYWORDS: Electric arc. Fatigue. Crack. Weld.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Sistema para soldagem a arco com eletrodo de carvão de acordo com a patente de Bernados	18
Figura 2 – Variáveis no processo de soldagem.....	19
Figura 3 – Variação de energia potencial para um composto formado por dois átomos em função da distância existente entre eles	20
Figura 4 – Formação teórica de uma solda pela aproximação das superfícies das Peças	21
Figura 5 – Representação esquemática da superfície metálica limpa	21
Figura 6 – Soldagem por pressão ou deformação	22
Figura 7 – (a) Representação esquemática da soldagem por fusão/ (b) Macrografia de uma junta	23
Figura 8 – Soldagem com Eletrodo Revestido	27
Figura 9 – Ilustração esquemática do processo de laminação controlada, seguida de resfriamento acelerado.....	29
Figura 10 – Fabricação genérica de tubos de aço com costura longitudinal.....	30
Figura 11 – Perfuração de tubos de aço sem costura longitudinal.....	30
Figura 12 – Evolução dos aços API	31
Figura 13 – Desenvolvimento dos aços de alta resistência para tubos.....	33
Figura 14 – Efeitos da microestrutura sobre propriedades de tração e Tenacidade .	33
Figura 15 – Evolução da Soldabilidade dos aços API	34
Figura 16 – Prensagem em “U”	37
Figura 17 – Representação Esquemática do Efeito Baushinger	38
Figura 18 – Soldagem de um Tubo por Eletrodo Revestido.....	39
Figura 19 – Diferentes áreas de ZTA	40
Figura 20 – Macrografia esquemática de uma junta soldada indicando suas diferentes zonas	42
Figura 20 – Ponto de concentração de tensões em tubo de aço soldado, com a solda localizada no ponto de apoio	43
Figura 21 – Representação esquemática da evolução de uma trinca por fadiga destacando-se a geração de estrias na fratura	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Processos de Soldagem por Fusão.....	23
Tabela 2 – Especificações para o aço API 5L X80.....	34
Tabela 3 – Composição química e propriedades do aço API 5L X80, contendo 0,05% de C.....	35
Tabela 4 – Composição química e propriedades do aço API 5L X80, contendo 0,08% de C.....	36

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

API	American Petroleum Institute
ARBL	Aços Alta Resistência Baixa Liga
CCR	Laminação Convencional Controlada (<i>Conventional Controlled Rolling</i>)
MB	Material Base
RCR	Laminação por recristalização (<i>Recrystallization-controlled rolling</i>)
SMAW	<i>Shield Metal Arc Welding</i> (Soldagem a arco metálico revestido)
TMCP	Processo Termomecânico Controlado (<i>Thermomechanical Controlled Process</i>)
ZFL	Zonas de Fragilidade Localizada
ZTA	Zona Termicamente Ativa
ZF	Zona Fundida

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	15
2.1	Objetivo geral	15
2.2	Objetivos específicos.....	15
3	JUSTIFICATIVA.....	16
4.	REVISÃO DA LITERATURA	17
4.1	Histórico da Soldagem.....	17
4.2	Definição de soldagem	18
4.3	Formação de uma junta soldada.....	19
4.4	Processos de soldagem por fusão	23
4.4.1	Processos de Soldagem a Arco Elétrico	25
4.4.1.1	Soldagem a arco elétrico com eletrodos revestidos (SMAW)	26
4.5	Aços Alta Resistência Baixa Liga	27
4.5.1	Métodos de obtenção dos aços ARBL	28
4.5.2	Produção de tubos de aço ARBL para tubulações	29
4.5.3	Aços API.....	31
4.5.4	Aço API 5L X80	32
4.6	Tubos de aço API 5L X80 formados por prensagem e soldados por arco elétrico com eletrodos revestidos	36
4.6.1	Estudo da zona termicamente afetada (ZTA) de tubos soldados por arco elétrico com eletrodos revestidos	39
4.6.2	Tenacidade em juntas soldadas	41
4.7	Fadiga em solda de tubos de aço API 5L X80.....	42
4.8	Ensaio de Fadiga	45
5	METODOLOGIA	48
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	49
	REFERÊNCIAS.....	50

1. INTRODUÇÃO

Por convenção, o vocábulo engenharia está intimamente ligado à criação/invenção de objetos ou sistemas que atendam de alguma forma a demanda da sociedade e aos consumidores finais. A criação de um objeto envolve uma série de etapas, desde a concepção da peça até a gestão do processo de produção, controle de qualidade e assistência técnica ao cliente.

Em relação aos dutos de aço que apresentam soldagem e que são utilizados em diversos processos industriais, o estudo da fadiga sobre estes materiais é de suma importância, uma vez que tais dutos são encarregados de suportar cargas e tensões diversas durante o seu funcionamento e, portanto, o estudo sobre o real dimensionamento de um duto de aço soldado e sua composição química é essencial para a qualidade e o bom funcionamento do mesmo.

O processo de soldagem mais usado para unir juntas circunferenciais em tubulações é o eletrodo revestido, também conhecido habitualmente como SMAW (*Shield Metal Arc Welding*) e, rotineiramente utilizado para os passes de raiz, enchimento e acabamento (FORTES, 2004).

Apesar do preço baixo deste equipamento de soldagem e a qualidade obtida após o processo ser satisfatória, a pequena eficiência e o baixo rendimento são empecilhos comuns, o que compromete a eficácia na sua utilização. Os principais motivos restritivos da utilização da soldagem SMAW são: a limpeza necessária a cada passe de solda, troca contínua do eletrodo durante a soldagem da junta na tubulação, o que aumenta o tempo necessário para a correta soldagem; baixa produtividade do eletrodo revestido devido à formação da escória e inutilização de parte do eletrodo durante o seu uso; cuidados especiais com os eletrodos, tais como manutenção dos mesmos em estufas adequadas, além do soldador precisar apresentar uma familiaridade com este tipo de soldagem, uma vez que é um processo estritamente manual (FORTES, 2004).

A falha de um componente sempre é um acontecimento não esperado, uma vez que ela coloca em risco vidas humanas e provoca perdas de cunho material. O conceito de falha pode ser aplicado quando ocorre um defeito no duto de aço, que pode ser uma fratura ou um dano mais grave, dentro do período de vida útil do mesmo.

As falhas normalmente são o resultado de uma ou mais situações que danificam o componente ou a estrutura envolvida. Entre as principais causas de uma

falha temos: projeto inadequado, defeitos no duto de aço, erros de construção, condições de serviço fora dos parâmetros exigidos e manutenção inadequada e insuficiente.

As estruturas metálicas, inclusive em aço, são projetadas com o objetivo de diminuir tanto a deflexão elástica quanto evitar o escoamento plástico, principais causadores de falhas importantes conhecidas por “fraturas rápidas”.

As falhas resultantes da fadiga, quando ocorrem, são, geralmente, impactantes. São originárias de situações cumulativas e por isso são também conhecidas como “fraturas progressivas”, levando a uma falha que acontece repentinamente. Essas falhas podem variar em intensidade, desde a perda de elasticidade (rigidez) e resistência da estrutura até a fratura total do componente.

As grandes solicitações as quais os tubos de aço estão sujeitos a sofrer, levam à necessidade de construção de tubulações de grande porte. O principal problema é em relação às juntas soldadas, pois há uma escassez de resultados confiáveis quanto ao comportamento da fadiga em juntas soldadas de tubulações de grandes dimensões.

Os estudos acerca da fadiga em juntas soldadas existentes em tubulações, principalmente tubulações que são utilizadas no transporte de gás e petróleo, apresentaram um grande incremento nos EUA, Japão e Inglaterra na década de 1960, surgindo daí as classificações de aços da API (American Petroleum Institute) dos EUA.

Os testes de fadiga em tubos inteiros são bastante onerosos, pois os corpos de prova utilizados são de grande porte, o que gera a necessidade de utilização de equipamentos de alta capacidade de carga. Este tipo de ensaio é cerca de 20 a 50 vezes mais dispendioso que um ensaio em que se utilizam pequenos corpos de prova (BRANCO, 1999).

Neste contexto, o presente trabalho se preocupa em estudar os fatores que propiciam o aparecimento de trincas ocasionadas por fadiga em tubulações que apresentam junta soldada através do método SMAW.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Comprovar através de estudo e de revisão bibliográfica, que um tubo de aço soldado, mesmo tendo sido aprovado em todos os parâmetros e estando em conformidade com a norma de fabricação API 5L, está sujeito a sofrer trincas por fadiga.

2.2 Objetivos específicos

- Estudar os mecanismos de desgaste pela presença de trincas nas soldas existentes nos aços de baixa liga.
- Determinar quais os principais fatores que influenciam no aparecimento de trincas por fadiga em tubulações de aço API 5L X80.

3 JUSTIFICATIVA

É uma tendência cada vez maior no mundo a utilização de dutos como um meio de transporte de insumos da indústria de petróleo e gás, álcool e produtos químicos diversos. As linhas de transmissão estão se tornando cada vez mais extensas, fazendo com que o fluido transportado seja submetido a pressões cada vez maiores. Entretanto, maiores pressões vão ocasionar maiores valores de tensão sobre as paredes dos dutos. Uma saída para tal impasse seria a utilização de dutos com maior espessura de suas paredes, mas do ponto de vista econômico, o aumento da espessura não é viável. O surgimento dos aços do tipo ARBL vem ao encontro dessa necessidade apresentada pelo transporte dutoviário, pois estes aços apresentam grande resistência mecânica, significativa tenacidade e ductilidade, além de serem passíveis de sofrer soldagem, que é essencial na construção de dutos de grande extensão.

No Brasil, cerca de 60% de toda produção de gás e petróleo é transportada pela malha rodoviária, as ferrovias são responsáveis por apenas 21% e o modo aquaviário por 14%. Os sistemas dutoviário e aéreo não alcançam 5% da produção (PORTAL METÁLICA, 2017). Apesar de ser um tipo de transporte com pequeno alcance no Brasil, os dutos de aço estão em franca expansão, pois representam um transporte que possibilita o deslocamento de grandes quantidades de fluido a distâncias consideráveis. Além de questões econômicas imediatas (custos de implantação e manutenção baixos em relação a outros segmentos de transporte), o desenvolvimento e o emprego de novos materiais tornam as linhas dutoviárias cada vez mais seguras, menos sensíveis a falhas.

Apesar de não ser comum em linhas dutoviárias, a probabilidade de ocorrência da ruptura de um duto se torna preocupante, pois a fratura por ser contínua, propicia a progressão do dano em uma grande área, de difícil acesso ou próximo a comunidades, com consequências de grandes proporções, tanto ambientais como econômicas (NASCIMENTO, 2009).

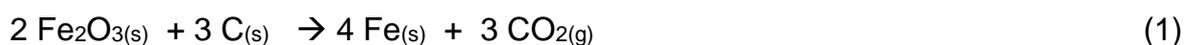
Diante do exposto, fica claro que o estudo sobre os dutos constituídos de aços do tipo ARBL, o método de soldagem utilizado em sua produção e as falhas as quais estes dutos estão suscetíveis é de grande importância para a economia de um país e para as engenharias como um todo.

4. REVISÃO DA LITERATURA

4.1 Histórico da Soldagem

A soldagem é um processo empregado pelo homem desde tempos remotos. Objetos e peças metálicas encontrados no Museu do Louvre e originários da Pérsia Antiga apresentam indicações de terem sido soldados por volta de 4.000 AC. (WELDING.COM, 2017).

A soldagem foi muito utilizada na antiguidade e na idade média, com o objetivo de produzir armamentos e diversos utensílios cortantes. O ferro, nessa época, era obtido por redução direta, que consistia na mistura do minério de ferro com carvão em brasa: o óxido de ferro era reduzido na presença de carbono sem a necessidade de se realizar a fusão do minério a altas temperaturas, como se pode analisar na Eq. 1.

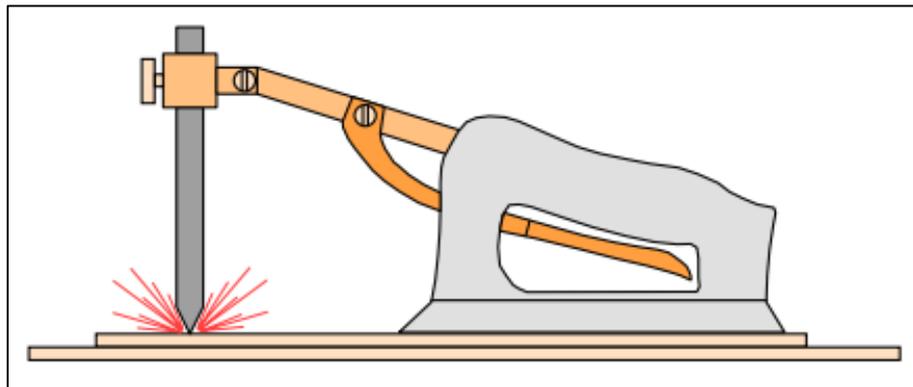


O ferro obtido nesse processo era manipulado por martelamento, produzindo-se blocos de ferro de pequeno tamanho. Quando eram necessárias peças de ferro maiores, as mesmas eram soldadas por forjamento e, por fim, martelava-se a peça até a efetiva soldagem. A redução direta produzia um ferro com baixo teor de carbono, não podendo ser endurecido por uma imersão em banho de água fria (têmpera). O aço, uma liga metálica mais interessante para a confecção de instrumentos, era um material escasso e caro. Portanto, era necessária a junção dos blocos de ferro com tiras de aço, que era possível através da soldagem. Diversos materiais e objetos foram produzidos através desta técnica de soldagem, que produzia instrumentos com alternância de regiões de baixo e alto teor de carbono (MARQUES; MODENESI, 2005).

A fundição passou a ser um processo de suma importância no beneficiamento do minério de ferro, tornando a soldagem por forjamento um processo de menor importância. No século XIX, a tecnologia da soldagem sofreu uma mudança brusca, devido às experiências com o arco elétrico de Humphrey Davy (1801-1806), e a descoberta do gás acetileno e novos processos de geração de energia elétrica que possibilitaram a soldagem por fusão (WELDING.COM, 2017).

Em 1885, na Inglaterra, Nikolas Bernados e Stanislav Olszewsky patentaram o processo de soldagem, sendo esta baseada em um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo de carvão e a peça a ser soldada (WELDING.COM, 2017). Na FIG. 1 é possível visualizar um desenho representativo deste tipo de dispositivo.

Figura 1 – Sistema para soldagem a arco com eletrodo de carvão de acordo com a patente de Bernados



Fonte: MARQUES, 2005, p. 4.

No final do século XIX, vários processos de soldagem já haviam sido desenvolvidos, tais como: por resistência, aluminotermia e a gás. No ano de 1907, o sueco Oscar Kjellberg patenteia a soldagem a arco com eletrodo revestido.

Basicamente, o revestimento do eletrodo apresentava uma camada de cal, que tinha como função promover a estabilização do arco. A soldagem a arco manual (SMAW) se tornou o processo mais usado no mundo, devido à sua simplicidade e eficácia em diversos procedimentos (WELDING.COM, 2017).

O grande desenvolvimento na união de materiais metálicos aconteceu no final do século XIX, ganhando um notável incremento nos últimos 60 anos (MACHADO, 1996).

4.2 Definição de soldagem

Vários processos utilizados na fabricação e manutenção de peças, equipamentos e estruturas em geral, são abrangidos pela palavra soldagem. A soldagem é tida como uma técnica de fusão de materiais, porém, muitos processos de soldagem são utilizados para a deposição de material sobre uma superfície, tendo

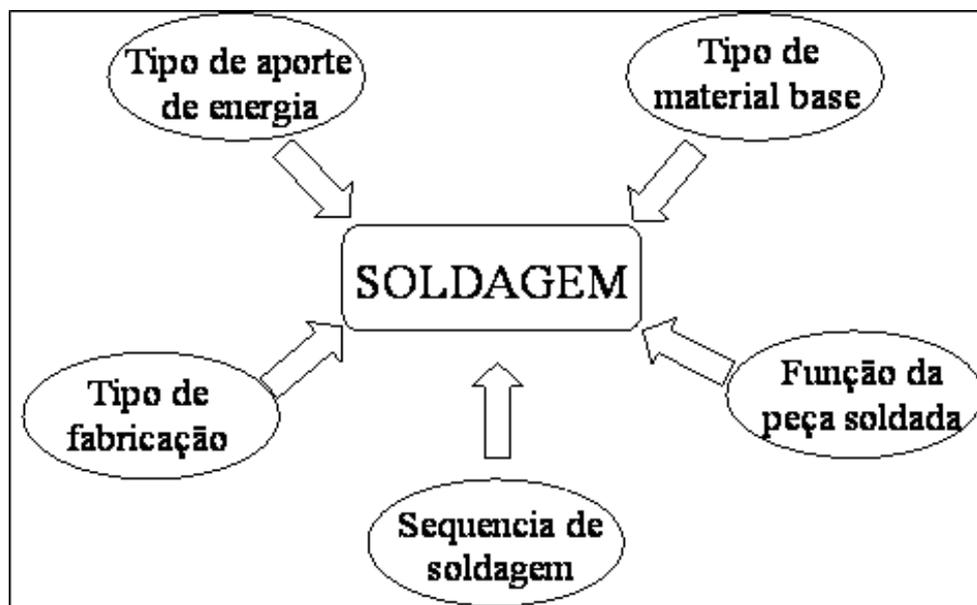
em vista a regeneração de peças deterioradas ou para a geração de um invólucro sobre determinada peça (MARQUES; MODENESI, 2005).

De forma geral, a soldagem pode ser definida como um procedimento que tem como objetivo principal conseguir a união de duas ou mais peças metálicas, proporcionando na junta soldada a continuidade das propriedades físicas e químicas essenciais ao seu desempenho (NERIS, 2012).

São contabilizados atualmente mais de 70 processos de soldagem utilizados em todo o mundo, não sendo um número fixo, uma vez que inúmeros outros processos estão sendo aperfeiçoados por pesquisas, possibilitando novas alterações no horizonte da soldagem.

A FIG. 2 mostra os fatores envolvidos no processo de soldagem; percebe-se que para apresentar um resultado interessante na soldagem, deve-se levar em consideração principalmente o tipo de processo desejado, o material usado e a sequência de realização da solda.

Figura 2 – Variáveis no processo de soldagem



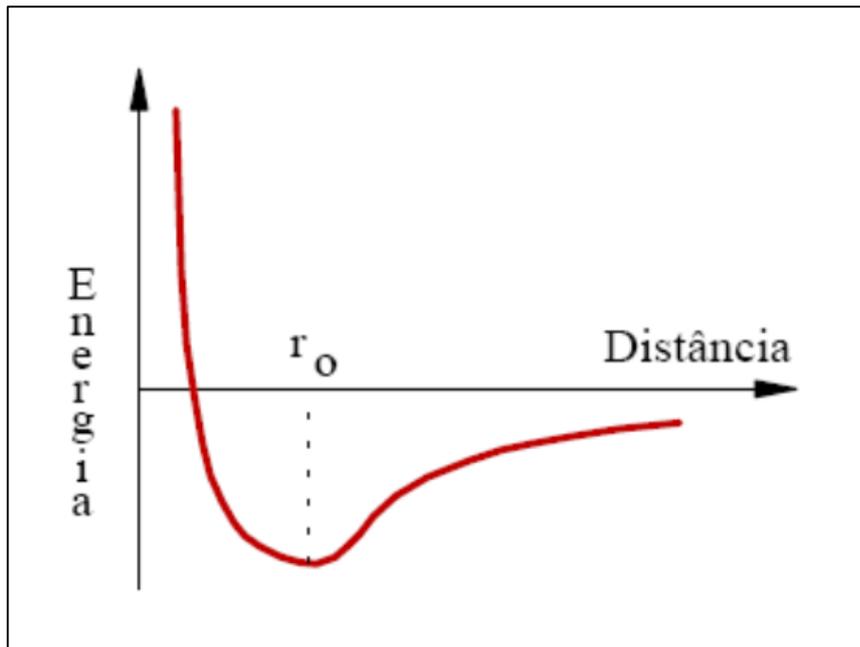
Fonte: Apostila Unisanta, p. 3.

4.3 Formação de uma junta soldada

Segundo Modenesi (2005), de forma simplista, uma peça metálica é formada por um grande número de átomos dispostos em uma determinada estrutura cristalina. Átomos localizados no interior da estrutura cristalina são cercados por um número de

átomos vicinais próximos, situados a uma distância r_0 entre eles, na qual a energia do sistema apresenta um valor mínimo, configurando uma situação de maior estabilidade, como mostra a FIG. 3.

Figura 3 – Variação de energia potencial para um composto formado por dois átomos em função da distância existente entre eles

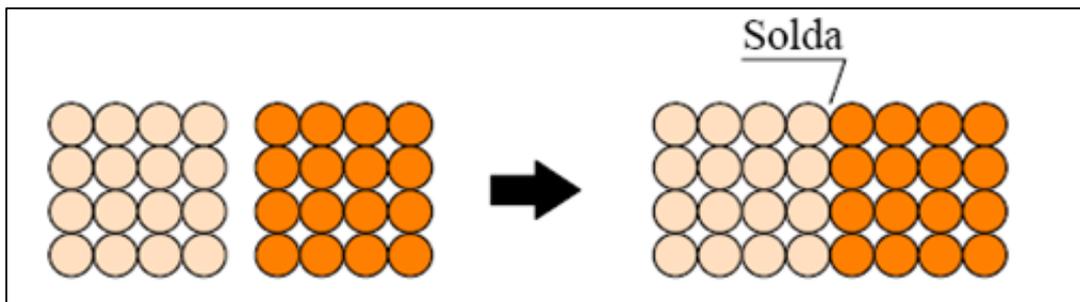


Fonte: MARQUES, 2005, p.5

Ainda de acordo com Modenesi (2005), neste contexto, cada átomo está em sua condição de energia mínima. Na superfície do sólido, contudo, esta condição de energia mínima não perdura, pois existem menos átomos vicinais ligados aos átomos que estão presentes na junta soldada. Isso configura, portanto, um maior nível de energia nos átomos da superfície do que nos átomos do interior. Esta energia pode ser diminuída quando os átomos superficiais se ligam a outros.

Assim, aproximando-se duas peças metálicas a uma distância suficientemente pequena para a formação de uma ligação permanente, uma solda entre as peças seria formada, como ilustrado na FIG 4.

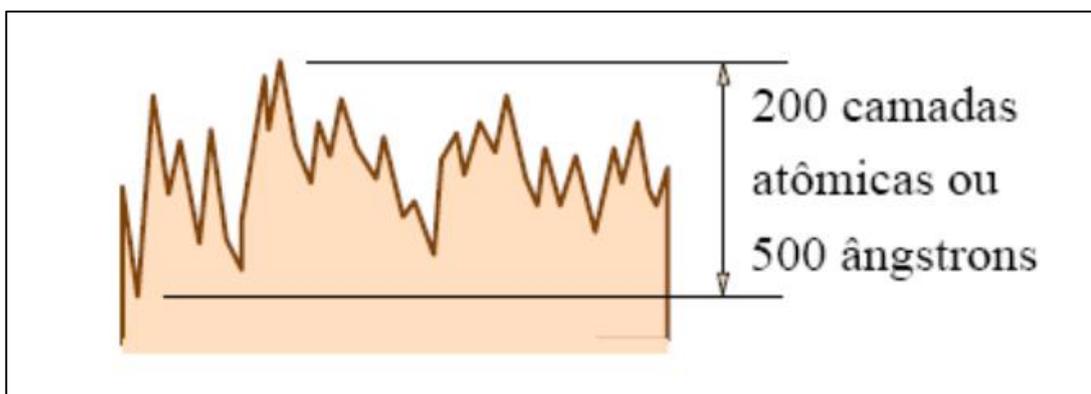
Figura 4 – Formação teórica de uma solda pela aproximação das superfícies das peças



Fonte: MARQUES, 2005, p. 6

No entanto, percebe-se que isto não acontece quando tenta se aproximar duas peças metálicas, pois a junção total de duas peças metálicas só ocorre em condições muito favoráveis. A justificativa para tal fato é a ocorrência de barreiras que impossibilitam uma aproximação de fato das superfícies até distâncias da ordem de r_0 , como se vê na FIG. 5. As superfícies metálicas, inclusive as mais lisas, possuem muitas irregularidades, tanto em proporção microscópica como sub-microscópica. Essas irregularidades possuem altura de 50nm (500 ângstrom), o que equivale a mais ou menos 200 camadas atômicas, que acabam impedindo uma real aproximação das superfícies. A aproximação efetiva ocorre somente em alguns pontos de contato fazendo com que o número de ligações estabelecidas seja insuficiente para garantir qualquer resistência para a junta soldada. (MARQUES; MODENESI, 2015). Um esquema que representa essas rugosidades presentes na superfície de um metal está representado na FIG. 5.

Figura 5 – Representação esquemática da superfície metálica limpa

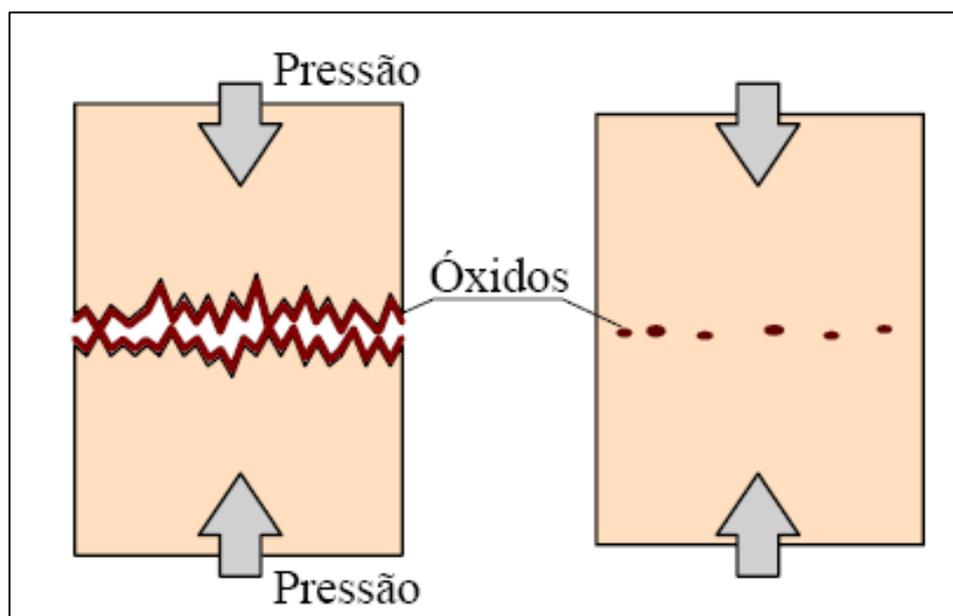


Fonte: MARQUES, 2005, p.6

As superfícies metálicas apresentam frequentemente uma cobertura/revestimento de composição variável, podendo ser constituída por camadas de óxidos, gordura, poeira e umidade, que acabam por impedir um contato efetivo entre as superfícies, dificultando a formação da solda. Estas camadas se formam instantaneamente e constituem o resultado das ligações químicas incompletas existentes na superfície do metal (MARQUES; MODENESI, 2005).

Estas irregularidades presentes na superfície dos metais podem ser minimizadas através de dois procedimentos mais comuns, que originam os dois processos de soldagem utilizados comumente. O primeiro método utiliza pressão para deformar as superfícies de contato, possibilitando a união dos átomos a distâncias da ordem de r_0 . As peças metálicas podem ser aquecidas no ponto que se quer fazer o contato, facilitando assim, a deformação da peça (MARQUES; MODENESI, 2005). Um esquema de soldagem por pressão pode ser visualizado na FIG. 6.

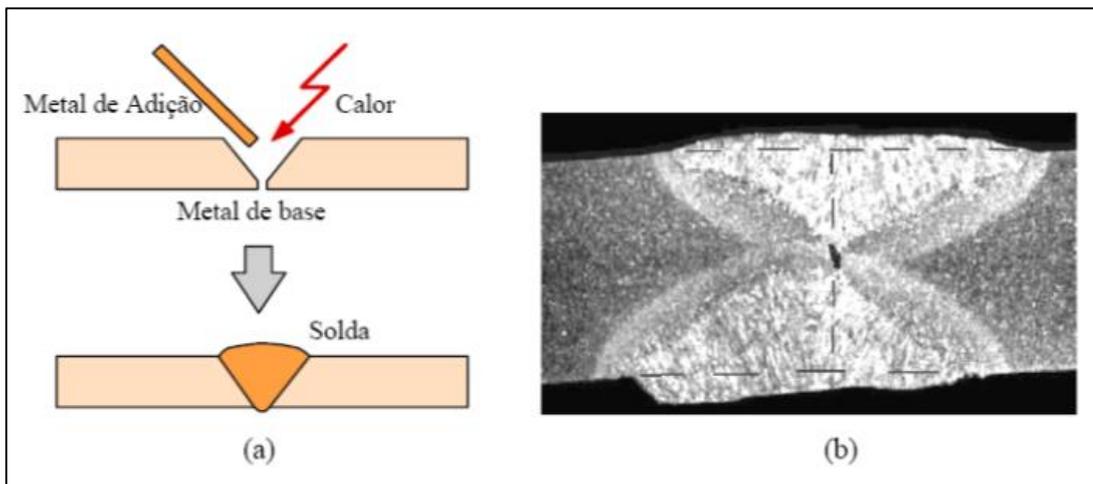
Figura 6 – Soldagem por pressão ou deformação



Fonte: MARQUES, 2005, p. 7.

O segundo método se processa com a utilização de calor no local de união das peças metálicas até a fusão completa, desarranjando as superfícies de contato e produzindo a união pela solidificação do metal após a fusão (MARQUES; MODENESI, 2005). O esquema da soldagem por aquecimento (fusão) está representado na FIG. 7.

Figura 7 – (a) Representação esquemática da soldagem por fusão
 (b) Macrografia de uma junta



Fonte: MARQUES, 2005, p.7

4.4 Processos de soldagem por fusão

Existe uma enorme variedade de processos de soldagem por fusão. Estes processos podem ser separados de acordo com a fonte de energia utilizada para promover a fusão das peças. A fonte de energia mais comum é o arco elétrico, sendo este o de maior importância na atividade industrial atual (MARQUES; MODENESI, 2005). Além de unir os diferentes materiais, a soldagem por fusão, costumeiramente, ocasiona mudanças em sua microestrutura, composição química e distribuição física, com o possível aparecimento de porosidades, inclusões, falta de fusão e trincas na junta, geralmente provocadas por fadiga. Mudanças não acontecem unicamente na zona fundida, mas também nas regiões sólidas próximas a ela, que sofrem bastante influência do intenso aquecimento/resfriamento (SANTOS, 2001). A TAB. 1 mostra os principais processos de soldagem por fusão.

Tabela 1 – Processos de Soldagem por Fusão

Processo	Fontes de Calor	Tipo de Corrente e Polaridade	Agente Protetor ou de Corte	Outras Características	Aplicações
Soldagem por eletro-escória	Aquecimento por resistência da escória líquida	Contínua ou alternada	Escória	Automática/Mecanizada. Junta na vertical. Arame alimentado mecanicamente na poça de fusão. Não existe arco.	Soldagem de aços carbono, baixa e alta liga, espessura ≥ 50 mm. Soldagem de peças de grande espessura, eixos, etc.

Continuação (tabela anterior)

Soldagem ao Arco Submerso	Arco Elétrico	Contínua ou alternada Eletrodo +	Escória e gases gerados	Automática/Mecanizada ou semi-automática. O arco arde sob uma camada de fluxo granular	Soldagem de aços carbono, baixa e alta liga. Espessura ≥ 10 mm. Posição plana ou horizontal de peças estruturais, tanques, vasos de pressão e etc.
Soldagem com eletrodos revestidos	Arco Elétrico	Contínua ou alternada Eletrodo + ou -	Escória e gases gerados	Manual. Vareta metálica recoberta por camada de fluxo.	Soldagem de quase todos os metais, exceto cobre puro, metais preciosos, reativos e de baixo ponto de fusão. Usado na soldagem em geral.
Soldagem com Arame Tubular	Arco Elétrico	Contínua. Eletrodo +	Escória e gases gerados ou fornecidos por fonte externa. Em geral o CO ₂	O fluxo está contido dentro de um arame tubular de pequeno diâmetro. Automático ou semi-automático.	Soldagens de aço carbono com espessura ≥ 1 mm. Soldagem de chapas.
Soldagem MIG/MAG	Arco Elétrico	Contínua. Eletrodo +	Argônio ou Hélio, Argônio + O ₂ , Argônio + CO ₂ , CO ₂	Automática/Mecanizada ou semi-automática. O arame é sólido.	Soldagem de aços carbono, baixa e alta liga, não ferrosos, com espessura ≥ 1 mm. Soldagem de tubos, chapas e etc. Qualquer posição.
Soldagem a plasma	Arco Elétrico.	Contínua. Eletrodo -	Argônio, Hélio ou Argônio + Hidrogênio	Manual ou automática. O arame é adicionado separadamente. Eletrodo não consumível de tungstênio. O arco é constricto por um bocal.	Todos os metais importantes em engenharia, exceto Zn, Be e suas ligas, com espessura de até 1,5 mm. Passes de raiz.
Soldagem TIG	Arco Elétrico	Contínua ou alternada. Eletrodo -	Argônio, Hélio ou misturas destes.	Manual ou automática. Eletrodo não consumível de tungstênio. O arame é adicionado separadamente.	Soldagem de todos os metais, exceto Zn, Be e suas ligas, espessura entre 1 e 6 mm. Soldagem de não ferrosos e aço inox. Passe de raiz de soldas em tubulações.
Soldagem por feixe eletrônico	Feixe eletrônico	Contínua. Alta tensão. Peça +	Vácuo ($\geq 10^{-4}$ mmHg)	Soldagem automática. Não há transferência de metal. Feixe de elétrons focalizado em um pequeno ponto.	Soldagem de todos os metais, exceto no caso de evolução de gases ou vaporização excessiva. Indústria Nuclear e aeroespacial.

Soldagem a laser	Feixe de luz		Argônio ou Hélio	Soldagem automática. Não há transferência de metal. Feixe de elétrons focalizado em um pequeno ponto.	Como acima. Corte de materiais não metálicos.
Soldagem a gás	Chama oxi-acetilênica		Gás (CO, H ₂ , CO ₂ , H ₂ O)	Manual. Arame adicionado separadamente.	Soldagem manual de aço carbono, Cu, Al, Zn e Pb e bronze. Soldagem de chapas finas e tubos de pequeno diâmetro.

Fonte: MARQUES, 2005, p. 8.

4.4.1 Processos de Soldagem a Arco Elétrico

Arco elétrico pode ser entendido como “a descarga elétrica mantida através de um gás ionizado, iniciada por uma quantidade de elétrons emitidos do eletrodo negativo (cátodo) aquecido e mantido pela ionização térmica do gás aquecido” (BRAZ; HELOÍSA, 1999).

Entre estes dois eletrodos há o plasma, região onde ficam concentrados os gases ionizados. Os elétrons enviados do cátodo passam pela coluna do arco na forma de elétrons livres e íons até o ânodo, onde convertem energia cinética em calor. Durante o percurso dos elétrons, ocorrem inúmeras colisões entre os íons e os elétrons livres. Essas colisões fazem com que a temperatura no interior do arco chegue a aproximadamente 6.000 °C, no caso de eletrodos revestidos (BRAZ; HELOÍSA, 1999).

Um arco elétrico é produzido quando dois condutores de corrente elétrica (dois eletrodos) são unidos para fazer o contato elétrico e, depois deste contato são separados, fazendo com que a resistência gerada devido ao fluxo da corrente, aumente consideravelmente a temperatura das extremidades dos eletrodos, bem como a temperatura do pequeno espaço de ar entre estes mesmos eletrodos. Os elétrons oriundos do eletrodo negativo (cátodo) chocam-se com as moléculas e átomos dos constituintes do ar, fragmentando-os em íons e elétrons livres, tornando o ar um condutor de corrente devido à ionização. Isto promove a corrente através do espaço de ar e mantém o arco; na prática, para acionar o arco, o soldador atrita a extremidade do eletrodo na peça a soldar e depois o afasta rapidamente. No momento do contato, a corrente atravessa o circuito e continua a circular quando o eletrodo é afastado, formando um arco (UNIVERSIDADE SANTA CECÍLIA – UNISANTA, 2017).

4.4.1.1 Soldagem a arco elétrico com eletrodos revestidos (SMAW)

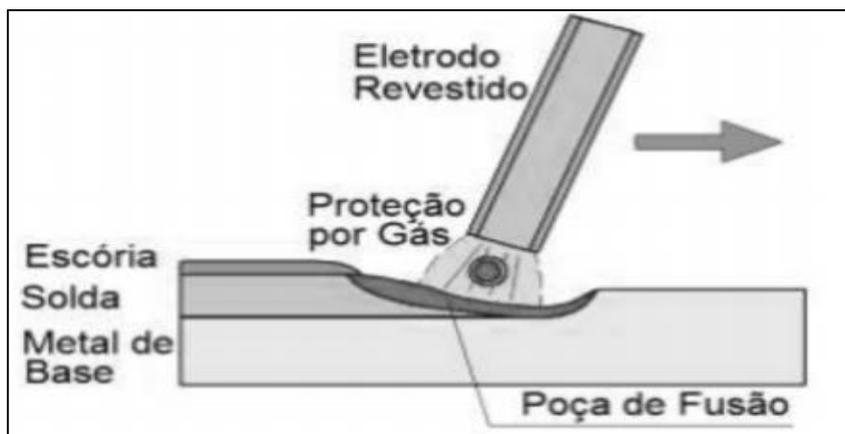
A soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*) é o procedimento mais comumente utilizado no mundo para se obter a união das juntas circunferenciais da soldagem em tubulações (BAY, 2001).

Este processo de soldagem surgiu no final do século XIX/início do século XX com o uso de arames para cercas que eram ligados diretamente à rede elétrica, um processo barato, mas que apresentava inúmeras restrições (O'BRIEN,1991). A soldagem acontece pela geração de calor, sendo este produzido por um arco elétrico mantido entre a extremidade do eletrodo revestido e a peça a ser soldada. O calor gerado pelo arco ocasiona a fusão do metal (alma do eletrodo), o revestimento e o metal de base (FORTES, 2004).

O metal é depositado através das gotas fundidas e recebe uma proteção dos gases gerados pelo revestimento e uma camada de escória é obtida sobre o cordão de solda. Esta escória protege o cordão de solda do poder oxidante da atmosfera durante o resfriamento. O revestimento também apresenta outras funções, tais como: promover estabilidade no arco; adicionar elementos de liga ao cordão de solda; atuar como isolante elétrico (FORTES, 2004). Os dispositivos utilizados no processo de soldagem SMAW consistem de uma fonte de energia, cabos conectores, um porta-eletrodo e um grampo terra. A corrente de saída pode ser alternada ou contínua, sendo que o eletrodo pode estar no polo negativo (polaridade direta) ou polo positivo (MARQUES; MODENESI,2005).

As vantagens da utilização deste tipo de soldagem são: simplicidade do processo; necessidade de apenas uma fonte de energia que apresenta corrente constante; utilização de apenas dois cabos elétricos e o eletrodo; pode ser utilizado em qualquer posição de soldagem e para quase todas as espessuras (FORTES, 2004). No entanto, as desvantagens são: baixas taxas de deposição do metal em comparação com outros processos sendo, portanto, menos eficiente; necessita de maior treinamento da mão de obra (FORTES, 2004). A FIG. 8 ilustra o processo de soldagem manual a arco elétrico com eletrodos revestidos (SMAW).

Figura 8 – Soldagem com Eletrodo Revestido



Fonte: <<http://www.demet.eng.ufmg.br/wpcontent/uploads/2012/10/metalurgia.pdf>>.

4.5 Aços Alta Resistência Baixa Liga

Aços denominados ARBL (Aços Alta Resistência Baixa Liga) são aqueles que possuem concentração de carbono entre 0,05% e 0,25% e concentração de manganês de até 2,0% em massa. Outros metais também podem ser encontrados neste tipo de aço, tais como níquel, molibdênio, nitrogênio, cobre, vanádio, cromo, nióbio, titânio e zircônio, mas com concentrações raramente excedendo a 0,1% em massa (MEESTER, 2007).

Os aços do tipo ARBL foram inicialmente criados para suprir a demanda e as necessidades da indústria petrolífera e de gás e como a eficiência na utilização desse aço foi plausível, o seu uso foi ampliado para outros tipos de indústria, tais como a automotiva e a de estruturas (MEESTER, 2007).

As principais características dos aços ARBL são a excelente tenacidade em temperaturas baixas e o seu alto limite de resistência (RODRIGUES; PERELOMA; SANTOS, 2000), boa soldabilidade que é causada pelo baixo teor de carbono (MEESTER, 2007) e boa conformabilidade (SENUMA, 2000). Existem três classificações para os aços ARBL, conforme citadas a seguir.

Aços microligados: apresentam todos os elementos químicos citados anteriormente, mas em concentrações muito baixas; é a classificação mais comum. Aços com microestrutura ferrita acicular: contém pequena quantidade de carbono (< 0,1% em massa), além de manganês, boro e molibdênio, que cumprem a função de elementos de liga principais. Aços Dupla-Fase: constituídos por pequenas junções de Martensita e alta concentração de carbono, distribuídos de modo uniforme numa

matriz de ferrita. Neste tipo de aço, a Martensita ocupa em torno de 20% do volume total (CASTI, 2000).

Paules (1991) cita como principais vantagens do aproveitamento dos aços ARBL a resistência a grandes cargas, mesmo possuindo espessuras mais finas, o que gera economia de matéria-prima, reduzindo o custo final do projeto; os aços microligados podem substituir com eficiência um aço ligado que apresenta metais nobres e caros na sua constituição além de não necessitarem de tratamento térmico prévio. E por fim, os aços microligados, quando em formato de lâminas são tão eficientes quanto os aços normalizados ou revenidos.

4.5.1 Métodos de obtenção dos aços ARBL

De forma geral, pode-se dizer que existem dois métodos para se obter as propriedades mecânicas requeridas nos aços ARBL. O primeiro método consiste em se realizar uma adequada composição química e o segundo por meio do Processo Termomecânico Controlado – TMCP (*Thermomechanical Controlled Process*). Com estes dois processos consegue-se obter um bom refinamento do tamanho do grão, o que é de suma importância, uma vez que o tamanho do grão apresenta relação direta com o limite de escoamento e a tenacidade apresentada pelo aço (ZHAO; YANG; SHAN, 2002).

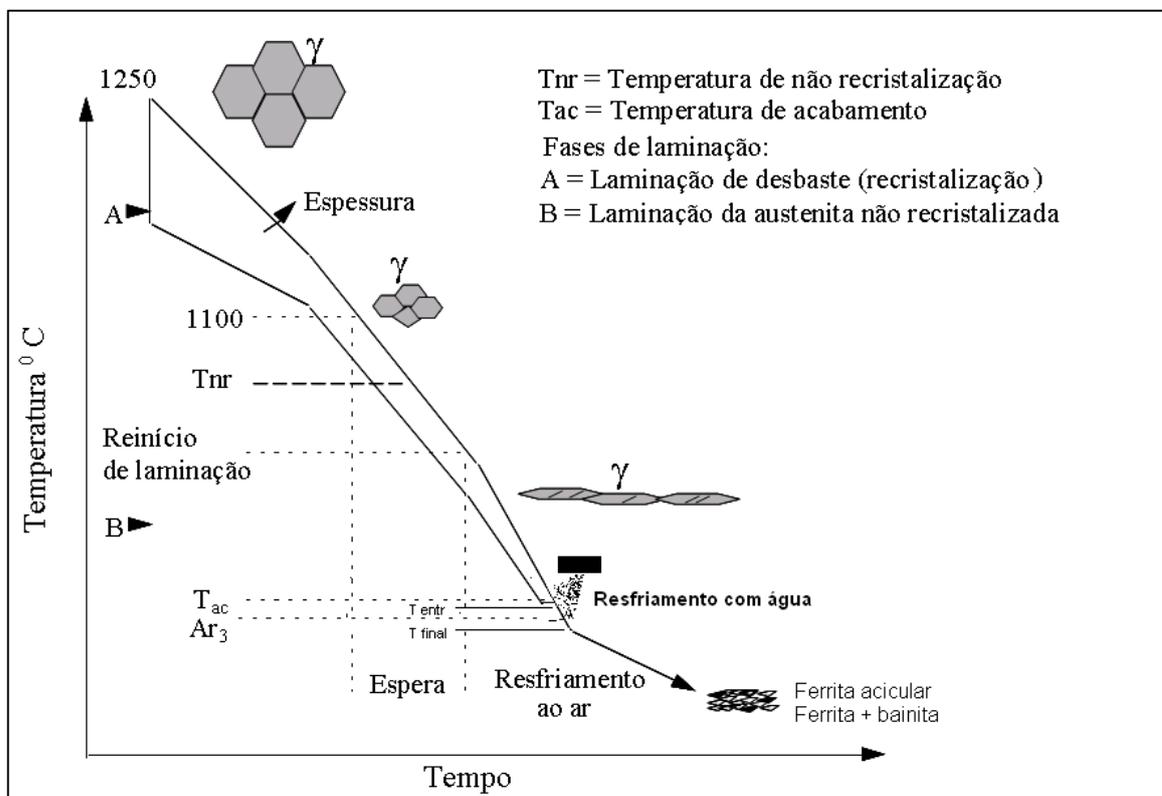
A composição química é feita pela adição ao aço de compostos metálicos constituintes de elementos de microliga, que produzem o refinamento do tamanho do grão e o fortalecimento da solução sólida através de precipitação. Os dois fenômenos são o resultado da precipitação de pequenas microligas de nitretos (NbN, VN, TiN), carbonetos (NbC, VC, TiC) ou compostos complexos carbonitretos [Nb(C,N), V(C,N), Ti(C,N)] (ROBERTS, 1983).

Já o método TMCP (Processo Termomecânico Controlado) é realizado através de um rígido controle em relação ao processo de laminado a quente, com enfoque na temperatura e deformação durante as etapas finais de fabricação do aço, e as condições de resfriamento após a laminação final. Posteriormente, é feita uma nova laminação a quente para a produção de chapas e fabricação dos tubos (ZHAO; YANG; SHAN, 2002).

Existem dois processos mais comuns de laminação a quente utilizados na obtenção dos aços ARBL: Laminação por recristalização (*Recrystallization-controlled rolling-RCR*), que consiste na produção de ferrita com um pequeno tamanho de grão e com temperaturas de reaquecimento acima de 1100 °C e a laminação ocorrendo entre 1100 °C e 900 °C. Este processo envolve o rígido controle do crescimento de grão da Austenita durante o reaquecimento, e inibição do crescimento do grão durante e após a laminação. Após a última laminação, os grãos de Austenita recristalizam-se, transformando-se em grãos finíssimos de Ferrita. Já o segundo processo, conhecido como Laminação Convencional Controlada (*Conventional Controlled Rolling-CCR*), fundamenta-se em uma laminação inicial na faixa de temperatura entre 1220 °C e 1100 °C e uma segunda laminação a temperaturas mais baixas, em torno de 900 °C e 700 °C (ZHAO; YANG; SHAN, 2002), como pode ser observado na FIG. 9.

Neste método a temperatura decresce e, portanto, a recristalização da Austenita é prejudicada, tornando o processo mais demorado (STUART, 1991).

Figura 9 – Ilustração esquemática do processo de laminação controlada, seguida de resfriamento acelerado



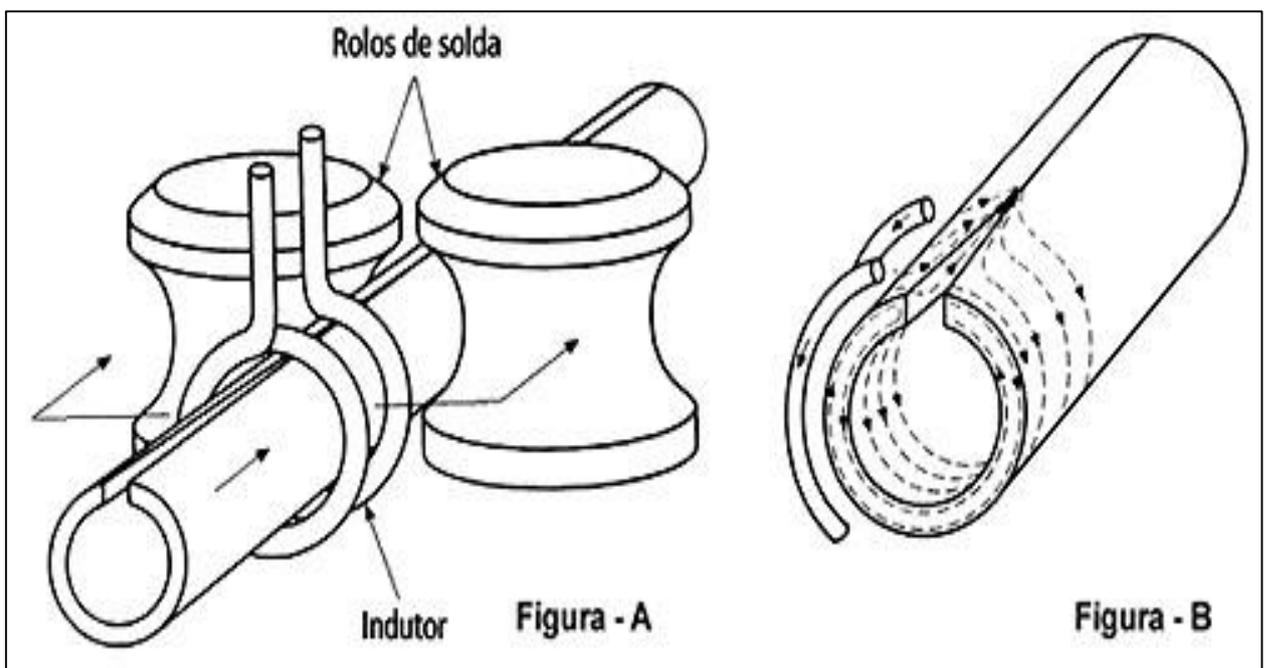
Fonte: SHIGA, 1981.

4.5.2 Produção de tubos de aço ARBL para tubulações

Existem dois tubos de aço mais comuns na construção de tubulações: com costura longitudinal e sem costura.

O tubo de aço com costura longitudinal apresenta inúmeros processos de fabricação. O que diferencia o processo de fabricação é o número de soldas longitudinais feitas no tubo e o tipo de soldagem utilizado. Na FIG. 10 tem-se o processo de produção genérico de tubos de aço com costura longitudinal. Os tubos utilizados na construção de tubulações são comumente produzidos a partir de chapas de aço ARBL. Já os tubos sem costura são obtidos a partir de um estiramento sem a necessidade de solda longitudinal, já que são obtidos a partir de cilindros de aço que passam por um processo de aquecimento a altíssimas temperaturas, que os tornam doces e passíveis de serem perfurados, como exemplificado na FIG. 11 (KENNEDY, 1993).

Figura 10 – Fabricação genérica de tubos de aço com costura longitudinal



Fonte: <<https://www.industria hoje.com.br/diferenca-tubos-de-aco-com-costura-sem-costura>>.

Figura 11 – Perfuração de tubos de aço sem costura longitudinal



Fonte: <<https://www.industria hoje.com.br/diferenca-tubos-de-aco-com-costura-sem-costura>>.

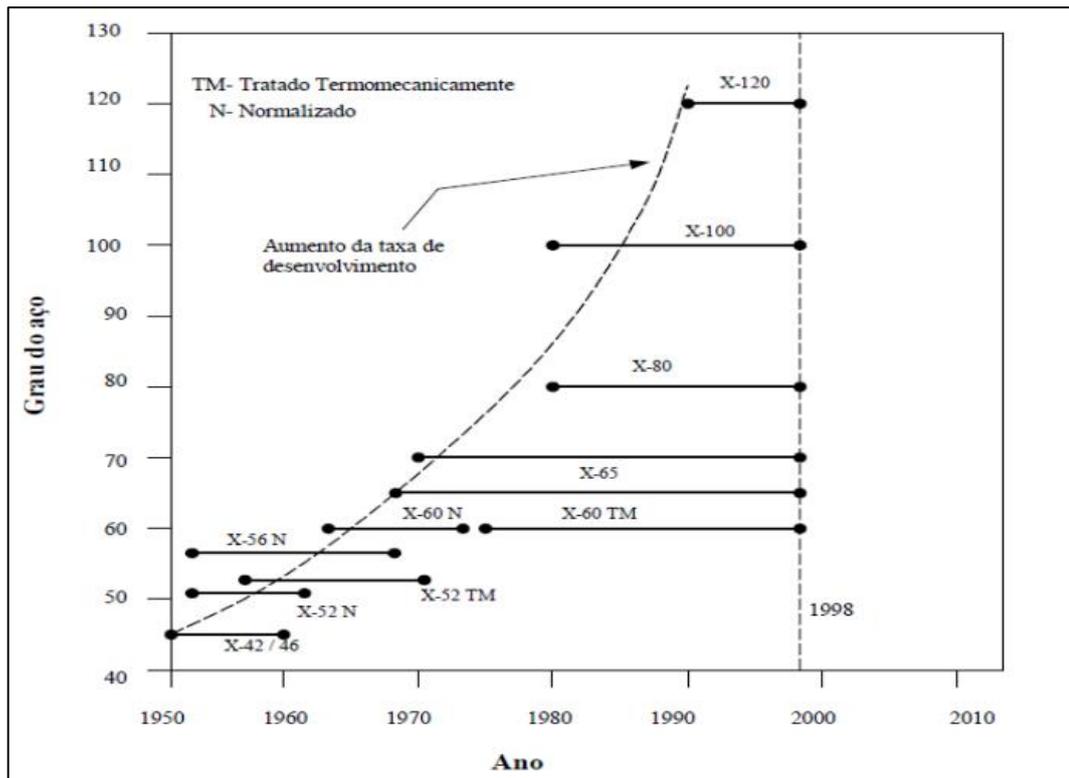
Segundo BATISTA (2003), ocorreu um “boom” no desenvolvimento de aços para tubulações a partir da década de 70, com a substituição do tratamento térmico pelo processamento termomecânico. Neste contexto, o aço do tipo API 5L X70 tornou-se o aço mais utilizado na construção de tubulações na década de 1980.

Com a introdução do resfriamento acelerado após se realizar a laminação a quente (processo TMCP), foi possível a obtenção de um aço mais resistente, que ficou conhecido como aço API 5L X80, que apresenta limite de escoamento superior a 550 MPa (BOTT, 2003).

4.5.3 Aços API

Os aços mais comumente utilizados nas tubulações de transporte de fluidos, principalmente petróleo e gás, apresentam classificação segundo a API (*American Petroleum Institute*). Esta classificação leva em consideração a aplicação do aço, composição química e resistência mecânica. Os aços utilizados notadamente na fabricação de tubulações para linhas de transmissão seguem o padrão API 5L (*Specification for Line Pipe Steel*).

Figura 12 – Evolução dos aços API



Fonte: GRAY, 2001.

Os aços API sofreram muitas alterações em relação ao processo de fabricação e à composição química ao longo dos anos. Estas transformações estão representadas na figura anterior (FIG. 12). A evolução representada na figura anterior contribuiu para a diminuição considerável do peso das tubulações, como sugere a indústria de tubulações Canadense, ao comprovar que o peso de uma tubulação pode ser reduzido da ordem de 14% ao se utilizar um aço com grau API X70 em relação ao X60 e uma redução de 12,5% quando utilizado o grau X80 (GRAY, 1987).

4.5.4 Aço API 5L X80

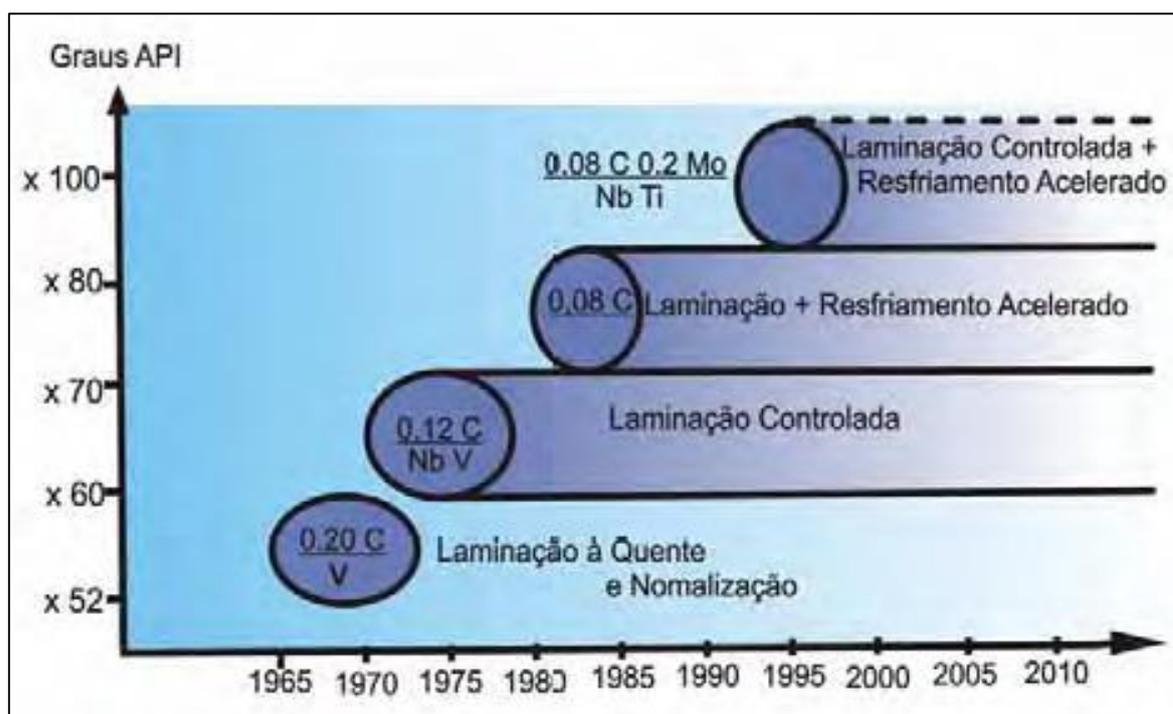
São variadas as alternativas metalúrgicas para a produção dos aços API com classificação X, existindo entre 50 e 60 possibilidades entre os graus X70 e X80, que são predominantemente associadas às composições químicas e ao processo de laminação (GRAY; PONTREMOLI, 1987). Os projetos de tubulação para o transporte de derivados do petróleo já eram uma preocupação corrente da engenharia desde antes do século XX, com o aumento da demanda e consumo de óleos combustíveis. Segundo Leis e Bubenik (2001), os primeiros oleodutos e gasodutos foram produzidos

a partir dos anos 1930, com a necessidade de se transportar gás natural e óleos combustíveis e, nesse contexto, ocorreu o desenvolvimento dos tubos de aço, bem como os métodos de soldagem.

Isto levou à necessidade de produção de tubulações com diâmetros cada vez maiores e adequadas para suportar maiores pressões, tanto internas como externas. Tubos de aço soldados que apresentam grande diâmetro são utilizados principalmente no transporte de gás e óleo, pois oferecem grande segurança na operação além de representarem um ganho econômico. Baseando-se nessas características, novos aços com alta resistência e adaptados para soldagem foram desenvolvidos, impedindo ou diminuindo a possibilidade de ocorrência de falhas por fadiga. O desenvolvimento do aço API 5L X80, como mostrado na FIG. 13, já levava em consideração uma alteração no processo de laminação a quente e subsequente tratamento térmico, para o processo de laminação controlada do aço microligado ao nióbio e vanádio com concentrações cada vez menores de carbono (GRAY, 2007).

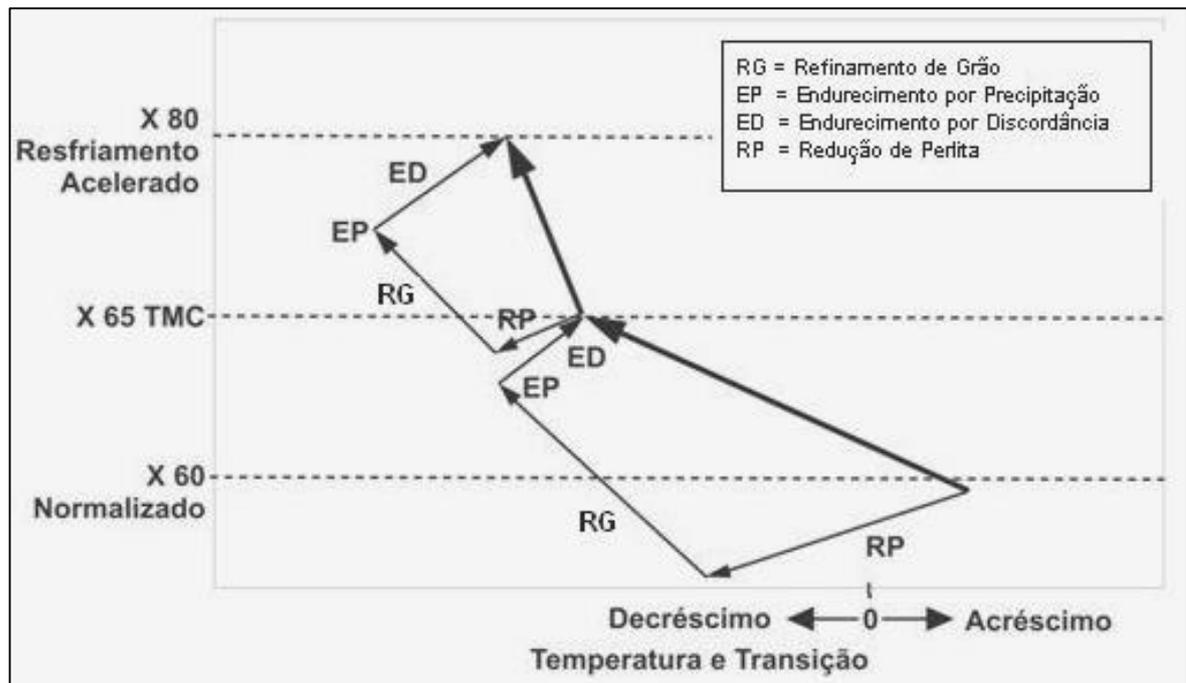
A microestrutura de um aço (discordâncias, contorno de grão e precipitações) apresenta grande influência nas propriedades mecânicas do mesmo (FRAGIEL et al., 2005). A conjunção de diferentes tipos de microestruturas colabora no aumento da resistência mecânica e tenacidade dos aços, como pode ser visto na FIG. 14.

Figura 13 – Desenvolvimento dos aços de alta resistência para tubos



Fonte: GRAY, 2007.

Figura 14 – Efeitos da microestrutura sobre as propriedades de tração e tenacidade



Fonte: SHIGA et al., 1981.

Atualmente, os aços do tipo ARBL possuem concentrações de carbono menores que 0,1% e, dessa maneira, o parâmetro usado para medir a capacidade de soldabilidade tem sido o chamado “carbono equivalente”, presente na estrutura (C_{eq}), que é definido pela norma API 5L 2000 (API, 2001), e é aqui descrito pela Equação 2.

$$C_{eq} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5.B \quad (2)$$

Os critérios para especificação da composição química e propriedades mecânicas do aço API 5L X80 se encontram na TAB. 2.

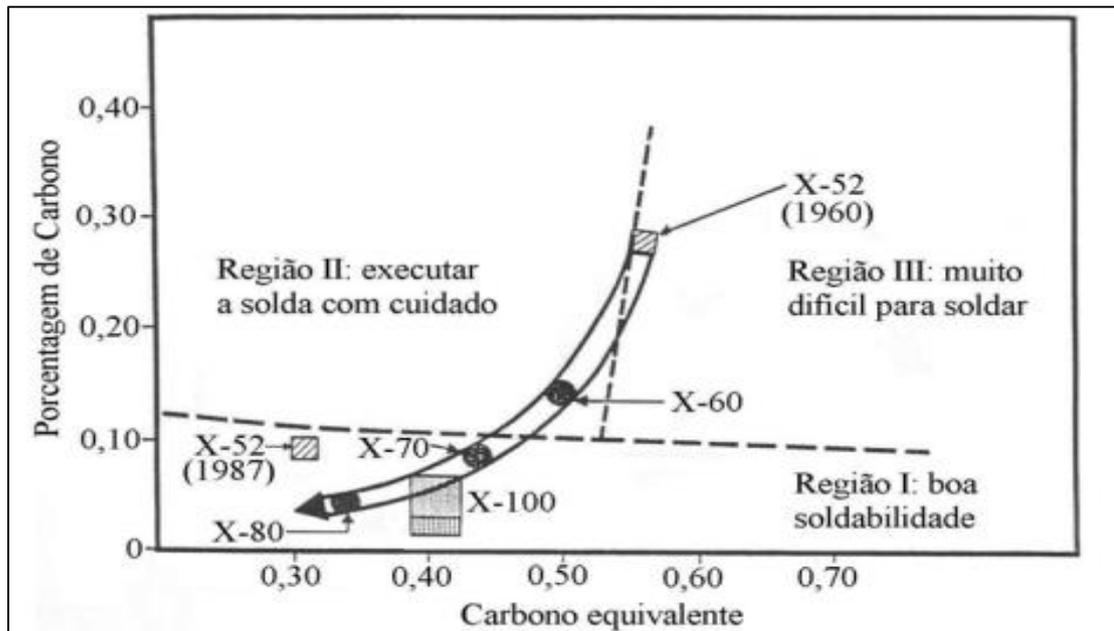
Tabela 2 – Especificações para o aço API 5L X80

Composição Química	$C \leq 0,18\%$
	$Mn \leq 1,80\%$
	$P \leq 0,030\%$
	$S \leq 0,018\%$
Carbono equivalente (C_{eq})	$C_{eq} \leq 0,25\%$
Ensaio de tração	$\sigma_{LE} \geq 80\text{ksi (550MPa)}$
	$\sigma_{LR} = 90 \text{ a } 120 \text{ ksi (620 a 827MPa)}$
	$\sigma_{LE} / \sigma_{LR} \leq 0,93$
Tenacidade a 0°C no metal base	Energia absorvida $\geq 68\text{J}$

Fonte: American Petroleum Institute, 2001.

Importante ressaltar que a preocupação corrente dos usuários de dutos fabricados com aço API é a capacidade de soldabilidade, a qual aumenta com a diminuição do teor de carbono e do valor de carbono equivalente na estrutura (GRAY; PONTREMOLI, 1987), o que pode ser visto na FIG. 15.

Figura 15 – Evolução da Soldabilidade dos aços API



Fonte: GRAY; PONTREMOLI, 1987.

Após verificações laboratoriais e industriais, notou-se que a escolha certa da composição química e dos parâmetros de laminação controlada, permitiam produzir

aços API 5L X80 contendo ferrita acicular com quantidades de carbono menores que 0,06% e que mesmo assim, apresentavam excepcional resistência mecânica e tenacidade (GRAY; PONTREMOLI, 1987).

As propriedades mecânicas (limites de escoamento e resistência e alongamento total) e composições químicas dos aços API 5L X80 com diferentes tores de carbono, podem ser observados nas TAB. 3 e 4.

Tabela 3 – Composição química e propriedades do aço API 5L X80, contendo 0,05% de C.

API 5L X80: Tubo Ø30" x 0,812"								
Composição Química (%massa)								
C	Si	Mn	P	S	Nb	V	N	<i>Ceq</i>
0,05	0,26	1,74	0,014	0,001	0,038	0,04	0,030	0,15
Propriedades Mecânicas								
Direção	σ_{LE} [MPa]	σ_{LR} [MPa]	A_T [%]	Resfriamento Lento				
Longitudinal	594	647	42,6					
Transversal	614	690	37,1					

Fonte: UEDA; TANAKA, 1987.

Tabela 4 – Composição química e propriedades do aço API 5L X80, contendo 0,08% de C.

API 5L X80: Tubo Ø36" x 0,625"								
Composição Química (%massa)								
C	Si	Mn	P	S	Nb	V	N	<i>Ceq</i>
0,08	0,43	1,68	0,007	0,002	0,034	0,08	0,040	0,19
Propriedades Mecânicas								
Direção	σ_{LE} [MPa]	σ_{LR} [MPa]	A_T [%]	Resfriamento Lento				
Longitudinal	556	653	41,8					
Transversal	590	678	36,2					

Fonte: UEDA; TANAKA, 1987.

4.6 Tubos de aço API 5L X80 formados por prensagem e soldados por arco elétrico com eletrodos revestidos

Por volta de 1825, James Whithouse patenteou o processo de produção de tubo de aço soldado. Em 1931, a soldagem em 1 passe foi estabelecida. Atualmente, os processos de soldagem por fusão apresentam predominância e são usados com exclusividade na confecção de tubos de diâmetros acima de 323,9 mm (12 ¾") (BRESING; SOMMER, 1993).

As condições essenciais para a confecção de tubos de aço, para que cumpram os padrões de qualidade, são a existência de eficientes equipamentos de fabricação e tecnologias modernas de controle da qualidade. O arquivamento de dados gerados nas várias etapas de produção e os testes realizados são requisitos essenciais da especificação API 5L (2004), sendo atualmente feitos por meio de um sistema globalizado (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2004).

Nesse processo de produção, as chapas de aço são pré-fabricadas em 3 estágios de prensagens distintos, sendo o 1º estágio a prensagem de bordas (*Crimping plates edges*), o 2º estágio a prensagem em "U" (*U-ing press*) e o 3º estágio a prensagem em "O" (*O-ing press*). Em algumas literaturas tal processo é mencionado como processo "U-O-E", ou seja, prensagem em "U", prensagem em "O" e expansão a frio "E" (*U-ing, O-ing, Expanding*) (GODOY, 2008).

A prensagem em "U" de uma chapa de aço é feita por prensa hidráulica, que empurra a chapa entre dois suportes localizados nas laterais. No fim do processo, a distância entre os suportes é diminuída, a fim de aplicar uma pequena sobrepreensão na chapa de aço, que compensa o chamado "efeito mola". O "efeito mola" fica evidente quando o aço utilizado apresenta uma elasticidade muito grande, propriedade mecânica muito comum nos aços utilizados na produção de dutos/tubos (HILLENBRAND et al., 2004). A FIG. 16 retrata a prensagem em "U".

Figura 16 – Prensagem em “U”



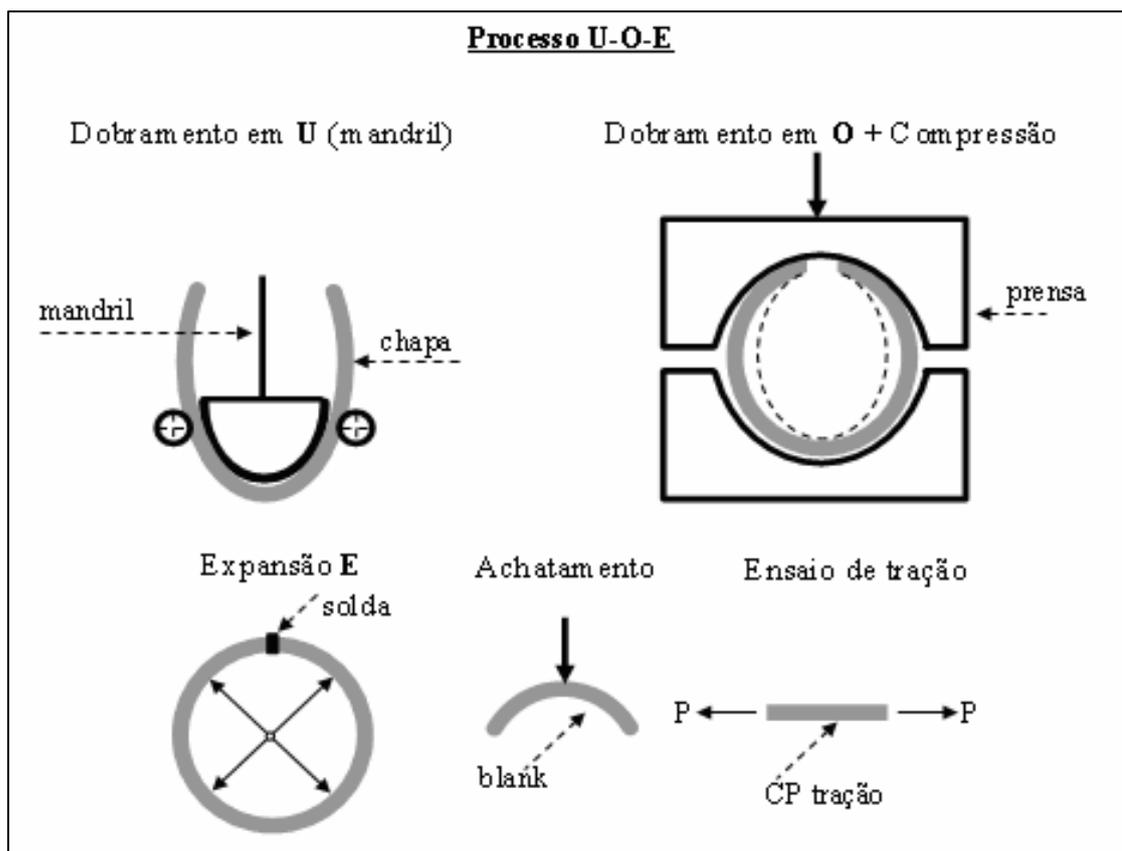
Fonte: GOOGLE, 2017.

Depois da prensagem em “U”, cada chapa é inserida na prensa “O” por meio de uma mesa elevatória. Os processos de deformação aplicados nas prensas “U” e “O” são arranjados para garantir que o efeito “mola” não tenha efeito e altere a abertura do cilindro formado (GODOY, 2008).

A prensagem em “O” é de suma importância para a qualidade do tubo formado, uma vez que, através dela, os padrões exigidos de diâmetro, ovalização, retinidade são obtidos depois da expansão a frio. Desse modo, são necessárias prensas hidráulicas com capacidade de até 600 MN (60.000 Ton) (GODOY, 2008).

Outro ponto importante a ser destacado é o “Efeito Baushinger”, esquematizado na FIG. 17.

Figura 17 – Representação Esquemática do Efeito Baushinger



Fonte: RATNAPULI, 1987.

O Efeito Baushinger explica a diminuição das principais propriedades mecânicas dos aços API que são os limites de escoamento e de resistência, causada pela compressão durante as prensagens sucessivas (RATNAPULI, 1987).

Depois da prensagem em “O” as bordas de cada chapa são ligadas através de uma solda provisória, por meio do processo de soldagem semiautomática (processo “MAG”), que é uma operação anterior à soldagem por arco elétrico com eletrodos revestidos, realizada primeiramente pelo lado interno e posteriormente pelo lado externo. Quando são utilizados processos de soldagem por fusão, é necessário que pelo menos um passe de solda seja realizado pelo lado interno, para atender às especificações e normas exigidas na confecção de tubos de aço soldados (GODOY, 2008). Na FIG. 18 vê-se a soldagem de uma tubulação com eletrodo revestido.

Figura 18 – Soldagem de um Tubo por Eletrodo Revestido



Fonte: TÉCNICOS ONLINE, 2011.

4.6.1 Estudo da zona termicamente afetada (ZTA) de tubos soldados por arco elétrico com eletrodos revestidos

Em qualquer tipo de soldagem por fusão, a escolha dos valores apropriados para os padrões de soldagem, tais como: corrente, velocidade da soldagem e tensão aplicada são de importância considerável para o controle do tamanho da Zona Termicamente Afetada (GIANETTO et al., 2007), além de propiciar a obtenção de um cordão de solda com tamanho e qualidade adequados.

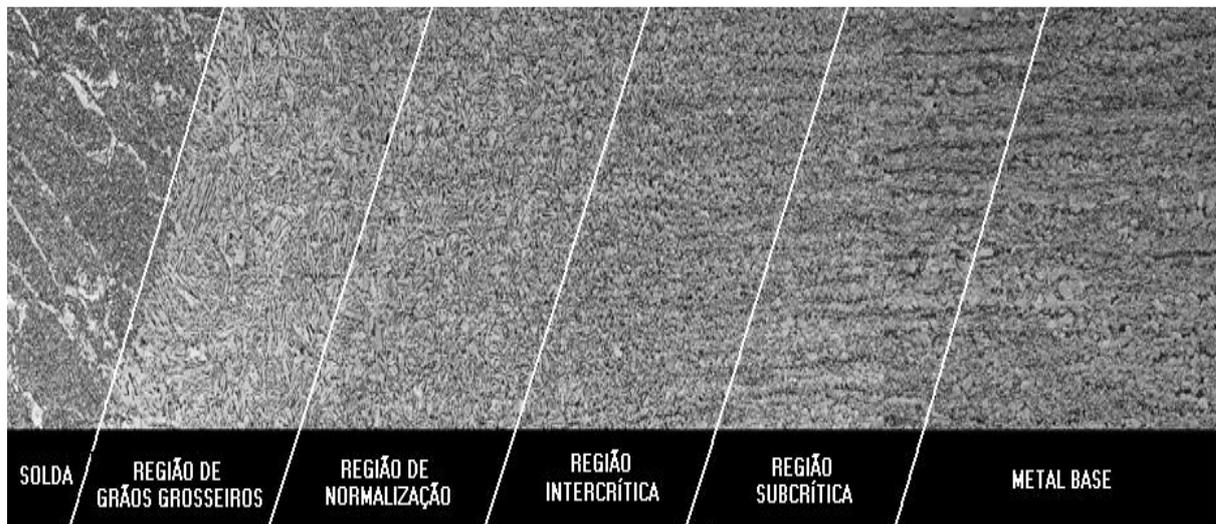
A microestrutura da região do tubo de aço que apresenta solda é afetada por importantes mudanças que ocorrem em função dos ciclos de resfriamento e aquecimento presentes no processo de soldagem. Portanto, só é possível a obtenção da junta soldada com as especificações exigidas se a microestrutura da zona termicamente afetada estiver dentro dos parâmetros estabelecidos (GUNARAJ; MURUGAN, 2002).

Normalmente, alguns dos requisitos de soldagem e algumas condições operacionais determinam as características da microestrutura da zona termicamente

afetada, o que acaba por influenciar em algumas propriedades, tais como: dureza, tenacidade e a fragilidade em relação à capacidade de sofrer trincamento (GUNARAJ; MURUGAN, 2002).

Do ponto de vista metalúrgico, a zona termicamente afetada pode ser dividida em 4 regiões, a saber: 1) região de grãos grosseiros, 2) região de normalização, 3) região Inter crítica, e 4) região subcrítica, como pode ser visto na FIG. 19.

Figura 19 – Diferentes áreas de ZTA



Fonte: GUNARAJ; MURUGAN, 2002.

Um estudo sobre a importância da tenacidade na zona afetada termicamente em soldas longitudinais em tubos de aço concluiu que ao longo do comprimento da solda ocorrem pequenas regiões com microestrutura voltada a apresentar pequenos valores de tenacidade e que, infelizmente, não podem ser evitados. Estas regiões são denominadas de zonas de fragilidade localizada (ZFL). As características destas zonas têm sido intensamente estudadas, e seu conhecimento é largamente utilizado nos dias atuais na tecnologia de fabricação dos aços, na laminação de chapas e na fabricação de tubos (LIESSEM; ERDELEN-PEPPLER, 2004).

A principal causa para o controle do aporte de calor e da largura da zona termicamente ativa (ZTA) é a velocidade da soldagem. Foi comprovado também que o aporte de calor é inversamente proporcional à velocidade de soldagem, o que significa que qualquer incremento na velocidade da soldagem representa uma diminuição do aporte de calor (CHRISTENSEN, 1965). A Equação 3 mostra a relação entre a velocidade da soldagem e o aporte de calor na ZTA e permite o cálculo do mesmo.

$$AC = \frac{A \times V}{S} \quad (3)$$

Onde,

AC= Aporte de calor (*heat input*) (kJ/cm)

A= Corrente de soldagem (Ampères)

V= Tensão do arco (Volts)

S= Velocidade de soldagem (cm/min)

4.6.2 Tenacidade em juntas soldadas

As juntas soldadas são de grande importância quando se estuda as fraturas provocadas por tensões residuais, concentração de tensões, variabilidade nas microestruturas e existência de defeitos na solda.

A mecânica da fratura é amplamente empregada para explicar a existência de falhas em tubulações de aço. No caso específico da fadiga, a mecânica da fratura é utilizada para determinar a taxa de crescimento da trinca antes que ela se transforme em uma fratura de fato (MADDOX, 2007).

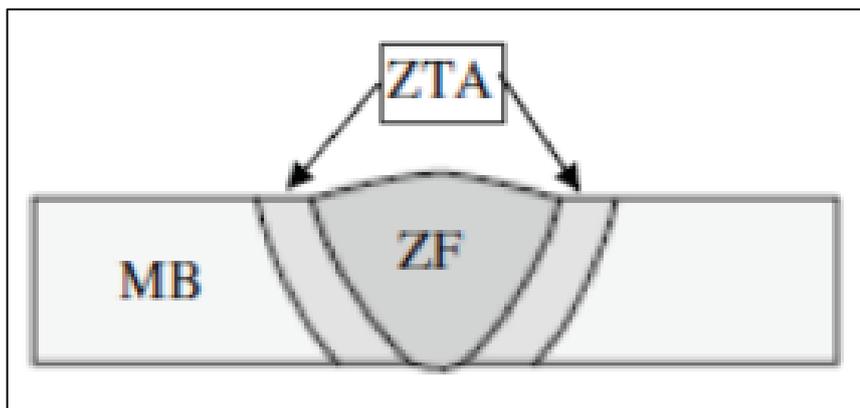
Os testes para se medir a tenacidade, que é a capacidade de um determinado material em resistir a sofrer trincas/fraturas, em juntas soldadas são significativamente complicados ao se comparar com o teste de tenacidade aplicado em metais de base, devido principalmente aos seguintes fatores: a posição da ponta da trinca deve estar localizada de forma correta; a retirada de amostras conformes da junta soldada é dificultada pela geometria da mesma; as tensões residuais afetam o crescimento da trinca por fadiga, dificultando a formação da pré-trinca (GODOY, 2008).

Como visto acima, durante o processo de soldagem uma grande quantidade de fluxo de calor é concentrada na região da junta a ser soldada. Este fluxo é suficiente para a produção de uma poça de material fundente que consiste em uma combinação do metal de base, metal de adição (arame do eletrodo) e eventualmente do fluxo. O fluxo de calor também é suficiente para que ocorram significativas modificações no material que não sofreu fusão e que se encontra próximo da junta soldada. De acordo

com BERTOL (2009), em uma junta soldada podem ser encontradas 3 zonas básicas: ZF (Zona Fundida): é a região em que o material sofre completa fusão durante o processo de soldagem (poça de solda); ZTA (Zona Termicamente Afetada): região onde o fluxo de calor que chega não é suficiente para que ocorra a fusão, porém, as temperaturas atingidas são superiores à temperatura crítica do material, tornando possível o aparecimento de significativas alterações microestruturais; MB (Material Base): também pode ser aquecida durante a soldagem, entretanto, o aporte de calor não é suficiente para provocar alterações microestruturais significativas.

Um esquema que descreve a macrografia de uma junta soldada é retratado na FIG. 20.

Figura 20 – Macrografia esquemática de uma junta soldada indicando suas diferentes zonas



Fonte: BERTOL, 2009.

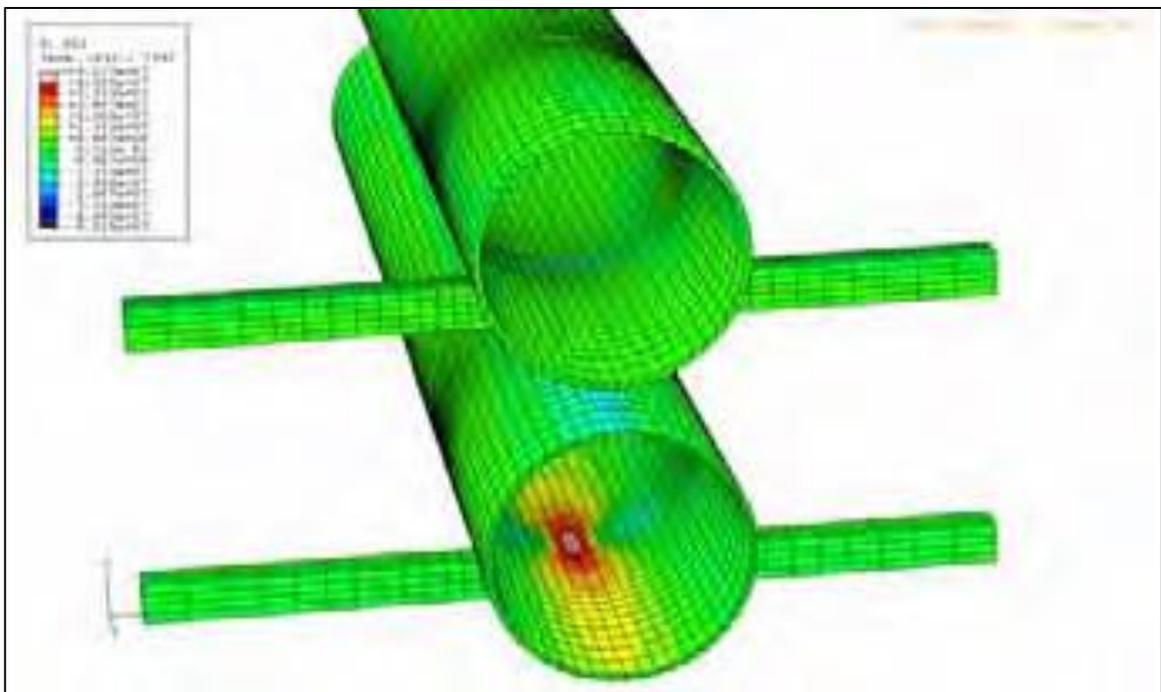
4.7 Fadiga em solda de tubos de aço API 5L X80

Fadiga pode ser definida como uma avaria cumulativa, localizada e definitiva causada por flutuações de tensão repetitivas em uma determinada estrutura. Essa repetição de tensão pode ocasionar o aparecimento de uma trinca com crescimento progressivo, podendo culminar em uma ruptura catastrófica da estrutura. As fraturas por fadiga são as principais causadoras de problemas em estruturas de aço, estudados na engenharia (MADDOX, 2007).

A maior presença de fratura ocasionada por fadiga em tubulações de aço soldado é na extremidade dos mesmos. Estas trincas são reveladas a partir de ensaios de raios X, aplicados na solda feita na junção das tubulações (BRUNO, 1987).

Os tubos de aço soldados são menos resistentes a flutuações de tensão por três motivos principais: 1) as soldas podem possuir defeitos/avarias internos, que propiciam o aparecimento de trincas; 2) o formato do cordão de solda age na concentração das tensões nos tubos, se a solda tiver sido aplicada na superfície de apoio, como pode ser visto na FIG. 21, a soldagem propicia o aparecimento de tensões residuais na região de solda, contribuindo nas flutuações de tensões (GODOY, 2008).

Figura 21 – Ponto de concentração de tensões em tubo de aço soldado, com a solda localizada no ponto de apoio



Fonte: MORGAN, 2004.

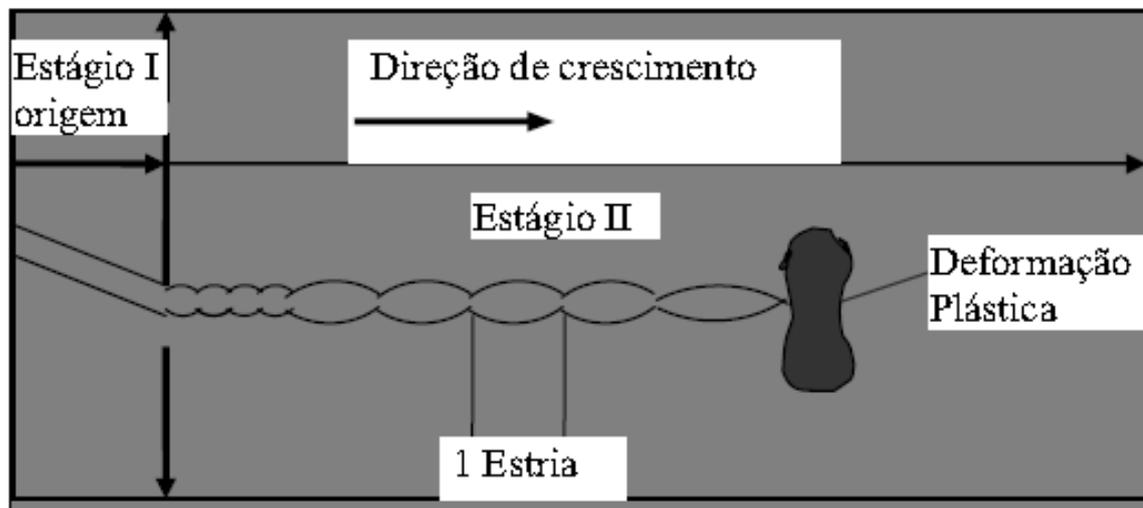
A fratura por fadiga é ocasionada pela evolução crescente de uma trinca, ocasionada por repetidas tensões ao longo da estrutura, normalmente inferiores ao limite de escoamento do material. A falha por fadiga apresenta três etapas principais: 1) aparecimento de uma pequena trinca na região que concentra as tensões; 2) prolongamento da trinca a cada ciclo de tensões; 3) aparecimento da fratura final, que ocorre rapidamente se a trinca tiver atingido o seu tamanho crítico.

A quantidade de ciclos até a fratura (vida em fadiga – N_f) pode ser calculada através da soma da quantidade de ciclos de tensão que iniciam a trinca (N_i) e a propagação da trinca (N_p), como mostrado na Equação 4 (CALLISTER, 2005).

$$N_f = N_i + N_p \quad (4)$$

A fratura final não é significativa para o cálculo acima, uma vez que ela ocorre rapidamente. O aumento progressivo da trinca por fadiga em ligas metálicas, como é o caso do aço, se dá através da formação de estrias, que são ondulações na superfície da fratura (GODEFROID, 2003). O aparecimento de estrias após a ocorrência de fratura está esquematizado na FIG. 22.

Figura 22 – Representação esquemática da evolução de uma trinca por fadiga destacando-se a zona plástica na ponta e a geração de estrias na fratura

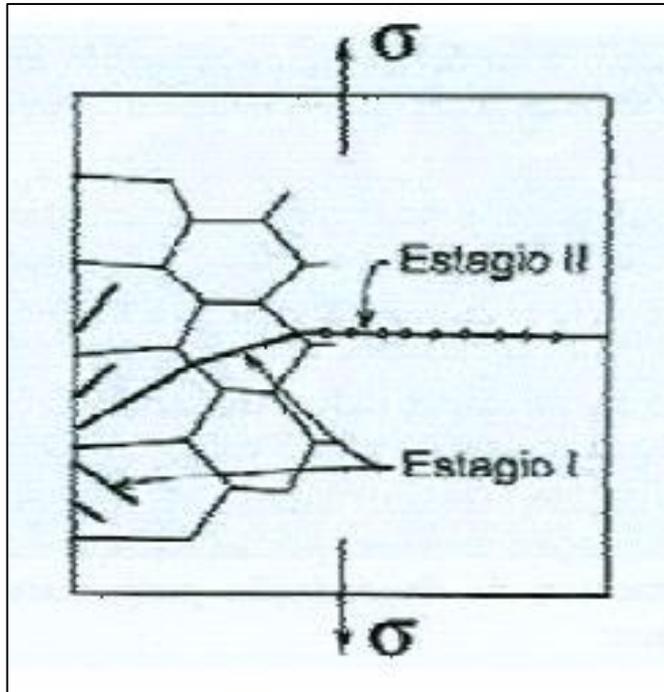


Fonte: GODEFROID, 2003.

As trincas relacionadas com falhas por fadiga, na maioria das vezes, se principiam (ou nucleiam) sobre a superfície de um elemento em algum ponto onde as tensões se concentram. Os sítios de nucleação de trincas incluem riscos superficiais, porosidades na solda e inclusões, assim como regiões de não uniformidade microestrutural e química. A partir do momento em que uma trinca estável sofre nucleação, ela começa a se propagar aos poucos com significativas tensões de cisalhamento. A fratura final pode ter características frágeis ou dúcteis, o que decorre do material utilizado e das características das tensões e do meio (CALLISTER, 2005).

A FIG. 23 mostra uma representação esquemática das etapas de nucleação (estágio I) e disseminação (estágio II) das trincas por fadiga. Normalmente, estes pontos são pontos aglutinadores de tensão, onde ocorre deformação plástica localizada (CALLISTER, 2005).

Figura 23 – Representação esquemática mostrando os estágios I e II da propagação de trinca por fadiga em metais policristalinos

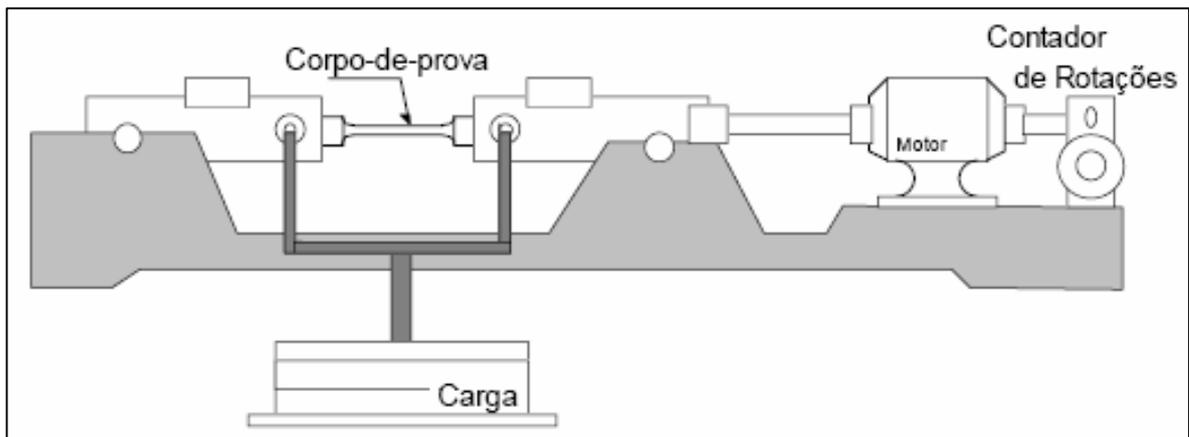


Fonte: CALLISTER, 2005.

4.8 Ensaio de Fadiga

Um dos ensaios mais comumente empregados para o estudo da fadiga é o da flexão rotativa que se baseia em um caso especial de solitação empregado nas máquinas convencionais de ensaios de fadiga, no qual todas as fibras do corpo de prova estão sujeitas a uma solitação alternada. Uma máquina utilizada na prática deste ensaio está ilustrada na FIG. 24. Os corpos de prova normalmente usados nos estudos clássicos de fadiga possuem acabamento polido e não apresentam tensões residuais. Tais estudos se resumem em determinar o número de ciclos até a ruptura, correspondente a uma determinada carga aplicada W , ou seja, se busca calcular o valor da tensão normal σ_a . Nota-se que neste caso, $\sigma_{\min} = 0$ e $\sigma_{\max} = \sigma_a$ (NASCIMENTO, 2009).

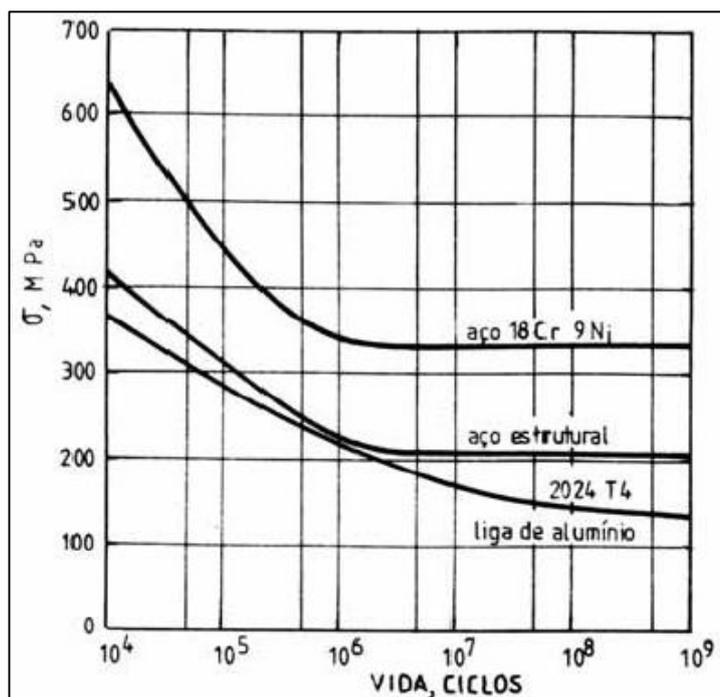
Figura 24 – Esquema da máquina para realização de ensaio – Flexão rotativa



Fonte: CALLISTER, 2005.

Os ensaios de fadiga estão divididos em 2 tipos: 1) Fadiga em baixo ciclo: menor que 10^4 ciclos e submetido a altas tensões com a ocorrência de deformação plástica; 2) Fadiga em alto ciclo: maior que 10^4 ciclos e submetido a baixas tensões com a ocorrência de comportamento elástico. O comportamento característico para aços e alumínio está representado na FIG. 25. Segundo Branco (1999), os aços apresentam normalmente um valor limite de tensão σ_a que, se não for ultrapassado, corresponde à vida infinita do corpo de prova.

Figura 25 – Exemplo de Curvas S-N para aços e alumínio



Fonte: Callister, 2005.

Esta tensão é designada por tensão limite de fadiga σ_{fo} . Os alumínios apresentam comportamento distinto, pois, por menor que seja a tensão σ_a aplicada, o corpo de prova acaba por fraturar ao fim de um determinado número de ciclos. Nestes casos, define-se σ_{fo} convencionalmente como a tensão correspondente a um determinado número de ciclos de vida, tipicamente 5×10^8 ciclos para o caso do alumínio (CALLISTER, 2005).

5 METODOLOGIA

A metodologia utilizada para se obter os resultados esperados a respeito dos objetivos propostos pela pesquisa se deu através da natureza qualitativa, pois acredita-se que esta seria a melhor vertente para a obtenção do resultado final. De acordo com José Luiz Neves:

Enquanto estudos quantitativos geralmente procuram seguir com rigor um plano previamente estabelecido (baseado em hipóteses claramente indicadas e variáveis que são objeto de definição operacional), a pesquisa qualitativa costuma ser direcionada, ao longo de seu desenvolvimento; além disso, não busca enumerar ou medir eventos e, geralmente, não emprega instrumental estatístico para análise dos dados; seu foco de interesse é amplo e parte de uma perspectiva diferenciada da adotada pelos métodos quantitativos (NEVES, 1996, p. 1).

Portanto, embora o trabalho também possua mensurações, frações e dados numéricos, estes serviram apenas para demonstrar as especificações e parâmetros dos aços API 5L X80 e as características do tipo de soldagem mais comumente utilizado na manufatura das tubulações. Dessa maneira, optou-se pela caracterização da pesquisa apenas como qualitativa, tendo em vista que o qualitativo abrange a ideia do subjetivo, onde é possível evidenciar impressões e emitir opiniões (BORBA; ARAÚJO, 2004).

A metodologia também foi composta de pesquisa exploratória com coleta de informações indireta, uma vez que se utiliza de pesquisa documental e bibliográfica para discutir e discorrer sobre os objetivos propostos. Com isso, além de um levantamento bibliográfico (livros, periódicos, internet, etc.), a primeira parte da metodologia consistiu na análise e investigação dos chamados tubos API 5L X80 e o tipo mais comum de soldagem (SMAW) empregado na confecção dos mesmos, levando em conta a relevância e pertinência enquanto objeto do estudo proposto. Tal objeto de estudo foi definido em comum-acordo entre o orientador e a orientanda.

Ademais, como o *corpus* da pesquisa residiu na análise estrutural de tubos de aço que apresentam soldagem, é impossível não levar em conta a observação e o conhecimento de autores e teóricos que estudam/estudaram o assunto e desenvolveram seus trabalhos voltados a esta área da engenharia química, que pode ser abrangida também pelas engenharias mecânica e de materiais, tendo estes

contribuído contundentemente para os avanços tecnológicos em relação à durabilidade e manufatura das tubulações de aço utilizadas no transporte de fluidos.

O próximo passo da pesquisa consistiu na síntese (análise e interpretação) das informações obtidas através das investigações documentais físicas e virtuais acerca dos tubos de aço API 5L X80 que apresentam costura (solda) e a relação dos mesmos com o fenômeno da fadiga, levantando aspectos e características que foram percebidas nas informações obtidas em relação aos objetivos da pesquisa. Esta síntese dos dados obtidos serviu como conclusão do trabalho, que teve como produto final a redação do TCC.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O estudo feito neste trabalho demonstrou que aços classificados como de alta resistência e baixa liga (ARBL) que contenham em sua estrutura principalmente o mineral ferrita acicular, apresentam em sua composição baixo teor de carbono (menor que 0,06%) e, portanto, possuem boa soldabilidade. Esse tipo de aço é muito utilizado na confecção de tubulações para transporte de fluidos, pois além da capacidade de sofrer soldagem, apresenta ótima tenacidade e alto limite de resistência/escoamento. Os aços ARBL são obtidos após o refinamento do grão, que consiste na obtenção de pequenos cristais responsáveis por melhorar as propriedades mecânicas do aço. De acordo com a American Petroleum Institute, os aços classificados como API 5L X80 apresentam em sua microestrutura pequeno teor de carbono, além de quantidades pré-determinadas de manganês, fósforo e enxofre.

De acordo com a literatura, aços API 5L X80 que apresentam teor de carbono da ordem de 0,05% suportam tensão longitudinal de 594 MPa e tensão transversal de 614 MPa; Já aços que apresentam 0,08% em teor de carbono e portanto, não seguem os parâmetros estabelecidos pela API, resistem a tensões longitudinais de 556 MPa e tensões transversais de 590 MPa, indicando que quanto menor a concentração de carbono na microestrutura, melhor a resistência mecânica do aço.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A revisão bibliográfica feita no presente trabalho visa concluir que o estudo da ocorrência de trincas por fadiga em tubos de aço responsáveis pelo transporte de fluidos diversos, especialmente petróleo e gás, é de suma importância, pois as falhas por fadiga que porventura possam vir a ocorrer nas tubulações, representam prejuízos econômicos e logísticos.

As fraturas por fadiga em tubos de aço ocorrem devido a inúmeros fatores, tais como: composição química do aço, processo de produção das tubulações, o tipo e a quantidade de solda empregado, aporte de calor utilizado na soldagem, microestrutura do material e etc. Inferiu-se também que o ponto mais suscetível ao aparecimento das primeiras trincas por fadiga é no chamado cordão de solda, que é o ponto onde se concentram as tensões residuais e, portanto, é uma região mais propícia ao incremento das flutuações de tensões que resultam nas trincas e sua consequente propagação por toda a estrutura após n ciclos de fadiga. O tipo de aço API 5L X80 é utilizado com grande frequência na produção de tubulações para transporte de fluidos, pois apresenta uma boa soldabilidade e um limite de escoamento superior a 550 MPa, o que torna o processo de produção economicamente viável e mais resistente à fratura por fadiga.

O estudo das Trincas por Fadiga em Materiais é uma área da Engenharia multidisciplinar, e envolve principalmente as áreas de metalurgia, mecânica, química, ciência de materiais, projeto mecânico, simulação computacional dentre outros; estas áreas, quando estudadas, individualmente, possibilitam significativos avanços nas ciências exatas, mas, juntas, encontram soluções completas para novas necessidades.

REFERÊNCIAS

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. **Specification for line pipe steel API 5L**. 42. ed. New York, 2001.

BAY, Y. Use of high strength steel. In: **Pipelines and Risers**. Elsevier Ocean Engineering Book Series, v. 3. Elsevier Science, 2001. p. 353-380.

BATISTA, G. Z. et al. Effect of MA constituent content on the mechanical properties of a NbCr/NbCrMn of API X80 steel. In: **International conference on thermomechanical processing: mechanics, microstructure & control**, p. 240-244, 2002.

BATISTA, G. Z. et al. "Avaliação da microestrutura e propriedades mecânicas de tubo API 5L X80 submetido a curvamento por indução". **Revista Tecnologia em Metalurgia e Materiais**. ABM (Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais), São Paulo, v. 03, n.4, abr./jun, 2007, p. 16-22.

BORBA, M. C.; ARAÚJO, J. L. (Org.) **Pesquisa Qualitativa em Educação Matemática**. Belo Horizonte: Autêntica, 2004.

BOTT, I. S. **High grade steel development**. Thermec 2003, materials science fórum. v. 426-432, p. 1463-1468. Disponível em: <<http://www.scientific.net>>. Acesso em: 04 Abr. 2017.

BRANCO, C.A.; FERNANDES, A. A.; CASTRO, P.M.S.T. **Fadiga de Estruturas Soldadas**. Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, 1999.

BRAZ, M. H. P. **Propriedades de fadiga de soldas de alta resistência e baixa liga com diferentes composições microestruturais**. 1999. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999. Disponível em:<<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/88/88131/tde-17102001-111717/pt-br.php>> Acesso em: 10 jun. 2017.

BRENSING, K. H.; SOMMER, B. **Steel Tube and Pipe Manufacturing Process**. Salgitter Mannesmann Röherenwerke. Disponível em : <http://www.smrw.de?downloads/Steel_tube_and_pipe.pdf>. Acesso em 28 jun. 2017.

BRUNO, T. V. **How to prevent transit fatigue to tubular goods**. The Oil and Gas Journal, 1987.

CALLISTER, J. R. W. D. **Materials Science and Engineering: An Introduction**, 6. ed. New York: John Wiley & Sons, p. 871, 2005.

CASTI metals black book. **Wrought Carbon & alloy steel metallurgy**. North American Ferrous Data. Edmonton: Casti Pub., 4. ed., chapter 2, p. 50-51, 2000.

ERDELEN-PEPLER, M.; KNAUF, G.; MAREWSKI, U.; REEPMAYER, O. **Longitudinal welded pipes with enhanced fatigue strength.** 4th International Conference on Pipeline Technology, p.18, 2004.

FORTES, C. **Eletrodos Revestidos OK, Brasil, Assistência Técnica Consumíveis.** ESAB BR, p. 3, 7, 31, 2004.

FRAGIEL, A.; SCHOUWENAARF, R.; GUARDIAN, R.; PEREZ, R. **Microestructural Characteristics of different commercially available API 5L X65 Steels.** Journal of New Materials for Electrochemical Systems, v. 8, issue 2, p. 115-117, Apr. 2005.

GIANNNETTO, J. A.; BRAID, J. E. M.; BOWKER, J. T.; TYSON, W. R. **Heat affected zone toughness of a TMCP steel designed for low temperature application.** Journal of offshore mechanics and arctic engineering, v.119, issue 2, p. 134-144, Maio, 1997.

GODEFROID, L. B. **Análise de Falhas** – Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais. São Paulo. Cap. 9, 2012.

GODOY, J. M. **Estudo da Ocorrência de Trinca por Fadiga em Tubos de Aço Soldados, devido ao Transporte.** UNESP: Guaratinguetá, 2008.

GRAY, J. M.; PONTREMOLI, M. Metallurgical options for API grade X70 and X80 linepipe. In: **International Conference Pipe Technology.** Rome, Italy, Nov. 1987.

GUNARAJ, V.; MURUGAN, N. **Prediction of Heat-Affected Zone Characteristics in Submerged Arc Welding of Structural Steel Pipes.** Welding Journal, p. 94-98, 2002.

HILLENBRAND, H. G.; DEMOFONTI, G.; MANNUCCI, G.; HARRIS, D. **Evaluation of the suitability of X100 steel pipes for high pressure gas transportation pipelines by full scale tests.** International Pipeline Conference, p. 9, 2004.

KENNEDY, J. L. **Oil and gas pipeline fundamentals.** Cap. 1,3. Tulsa, Oklahoma, 1993.

MACHADO, I. G. **Soldagem e técnicas conexas: Processos,** Ed. Autor, Porto Alegre, 1996, 477 p.

MADDOX, S. **Structural Fatigue Assessment Course.** The Welding Institute, 2007.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. C. **Soldagem: Fundamentos e Tecnologia.** Belo Horizonte: Ed. UFMG, 2005, 362 p.

MEESTER, B. **The weldability of modern structural TMCP steels.** ISIJ international, v. 37, n. 6, p. 537-551, 1997.

MORGAN, D.; SANDERSON, R. **Further Fatigue Assessment of the Road transportation of Line Pipe for the Angsi Project.** Report N. 14682/2a/04, TWI, 22 p, Jun, 2004.

NASCIMENTO, M. P. **Avaliação da tenacidade em tubos de aço API X70 e X80 soldados pelo processo HF/ERW.** 2009. 124 p. Projeto Científico (Pós-doutorado em Engenharia Mecânica, Materiais) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2009.

NERIS, M. M. **Eixo Tecnológico: controle e processos industriais.** Cetec Capacitações, Abril, 2012.

O'BRIEN, R. L. **Welding handbook: welding processes**, v. 2, 8. ed. Miami: American Welding Society, 1991.

PAULES, J. R. **Developments in HSLA Steel products.** JOM – The Journal of the minerals, metals & materials society. p. 41-44, Jan. 1991.

PORTAL METÁLICA – CONSTRUÇÃO CIVIL. **As dutovias como boa alternativa de transporte, apesar da predominância do modo rodoviário.** Disponível em: <<http://www.metallica.com.br>>. Acesso em: 21 Jun. 2017.

RATNAPULI, R. C. **A Method of calculating Bauschinger Effect in API Linepipe.** 28th MWSP, 1987.

ROBERTS, W. L. **Hot rolling of steel.** Types of hot rolled products. Chapter 2, New York: Dekker, 1983.

RODRIGUES, P. C. M.; PERELOMA, E. V.; SANTOS, D. B. **Mechanical properties of HSLA bainitic steel subjected to controlled rolling with accelerated cooling.** Materials Science & Engineering, A283, p. 136-143, 2000.

SANTOS, L. A. **Condução de calor na soldagem com pulsação térmica.** UFSC – Florianópolis, 2001.

SENUMA, T. **Physical metallurgy of modern high strength steel sheets.** ISIJ international, v. 41, n. 6, p. 520-532, 2001.

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, 1981.

STUART, H. **The properties and processing of microalloyed HSLA steels.** JOM – The journal of the minerals, metals & materials society. p. 35-40, Jan. 1991.

TANAKA, T. **Science and Technology of Hot Rolling Process of Steel,** Microalloying Conference Proceedings, p. 165-181, 1995.

UEDA, H.; TANAKA, T. Recent development of high-grade linepipe up to X100. In: **International Conference Pipe Technology.** Rome, Italy, Nov. 1987.

UNIVERSIDADE SANTA CECÍLIA – UNISANTA. **Apostila de introdução à soldagem.** Disponível em: <<http://cursos.unisanta.br/mecanica/solda.html>>. Acesso em: 14 Mai. 2017.

WELDING.COM. **History**. Disponível em: <<http://www.welding.com>>. Acesso em: 17 Jul. 2017.

ZHAO, M. C.; YANG, K.; SHAN, Y. **The effect of thermomechanical control process on microstructure and mechanical properties of a commercial pipeline steel**. Materials Science & engineering, A335, p. 14-20, 2002.