

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
ENGENHARIA MECÂNICA

**DESENVOLVIMENTO DE JUNTAS SOLDADAS DE AÇO CARBONO E  
API OBTIDAS PELO PROCESSO ARCO SUBMERSO**

VITÓRIA  
2006

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
ENGENHARIA MECÂNICA

LEANDRO BITTI SANTA ANNA  
LUIS FERNANDO NACARI

## **DESENVOLVIMENTO DE JUNTAS SOLDADAS DE AÇO CARBONO E API OBTIDAS PELO PROCESSO ARCO SUBMERSO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico, elaborado de acordo com as orientações do Prof. PHD Osvaldo Guilherme Comineli.

VITÓRIA  
2006

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
ENGENHARIA MECÂNICA

LEANDRO BITTI SANTA ANNA  
LUIS FERNANDO NACARI

# **DESENVOLVIMENTO DE JUNTAS SOLDADAS DE AÇO CARBONO E API OBTIDAS PELO PROCESSO ARCO SUBMERSO**

## **COMISSÃO EXAMINADORA**

---

Prof. PHD. Osvaldo Guilherme Comineli  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Orientador

---

Prof. M.Sc. Temístocles de Sousa Luz  
Universidade Federal do Espírito Santo

---

Dr. -Ing. Vicente Trindade  
TSA – Tubos Soldados Atlântico

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos primeiramente a Deus, por ter nos dado a oportunidade de concluir este projeto e aos nossos pais, irmãs, amigos e namoradas pelo apoio. Também agradecemos ao Prof. Osvaldo Guilherme Comineli pela dedicação ao nosso projeto e ao colega de Laboratório Carlos Alberto Zampieri.

Agradecemos em especial ao Dr. Vicente Trindade e também a empresa T.S.A., que gentilmente nos forneceu dados e conteúdos necessário para realização do trabalho.

Agradecemos a grande atenção prestada e aos conhecimentos cedidos pelos professores Temístocles Luz e Marcelo Camargo.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1 CARACTERIZAÇÃO DA SOLDAGEM A ARCO SUBMERSO.....	1
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>3</b>
<b>2.1 PROCESSO DE SOLDAGEM POR ARCO-SUBMERSO.....</b>	<b>3</b>
2.1.1 SEQÜÊNCIA DO PROCESSO.....	3
2.1.2 VARIÁVEIS CONTROLÁVEIS DURANTE A SOLDAGEM.....	4
2.1.3 VARIÇÕES DO PROCESSO.....	8
2.1.4 DEFEITOS DA SOLDAGEM.....	10
<b>2.2 DESCRIÇÃO DO PROCESSO DE SOLDAGEM HELICOIDAL / ESPIRAL.....</b>	<b>11</b>
<b>2.3 MICROESTRUTURA.....</b>	<b>14</b>
2.3.1 CLASSIFICAÇÃO DOS MICROCONSTITUINTES.....	15
2.3.2 CONTROLE DA FORMAÇÃO DA MICROESTRUTURA.....	18
2.3.2.1 MICROESTRUTURA DE SOLIDIFICAÇÃO.....	19
2.3.2.2 COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO METAL DE SOLDA.....	19
2.3.2.2.1 INFLUÊNCIA DO NITROGÊNIO NA MICROESTRUTURA.....	20
2.3.2.2.2 INFLUÊNCIA DO MANGANÊS E NIQUEL NA MICROESTRUTURA.....	21
2.3.2.2.3 INFLUÊNCIA DO CARBONO NA MICROESTRUTURA.....	21
<b>2.4. PROPRIEDADES MECÂNICAS.....</b>	<b>22</b>
2.4.1 DUREZA.....	22
2.4.2 IMPACTO.....	23
2.4.3 TRAÇÃO.....	23
2.4.4 INFLUÊNCIA DA MICROESTRUTURA NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS.....	24
<b>3 METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....</b>	<b>26</b>
<b>3.1 CHAPA SOLDADA.....</b>	<b>26</b>
3.1.1 METAL BASE E CONSUMIVEIS PARA O ASTM A-36.....	27
3.1.2 METAL BASE E CONSUMIVEIS PARA O API 5L X60.....	27
3.1.3 APORTE DE CALOR.....	28
<b>3.2 ANÁLISES METALOGRÁFICAS.....</b>	<b>28</b>
3.2.1 MACROGRAFIA.....	29
3.2.2 MICROGRAFIA.....	30
<b>3.3 ENSAIO DE TRAÇÃO.....</b>	<b>31</b>
<b>3.4 ENSAIO DE DUREZA.....</b>	<b>32</b>

3.5 ENSAIO DE IMPACTO.....	32
3.6 PARÂMETROS DE SOLDAGEM.....	32
<b>4 RESULTADOS.....</b>	<b>34</b>
4.1 MACROGRAFIA.....	34
4.2 MICROGRAFIA.....	34
4.3 ENSAIO DE DUREZA.....	37
4.4 ENSAIO DE TRAÇÃO.....	39
4.5 ENSAIO DE IMPACTO.....	39
<b>5 DISCUSSÕES.....</b>	<b>40</b>
5.1 MICROGRAFIA E MICROESTRUTURA.....	40
5.2 DUREZA.....	41
<b>6 CONCLUSÕES.....</b>	<b>42</b>
<b>7 SUGESTÕES.....</b>	<b>43</b>
<b>8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>44</b>

## **LISTA DE FIGURAS:**

Figura 1 - O processo de soldagem por arco submerso.....	04
Figura 2 – Configuração TWIN ARC.....	08
Figura 3 – Configuração Eletrodo em fita.....	09
Figura 4 – Configuração TANDEM.....	10
Figura 5 – Configuração das tochas, conforme EPS NO 003-2006.....	10
Figura 6 – Princípio de formação de tubos em espiral.....	13
Figura 7 – Configuração da soldagem a arco submerso na parte interna e externa utilizando dois arames.....	13
Figura 8: Representação esquemática dos constituintes microestruturais (IIW 1988).....	17
Figura 9: Microestruturas de metal de solda como depositado mostrando vários constituintes microestruturais (IIW 1998) .....	18
Figura 10 – Detalhe do chanfro da chapa soldada.....	26
Figura 11 - Detalhe da região retirada do corpo de prova para realização da micrografia e macrografia.....	29
Figura 12 – Foto da malha com 121 pontos.....	30
Figura 13 – Detalhe do corpo de prova para ensaio de tração.....	31
Figura 14 – Distribuição das impressões das medidas de dureza do corpo de prova.....	32
Figura 15 – Macrografia da solda confeccionada com o metal base A-36.....	34
Figura 16 – Macrografia da solda confeccionada com o metal base API 5LX60.....	34
Figura 17 – Foto do primeiro passe do A-36.....	35
Figura 18 – Foto do segundo passe do A-36.....	35
Figura 19 – Foto do primeiro passe do API 5L X60.....	36
Figura 20 – Foto do segundo passe do API 5L X60.....	36
Figura 21 – Curva representativa das linhas de dureza para a junta soldada A-36.....	38
Figura 22 – Curva representativa das linhas de dureza para a junta soldada API.....	38

**LISTA DE TABELAS:**

Tabela 1 – Defeito de soldagem e suas causas.....	11
Tabela 2 - Composição química (% em peso) do ASTM A-36 .....	29
Tabela 3 - Composição química (% em peso) do arame-eletrodo.....	29
Tabela 4 - Composição química (% em peso) do API 5L X60.....	30
Tabela 5 - Composição química(% em peso) do arame-eletrodo.....	30
Tabela 6 – Parâmetros de soldagem para o metal de base ASTM A-36.....	35
Tabela 7 – Parâmetros de soldagem para o metal de base API 5L X60.....	35
Tabela 8 – Quantificação dos microconstituintes do metal de solda.....	39
Tabela 9 – Resultados em HV (para carga de 1 Kgf) das medidas obtidas nos ensaios de dureza para a junta soldada do aço ASTM A-36.....	37
Tabela 10 – Resultados, em HV (para carga de 1 Kgf), das medidas obtidas nos ensaios de dureza para a junta soldada do aço API 5L X60.....	38
Tabela 11 – Energia absorvida para temperatura de ensaio: - 40°C.....	39
Tabela 12 – Energia absorvida para temperatura de ensaio: - 20°C.....	39

## **1. INTRODUÇÃO**

### **1.1 CARACTERIZAÇÃO DA SOLDAGEM A ARCO SUBMERSO**

A evolução dos processos de soldagem, registrada nos últimos anos, em todo o mundo, ocorre devido a soldagem estar relacionada com a maioria das aplicações industriais, seja na fabricação ou na recuperação de componentes. A tecnologia da soldagem tende a acompanhar a crescente modernização industrial e as novas exigências de mercado que impõem requisitos de qualidade e de produtividade a custos cada vez menores. Dos processos de soldagem usuais, a técnica manual com eletrodos revestidos é a mais antiga e ainda hoje é uma das mais aplicadas. No entanto, a evolução da eletrônica, da informática e da metalurgia, tem impulsionado o desenvolvimento de modernas fontes de energia, de diversos “softwares”, de novos materiais e de consumíveis alternativos para a soldagem, com isso, a ampliação das aplicações industriais dos processos de soldagem automáticos e semi-automáticos como o MIG, o MAG, o arame tubular e o arco submerso [01]. Este último é um processo de relevante importância tecnológica, uma vez que fornece excelente relação entre custo e qualidade da junta soldada.

A grande maioria de tubos de grandes diâmetros produzidos no mundo para gasodutos e oleodutos é fabricada através do processo de soldagem a Arco-Submerso. Uma característica deste processo é a possibilidade de adição de elementos de liga, tais como Ti, B, Ni, Zr e outros, através do fluxo de soldagem, permitindo um preciso controle da microestrutura do metal de solda. Atualmente, o elevado nível tecnológico das novas plantas de formação de tubos utilizando o processo de soldagem a arco-submerso helicoidal (espiral) e o alto grau de refino de aço para a produção de tiras a quente têm motivado a implantação de fabricas de tubos soldados espiral em diversos países, inclusive na Europa e América do Norte, onde um elevadíssimo nível de qualidade é exigido [02].

O objetivo deste trabalho é realizar uma metalografia quantitativa, em juntas soldadas para diferentes metais bases, no presente caso o ASTM A-36 e o API 5L X-60, ou seja,

fazer uma avaliação da microestrutura da região soldada, relacionando-a com aspectos de microdureza, já que através desta, pode-se ter uma idéia do aspecto da resistência da junta (Garcia, 2004). E com os resultados alcançados discutir a relação entre microestrutura e propriedades mecânicas para os diferentes tipos de aços estudados.

A metalografia quantitativa é uma ferramenta extremamente útil no estudo de fenômenos metalúrgicos, gerando informações que eventualmente podem embasar o correto dimensionamento de processos industriais, sendo uma técnica experimental de grande utilidade tanto no estudo de fenômenos metalúrgicos como na caracterização das microestruturas e sua correlação com as propriedades mecânicas [03].

Metalografia é importante, pois não só a dureza e as frações das fases presentes na microestrutura definem a resistência mecânica e a dutilidade do material, a morfologia (formato) das fases, bem como a natureza e a densidade dos contornos presentes podem atuar de maneira fundamental. Normalmente a microestrutura varia estatisticamente de um ponto a outro da amostra que está sendo analisada. Logo, para que o valor final do parâmetro em estudo tenha significado estatístico, é necessário que ele seja calculado a partir da média de um número mínimo de observações, ou campos metalográficos, o qual é função do grau de flutuação estatística das medidas na microestrutura e da precisão desejada [03].

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 PROCESSO DE SOLDAGEM POR ARCO-SUBMERSO

Soldagem por arco submerso é um processo em que a união entre os metais é obtida pelo aquecimento e fusão destes por um arco elétrico estabelecido entre um eletrodo e a peça de trabalho. O arco ocorre sobre uma camada de um material granular fusível, chamado de fluxo, que é colocado sobre a região de solda, protegendo-o da contaminação pela atmosfera [05].

A adição de elementos de liga é obtida do próprio eletrodo, sendo alimentado por um dispositivo mecânico, podendo ser suplementada por outros eletrodos ou materiais contidos no fluxo de soldagem. O calor gerado pelo arco funde o eletrodo e parte do fluxo, assim como parte metal de base, formando a poça de fusão. O metal fundido forma o cordão de solda e a parte fundida do fluxo forma a escória, que fica acima da poça de fusão e se solidifica a medida que o arco se afasta, ou seja, percorre a região de solda, resultando em uma camada protetora que evita a contaminação do cordão e reduz sua velocidade resfriamento [05].

A soldagem por arco submerso se caracteriza por ser um processo estável e, que gera poucos fumos de soldagem e quase nenhum respingo, e resulta em cordões com acabamento uniforme e com uma transição suave entre o metal de solda e o metal base [05].

#### 2.1.1 SEQÜÊNCIA DO PROCESSO

Com o estabelecimento da corrente, através da geração de um arco elétrico a partir da ionização do meio entre a peça (metal base) e o eletrodo (arame), o dispositivo de alimentação do arame começa a empurrar o arame a uma velocidade de alimentação controlada, iniciando assim o sistema de fusão tanto do metal base quanto do de adição, através da formação de uma poça de fusão, o carro inicia seu deslocamento ao

longo do cordão de solda, em paralelo a este deslocamento um fluxo para soldagem por arco submerso distribui-se continuamente sobre o cordão de solda por uma pequena distância à frente da região de soldagem, à medida que o cordão de solda é constituído, a parte fundida do fluxo se resfria e endurece, formando um material duro e vítreo, que protege a solda até seu resfriamento, sendo normal seu completo destacamento da solda (Figura 1).

Desde que adequadamente executadas, as soldas por arco submerso não apresentam fagulhas, e não há respingos a serem removidos.

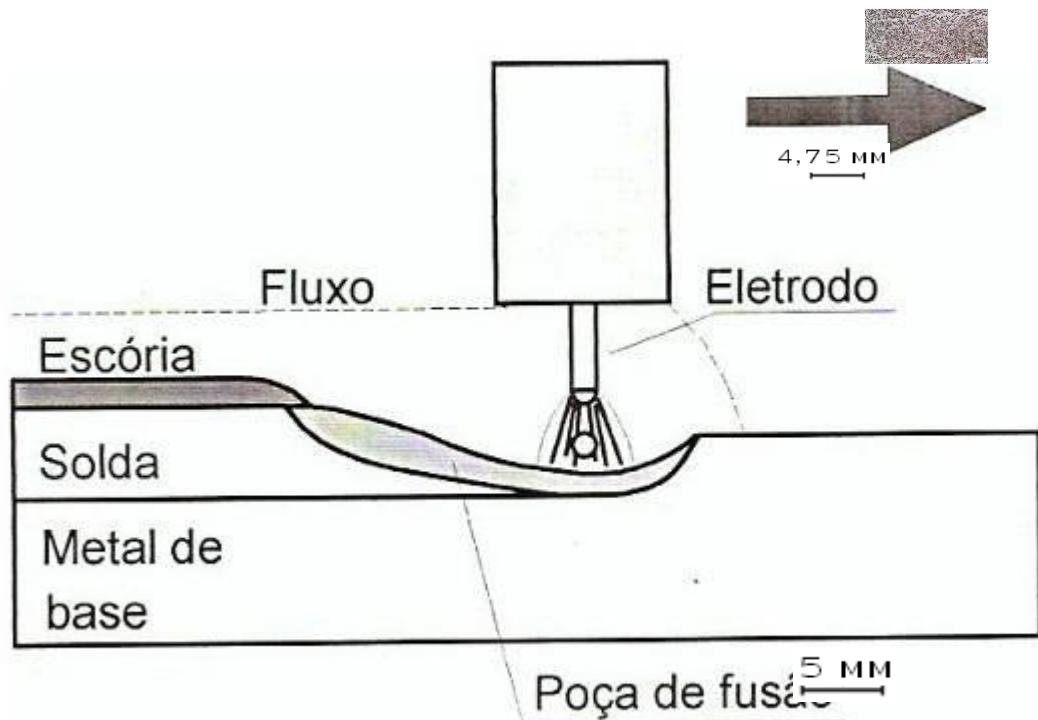


Figura 1 - O processo de soldagem por arco submerso [05].

### 2.1.2 VARIÁVEIS CONTROLÁVEIS DURANTE A SOLDAGEM

É necessário o conhecimento e controle das variáveis na soldagem por arco submerso para se obter soldas de boa qualidade. As variáveis, na ordem de importância, são [01]:

- Corrente de soldagem;

- Tensão do arco;
- Velocidade de soldagem;
- Largura e altura da camada de fluxo;
- Ajustes mecânicos;
- Stickout.

## **Corrente de soldagem**

A corrente de soldagem é a variável mais influente. Ela controla a taxa de fusão do arame de solda, a profundidade de fusão e a quantidade metal base fundido. Se a corrente for excessivamente alta, a fusão será também excessivamente profunda (excesso de penetração) e o metal de solda fundido poderá vazar. Adicionalmente, o maior calor desenvolvido pode alargar demais a zona termicamente afetada do metal base. Correntes muito altas significam também um desperdício de energia e de arame de solda no sentido de reforço excessivo. Por outro lado, se a corrente for muito baixa, haverá penetração e reforço insuficientes [01].

## **Tensão do arco**

O mais próximo em importância à corrente de soldagem é a tensão do arco, que é a diferença de potencial elétrico entre a ponta do arame de solda e a superfície do metal de solda fundido. A tensão de soldagem varia com a distância entre o arame de solda e a poça de fusão (comprimento do arco). Se o comprimento do arco aumentar, a tensão do arco aumenta; inversamente, se o comprimento do arco diminuir, a tensão do arco diminui [01].

A tensão do arco tem um pequeno efeito na quantidade de arame de solda depositado, que é determinada majoritariamente pela corrente de soldagem. A tensão do arco determina principalmente a geometria da zona de fusão e o reforço (perfil do cordão de solda). Altas tensões do arco produzem cordões mais largos, mais planos e menos profundos[01].

## **Velocidade de soldagem**

Com qualquer combinação de corrente-tensão de soldagem, os efeitos de variação da velocidade de soldagem seguem um modelo geral.

Se a velocidade de soldagem aumentar:

- Diminui o aporte térmico (quantidade de calor transferido pelo arco por unidade de comprimento de solda);
- Diminui a quantidade de arame de solda por unidade de comprimento de solda;
- Conseqüentemente, diminui o reforço de solda.

Se a velocidade de soldagem diminuir:

- Aumenta o aporte térmico;
- Aumenta a quantidade de arame de solda por unidade de comprimento de solda;
- Conseqüentemente, aumenta o reforço de solda.

Adicionalmente a esse modelo, a velocidade de soldagem pode ter outro efeito na solda acabada. Normalmente, apenas a corrente de soldagem afeta a penetração da solda. Entretanto, se a velocidade de soldagem diminuir além de um certo valor, a penetração também diminuirá. Isso acontece porque uma boa parte da poça de fusão estará embaixo do arame de solda e a força de penetração do arco será atenuada pela poça. Inversamente, se a velocidade de soldagem ultrapassar um certo valor, a penetração aumentará porque o arame de solda estará à frente da poça de fusão [01].

## **Largura e altura da camada de fluxo**

A largura e a altura da camada de fluxo granulado influenciam a aparência e a integridade do cordão de acabamento bem como na soldagem propriamente dita. Se a camada de fluxo granulado for muito alta, deverá resultar em um cordão áspero e rugoso. Os gases gerados durante a soldagem não conseguem escapar prontamente e

a superfície do metal de solda fundido fica distorcida. Por outro lado, se a camada de fluxo granulado for muito rasa, a zona de soldagem não estará inteiramente submersa. Ocorrerão centelhamento e respingos; o cordão de solda terá uma aparência ruim e poderá apresentar porosidade [01].

Para cada condição de ajuste de parâmetros de soldagem existe uma altura ótima de fluxo granulado. Essa altura pode ser estabelecida aumentando-se lentamente a quantidade de fluxo granulado até que o arco esteja submerso e não ocorra mais centelhamento. Os gases serão liberados sem turbulência em torno do arame de solda, algumas vezes havendo queima deles [01].

Raramente é aplicada uma camada excessivamente estreita. O procedimento mais seguro é aplicar uma camada com largura três vezes superior à largura da poça de fusão. Em cordões largos pode ser necessário aplicar uma camada mais larga. Uma camada de fluxo que esteja limitada por limitadores muito estreitos interfere na fluidez lateral normal do metal de solda fundido, resultando em um reforço estreito, com altura desproporcionalmente maior que a largura e sem molhar convenientemente o metal de base [01].

### **Ajustes mecânicos**

A posição do arame de solda deve ser mantida para controlar a geometria do cordão e a profundidade de penetração. O arame pode ser guiado automaticamente ou ajustado manualmente à medida que a solda progride [01].

Enquanto a solda estiver em andamento, uma inspeção indicará se o cobre-junta está pressionado contra o lado inferior da junta. Se não estiver pressionado, muito metal poderá fluir nas folgas, resultando em um reforço de solda reduzido, mordeduras e, consequentemente, em uma solda com qualidade ruim [01].

## Stickout

É outro parâmetro que tem efeitos significativos sobre a soldagem. Um excessivo stickout contribui para reduzir a tensão de soldagem, causar a instabilidade do arco, intensificar a geração de porosidade, por outro lado um aumento dentro de valores admissíveis facilita a visibilidade na soldagem, em juntas de difícil acesso. A diminuição do stickout aumenta a corrente de soldagem [01].

### 2.1.3 VARIÇÕES DO PROCESSO

O processo de soldagem a arco-submerso admite diversas variações, que tem por objetivo aumentar produtividade e facilitar certas operações específicas, dentre elas destacam-se: Twin Arc, Tandem Arc e Eletrodo em Fita.

A configuração Twin Arc (Figura 2) apresenta dois ou mais eletrodos, utilizando-se uma ou mais fontes de energia, soldando simultaneamente. Este processo oferece menor penetração, baixa diluição e alta taxa de deposição, sendo utilizado, normalmente para execução de revestimentos e soldagem de chanfros largos com mata-junta [04].

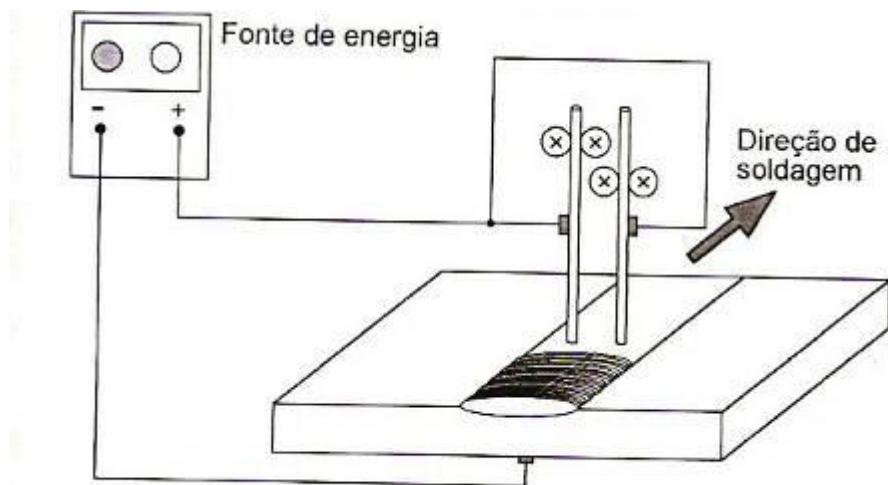


Figura 2 – Configuração Twin Arc[05].

A variação chamada de Eletrodo em Fita (Figura 3) apresenta uma fita metálica no lugar do arame, geralmente a espessura desta fita é da ordem de 0,5 mm e sua largura de 30 a 120 mm. Nesta variação a diluição é muito baixa e os cordões tem aproximadamente a largura da fita, o que faz com que o processo seja um dos melhores para revestimento de grandes áreas [04].

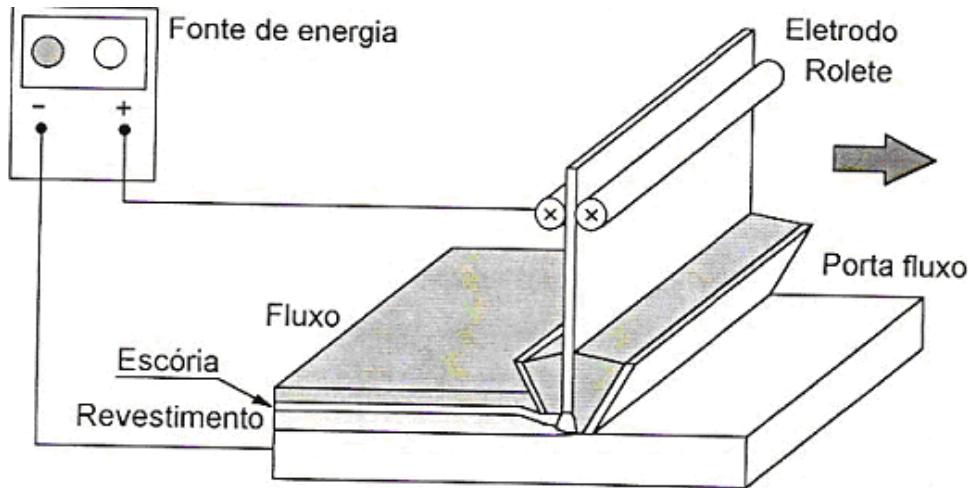


Figura 3 – Configuração Eletrodo em Fita [05].

No presente trabalho foi adotada a configuração Tandem Arc, onde tem-se dois eletrodos soldando em linha, simultaneamente. Cada um tem sua fonte de energia e controles em separado conforme (Figura 4). Devido a problemas de efeitos de campos magnéticos, os eletrodos que são “rebocados” possuem fontes de corrente alternada. É muito comum que o eletrodo “guia” seja corrente contínua polaridade direta (CC-) para garantir melhor penetração, e os demais eletrodos são correntes alternadas (CA) para garantir o enchimento e melhor acabamento do cordão. As configurações das tochas estão representadas na Figura 5.

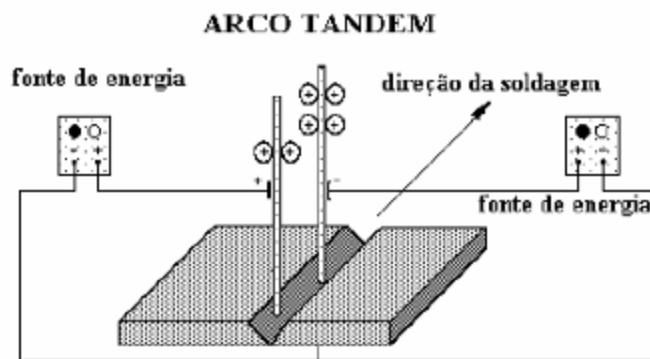


Figura 4 – Configuração Tandem Arc [05].

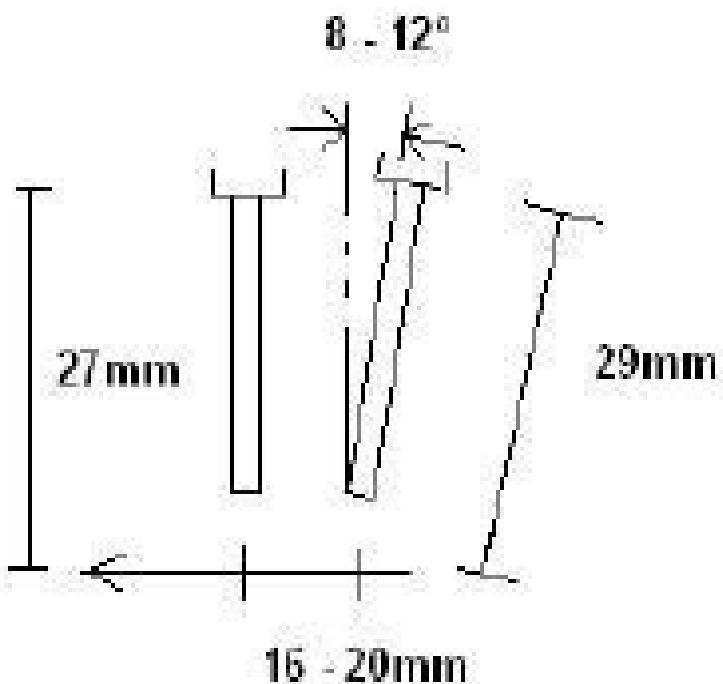


Figura 5 – Configuração das tochas, conforme EPS N° 003-2006.

#### 2.1.4 DEFEITOS DA SOLDAGEM

Os defeitos de soldagem são as causas de reprovação da junta soldada, segue abaixo tabela que relaciona os defeitos da soldagem e suas respectivas causas.

Tabela 1 – Defeito de soldagem e suas causas.

DEFEITO	CAUSAS
Raiz perfurada	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Corrente muito alta;</li> <li>• Ângulo do bisel muito alto;</li> <li>• Nariz muito pequeno;</li> <li>• Abertura excessiva da raiz.</li> </ul>
Metal de solda escorrido	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Descentralização incorreta do arame;</li> <li>• Corrente de soldagem muito alta.</li> </ul>
Penetração muito profunda ou muito rasa	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Corrente muito alta ou muito baixa;</li> <li>• Tensão muito baixa ou muito alta;</li> <li>• Abertura incorreta de raiz;</li> <li>• Usar CC monopasse.</li> </ul>
Mordedura	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Velocidade de soldagem muito alta;</li> <li>• Alinhamento do arame inadequado em juntas em ângulo;</li> <li>• Cobre-juntas inadequado;</li> <li>• Tensão alta.</li> </ul>
Vazios e trincas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Resfriamento inadequado;</li> <li>• Montagem inadequada;</li> <li>• Reforço côncavo em junta em ângulo;</li> <li>• Velocidade de soldagem muito alta;</li> <li>• Arame inadequado.</li> </ul>
Porosidade	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Umidade do eletrodo;</li> <li>• Fluxo de proteção úmido;</li> <li>• Corrente ou tensão de soldagem excessivas;</li> <li>• Corrente de ar durante a soldagem.</li> </ul>

## 2.2 DESCRIÇÃO DO PROCESSO DE SOLDAGEM HELICOIDAL / ESPIRAL

No processo de Soldagem Helicoidal/Espiral é usada bobina ao invés de chapas como no processo de soldagem longitudinal. As bobinas são desbobinadas passando por um conjunto de rolos seguidos de fresamento das bordas da bobina, para ajustar a sua largura (Figura 6). Neste processo a perda de material (sucata) produzido pelas aparas é proporcional à espessura da chapa (strip). A chapa é em seguida soldada transversalmente à próxima bobina (emenda de bobina). Isto permite a fabricação contínua de tubos de comprimento ilimitado [02].

A bobina desenrolada é então transformada em tubo através do uso de três rolos no sistema de curvamento, como ilustrado na Figura 6, o que garante excelente circunferencialidade do tubo [02].

A equação (1) apresenta a relação entre o diâmetro do tubo, o ângulo de formação do tubo e a largura da bobina.

A formação do tubo se completa através da soldagem de passe duplo, que consiste em soldagem interna acompanhada pela soldagem externa, simultaneamente defasadas em meio círculo. A Figura 7 mostra esquematicamente a seqüência de soldagem interna e externa. A soldagem é realizada na posição 6 horas na parte interna e 12 horas na parte externa. Toda a soldagem é acompanhada por computador e os dados são continuamente gravados [02].

Por princípio, a geometria do tubo produzido por soldagem em espiral é constante ao longo do comprimento do tubo. O cordão de solda em espiral funciona como um estabilizador geométrico, conferindo ao tubo uma excelente circunferencialidade [02].

$$D = \frac{B}{\pi \cdot \operatorname{sen} \alpha} \quad \dots \dots \dots \quad (\text{Eq. 1})$$

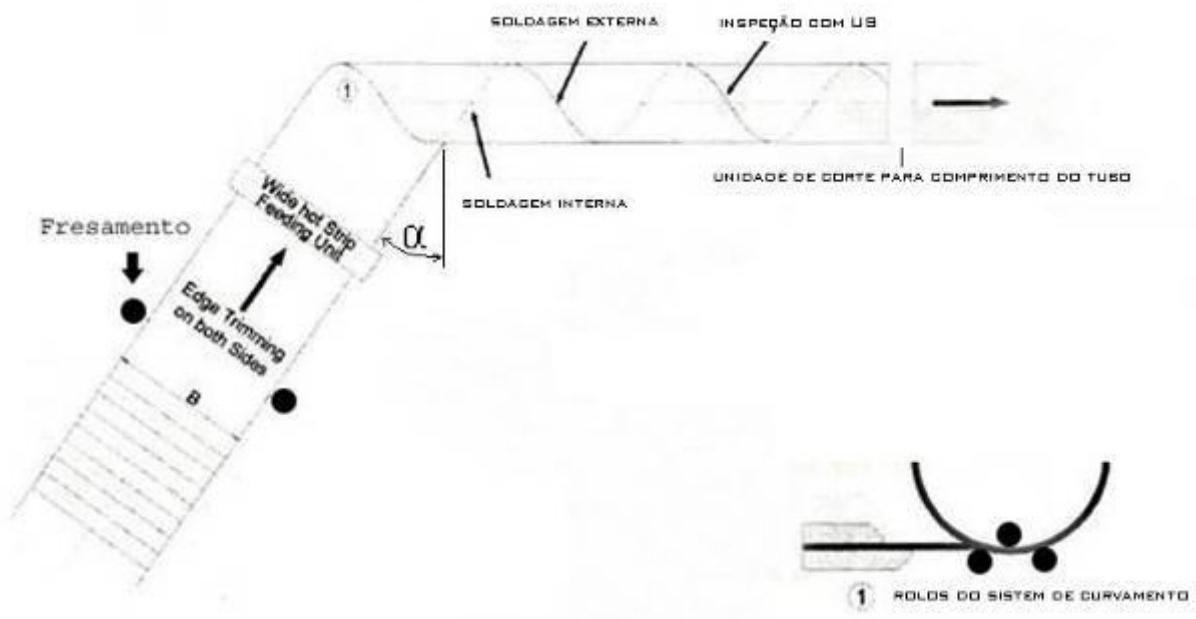


Figura 6 – Princípio de formação de tubos em espiral [02].

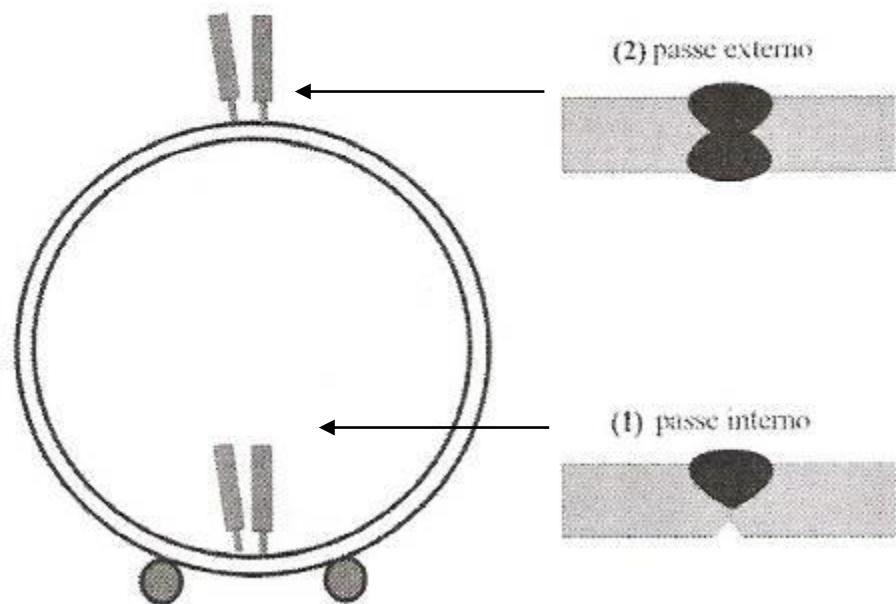


Figura 7 – Configuração da soldagem a arco submerso na parte interna e externa utilizando dois arames [02].

## 2.3 MICROESTRUTURA

Para os aços com baixo teor de carbono e baixa liga, a poça de fusão solidifica-se inicialmente como ferrita, podendo sofrer uma reação peritética com a formação de austenita. Durante o resfriamento, a ferrita remanescente transforma-se em austenita. Esta, em função das elevadas temperaturas, sofre um grande crescimento de grão, tendendo a apresentar uma estrutura de grãos colunares e grosseiros, similar à estrutura original de fusão da zona fundida (ZF). Em temperaturas mais baixas, inferiores a 900°C, a austenita se decompõe, resultando em diferentes produtos ou constituintes tais como ferrita primária, ferrita acicular, ferrita com segunda fase, agregado de ferrita/carboneto [06].

Assim, a microestrutura da zona fundida do metal de solda baixo carbono e baixa liga é resultado do crescimento epitaxial colunar do metal de solda solidificado. Sendo influenciada pelo estado inicial da austenita (composição, tamanho de grão, microsegregações e estado de deformações), das condições de aquecimento e resfriamento, bem como do efeito dos elementos de liga [06].

Em uma solda em um só passe, a microestrutura da ZF será formada pelos produtos da decomposição da austenita em ferrita durante o ciclo de resfriamento contínuo, sendo que a ferrita assume diferentes morfologias, algumas de grande semelhança. Em soldas multipasse, a microestrutura será ainda mais complexa, sendo formada por regiões reaquecidas e alteradas pelos ciclos térmicos dos passes seguintes e por regiões que permaneceram basicamente inalteradas. A caracterização desta microestrutura é fundamental para o entendimento e o aprimoramento das propriedades finais da zona fundida [06].

As fases resultantes da decomposição da austenita são basicamente: ferrita, cementita e martensita. Além destas, pequenas quantidades de austenita podem permanecer inalteradas (austenita retida) e diferentes precipitados (outros carbonetos, nitretos, etc.) e inclusões podem existir. Estas fases podem aparecer na forma de diferentes

constituítes, nem sempre de fácil identificação, a qual é ainda mais dificultada pela grande diferença de aparência destes constituítes em relação aos do metal base. Estas dificuldades causaram, há algumas décadas, a proliferação de terminologias diferentes e conflitantes para descrever a microestrutura do metal de solda. Há cerca de 20 anos, o Instituto Internacional de Soldagem (IIW) desenvolveu um sistema de classificação para os constituítes do metal de solda, conforme descrito no item 2.3.1 [06].

### **2.3.1 CLASSIFICAÇÃO DOS MICROCONSTITUÍTES**

De acordo com o IIW (1998), os microconstituítes do metal de solda, quando visualizados por microscopia ótica, podem ser classificados da seguinte forma (Figuras 8 e 9): Ferrita Primária (PF), Ferrita Acicular (AF), Ferrita com Segunda Fase (FS), Agregado de Ferrita-Carboneto (FC) e Martensita (M).

**Ferrita Primária (PF):** pode ocorrer em duas formas que podem ser contadas separadamente como constituítes se a sua definição for clara:

- A) Ferrita de Contorno de Grão [PF(G)]: ferrita (veios ou grãos poligonais) associados aos contornos de grão da austenita prévia.
- B) Ferrita Poligonal Intragranular [PF(I)]: grão de ferrita, geralmente poligonal, encontrado no interior do grão da austenita prévia e que é maior que o triplo da largura média das ripas da Ferrita Acicular ou da Ferrita com Segunda Fase que o circunda.

**Ferrita Acicular (AF):** É constituída por pequenos grãos não alinhados localizados no interior do grão da austenita prévia. A região de AF muitas vezes contém ripas isoladas com alta razão entre comprimento e largura.

**Ferrita com Segunda Fase (FS):** Pode ocorrer de duas formas:

- A) Ferrita com Segunda Fase Alinhada [FS(A)]: quando duas ou mais ripas de ferrita são paralelas e a sua relação comprimento-largura é maior que 4:1 serão classificadas com FS(A). Caso contrário, serão classificadas como AF ou PF.
- B) Ferrita com Segunda Fase não alinhada [FS(NA)]: circunda ripas isoladas de AF ou de microfases que são aproximadamente eqüiaxiais e distribuídas aleatoriamente.

**Agregado de Ferrita/Carboneto (FC):** São estruturas finas de ferrita-carbonetos, compreendendo ferrita com interfase de carbonetos e perlita. Se o agregado pode ser identificado como perlita, ele será identificado como FC(P). Se a colônia é menor que as ripas adjacentes dentro dos grãos da austenita anterior, ela será tratada como microfase.

Nos processos de soldagem ao arco voltaico, tais como o eletrodo revestido e o arco submerso, onde já existem muitos estudos acerca deste assunto, dois são os fatores fundamentais e concorrentes para se alcançar bons níveis de tenacidade no metal depositado. O primeiro é a presença de uma alta percentagem de ferrita acicular enquanto que o segundo é o teor, a distribuição e a morfologia de microfases (constituinte AM) como a austenita retida, martensita maclada e a martensita em ripas [01].

Dentre os muitos constituintes microestruturais que conduzem à elevação dos níveis da tenacidade, a ferrita acicular é aquele que reconhecidamente apresenta o melhor desempenho. A sua morfologia apresenta-se como grãos colunares em malhas de finas agulhas. Tais arranjos são característicos de contornos de grãos de grande ângulo entre cristais adjacentes que, somado ao considerável refino dos seus grãos, propiciam a elevação da tenacidade devido a maior resistência a propagação de trincas intergranulares [01].

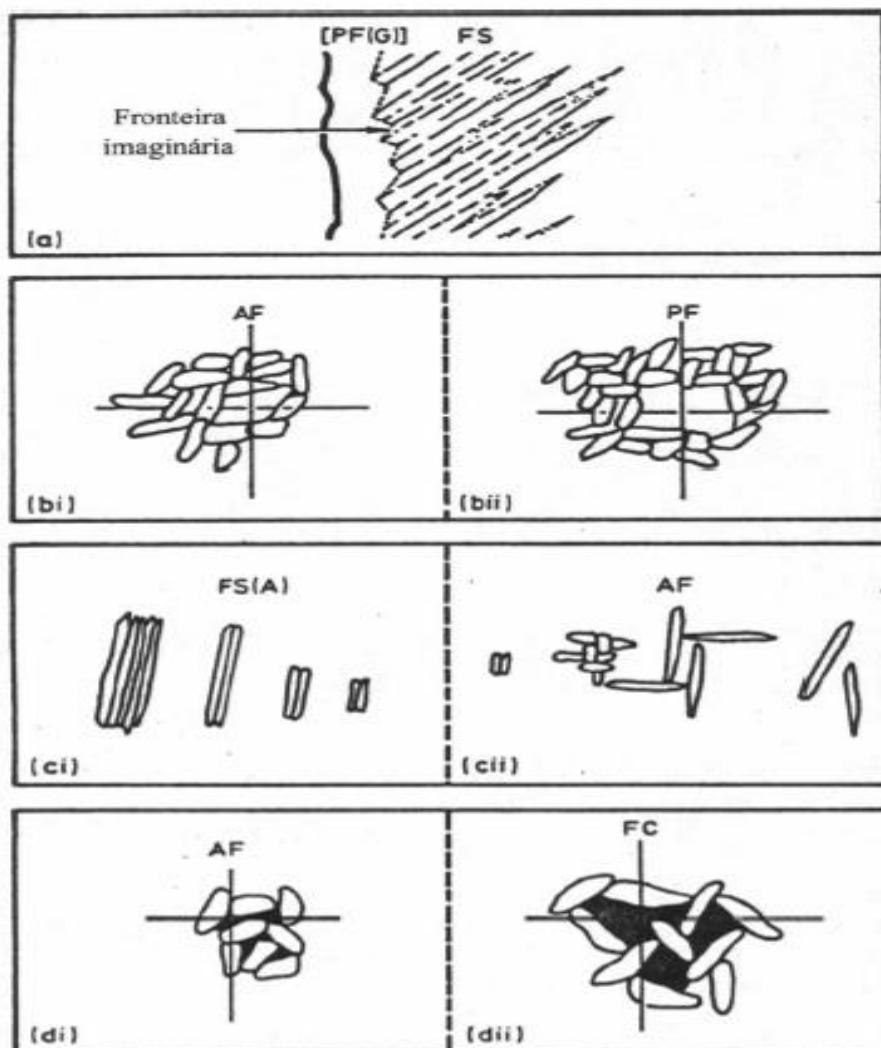


Figura 8: Representação esquemática dos constituintes microestruturais (IIW 1988):

- (a) Fronteira imaginária entre a ferrita poligonal de contorno de grão e a ferrita com Segunda fase;
- (bi) Ferrita sob retículo  $< 3x$  a largura média das ripas;
- (bii) Ferrita sob retículo  $> 3x$  a largura média das ripas;
- (ci) Duas ou mais ripas paralelas com relação comprimento: largura  $> 4:1$ ;
- (cii) Duas ripas paralelas com relação comprimento:largura  $> 4:1$ , ou ripas não alinhadas, ou ripas isoladas de altas relação comprimento:largura;
- (di) Área de colônia FC sob retículo  $<$  que a área da ripa de ferrita individual;
- (dii) Área de colônia FC sob o retículo  $>$  que a área da ripa de ferrita individual.

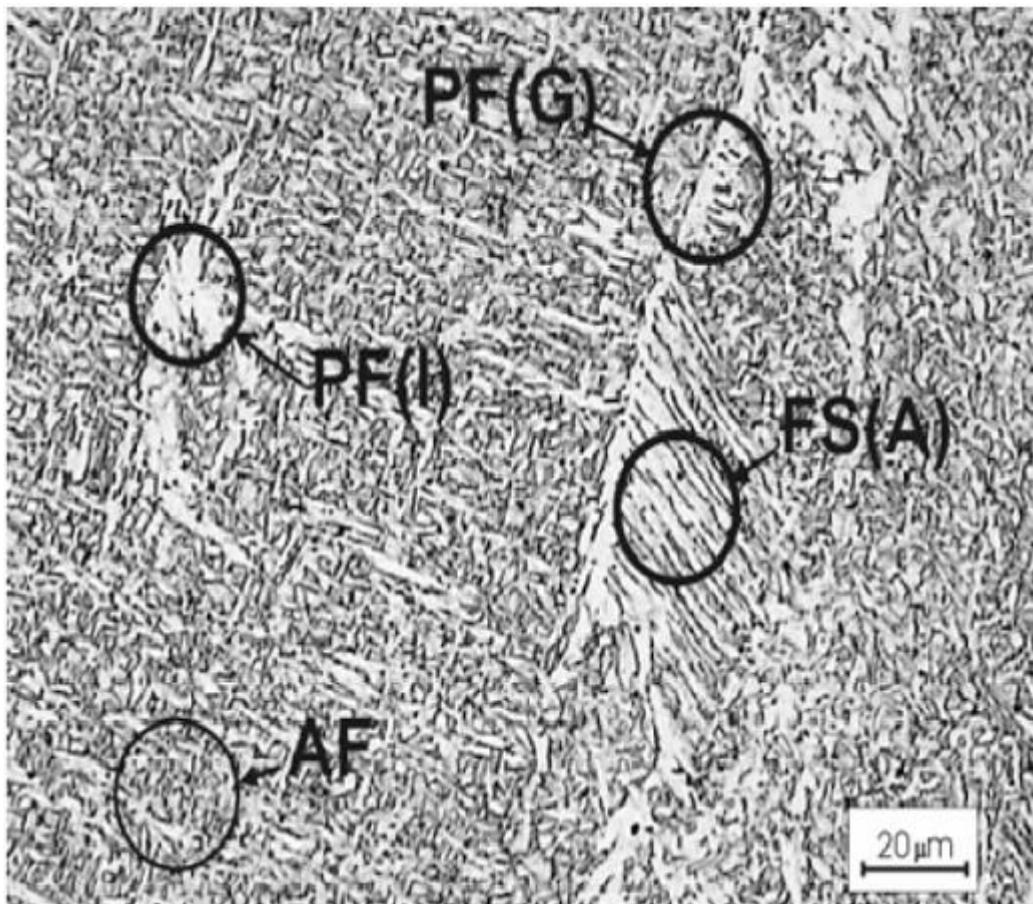


Figura 9: Mostrando vários constituintes microestruturais, onde: PF = ferrita primária, PF(G) = ferrita poligonal de contorno de grão, PF(I) = ferreta poligonal intragranular, AF = ferrita acicular, FS(A) = ferrita com segunda fase alinhada, FS(NA) = ferrita com segunda fase não alinhada [7].

### 2.3.2 CONTROLE DA FORMAÇÃO DA MICROESTRUTURA

A solidificação da poça de solda incorpora aspectos tanto de uma solidificação extrema, isto é, de uma fundição tradicional, bem como uma tecnologia de rápida solidificação [08].

É bem estabelecido que o comportamento da solidificação controla o tamanho e a forma do grão, a extensão da segregação e a distribuição de inclusões e defeitos tais como porosidade e trincas a quente. Portanto, as propriedades e integridade do metal

de solda dependem do comportamento da solidificação e das características microestruturais resultantes [08].

A microestrutura final do metal de solda depende de interações complexas entre muitas variáveis importantes, tais como [08]:

- Microestrutura de solidificação;
- Ciclo de resfriamento da solda;
- Composição química do metal de solda;
- Tamanho de grão da austenita prévia.

### **2.3.2.1 MICROESTRUTURA DE SOLIDIFICAÇÃO**

O processo de solidificação influencia tanto no tamanho quanto na forma do grão do material solidificado. As inclusões que se formam no material fundido serão incorporadas no material sólido durante a solidificação [08].

A microestrutura do metal de solda é determinada parcialmente pela temperabilidade da liga (determinado principalmente pelas quantidades de carbono, manganês, molibdênio e boro) e pelo tamanho e tipo de inclusões [08].

### **2.3.2.2 COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO METAL DE SOLDA**

A composição química do metal de solda é controlada pelas reações químicas que ocorrem na poça de solda em elevadas temperaturas e é, portanto, influenciada pela escolha dos consumíveis de soldagem (isto é, combinação do arame metálico e fluxo), pela composição química do metal base e pelas condições operacionais aplicadas [08].

Os produtos das reações dos elementos de liga e suas porções residuais afetam profundamente a microestrutura da solda. Elementos microligantes derivados de

consumíveis ou da diluição com o metal base tem um efeito complexo sobre a microestrutura e propriedades das juntas soldadas [08].

O papel da composição química na formação da ferrita acicular parece depender da influência direta que o elemento tem sobre a temperabilidade básica do metal de solda [08].

Os elementos mais efetivos devem ser o manganês e o carbono e, possivelmente, o silício, porém o nível de temperabilidade requerido para desenvolver estruturas de ferrita acicular é bem crítico e é, portanto, também influenciado por outros elementos tais como alumínio e níquel, que dependendo do nível inicial da temperabilidade, pode promover ou restringir o desenvolvimento da ferrita acicular [08].

Neste processo de soldagem, os elementos que mais afetam a tenacidade do metal depositado são o nitrogênio, o alumínio, o titânio, o carbono, o níquel e o manganês [01]. A seguir, descreve-se o papel destes elementos químicos sobre a microestrutura e sobre as propriedades mecânicas do metal de solda.

#### **2.3.2.2.1 INFLUÊNCIA DO NITROGÊNIO NA MICROESTRUTURA**

Semelhante aos demais processos de soldagem ao arco voltaico, o aumento do teor de nitrogênio na microestrutura do metal de solda é bastante prejudicial a sua tenacidade. Este elemento pode estar presente sob três formas distintas: como átomo ou soluto intersticial (nitrogênio livre ou dissolvido), como nitreto ou inclusão não metálica (nitrogênio combinado) e/ou como gás (nitrogênio molecular) contido em poros. Destes, somente o nitrogênio dissolvido e o combinado podem afetar a microestrutura do metal depositado. O primeiro estabiliza a austenita e reduz a temperatura de transformação, enquanto que o segundo aumenta a temperatura de transformação e age como sítio de nucleação durante as transformações metalúrgicas do metal de solda [01].

### **2.3.2.2.2 INFLUÊNCIA DO MANGANÊS E NÍQUEL NA MICROESTRUTURA**

O manganês é, depois do carbono, um dos elementos de liga mais importantes usado para aumentar a resistência mecânica e a temperabilidade dos aços pelo abaixamento da temperatura de transformação de austenita em ferrita. O aumento da tenacidade nas soldas pode ser conseguido pelo balanceamento dos teores de manganês e de carbono de modo a favorecer a formação de ferrita acicular e um consequente refino da sua microestrutura. O níquel, em teores de até 3,5%, é também um refinador da microestrutura do metal depositado. Como o manganês, o níquel reduz o tamanho de grão da ferrita acicular e refina a microestrutura resultante. Neste sentido, a adição controlada de manganês e de níquel ao metal de solda como estabilizadores da austenita pode promover a melhoria das propriedades mecânicas. No caso da soldagem com arame tubular autoprotegido, onde os teores de ferrita acicular são desprezíveis, a ação do Mn e do Ni se dá através da estabilização da austenita. Deste modo, as propriedades mecânicas e especialmente a tenacidade podem ser melhoradas [01].

### **2.3.2.2.3 INFLUÊNCIA DO CARBONO NA MICROESTRUTURA**

Sem dúvida, um dos elementos mais importantes em termos de controle da microestrutura nos aços é o carbono. Em metais de solda, os níveis devem ser mantidos suficientemente baixos para prevenir a formação extensiva de ripas de martensita. Níveis de carbono na faixa de 0,05 a 0,15% encontrados em metais de solda, têm como maior efeito controlar a quantidade de formação de carbetas [08].

A microestrutura do metal de solda, como depositado, é modificada pela adição de carbono. O carbono promove a formação de ferrita acicular à custa da ferrita poligonal de contorno de grão e produz o refinamento do grão das regiões reaquecidas [09], sendo o principal efeito do carbono é limitar a espessura dos veios da ferrita primária de contorno de grão, FP (G), além de influenciar na formação da ferrita com segunda fase (FS) [01].

## 2.4 PROPRIEDADES MECÂNICAS

### 2.4.1 DUREZA

Existem diversas maneiras de se determinar a dureza de um material sendo a mais comum, para os materiais metálicos, aquela em que se estabelece, direta ou indiretamente, a resistência a penetração que o corpo de prova oferece a uma ponta esférica, cônica ou piramidal constituída de um material indeformável [08].

Para executar o ensaio de dureza, uma carga fixa força o penetrador no corpo de prova. A profundidade de penetração ou o tamanho da impressão é medido. A medição é convertida para um número de dureza através do emprego de uma série de tabelas bem estabelecidas [10].

Os métodos padronizados mais comumente adotados são: Brinell, Rockwell e Vickers. Pode-se estabelecer relações entre a dureza e as propriedades mecânicas. Contudo deve-se que a dureza é apenas uma propriedade da superfície do corpo ensaiado, não sendo, portanto, o comportamento de todo volume [08].

O ensaio de dureza Vickers tem larga aceitação para trabalhos científicos porque fornece uma escala de dureza contínua para uma dada carga, desde materiais muito macios, até materiais extremamente duros [08].

Esse ensaio é também amplamente utilizado na indústria de componentes mecânicos, tratamentos superficiais, vidros e laminados devido a vantagem de fornecer dados quantitativos das características de resistência a deformação permanente das peças produzidas [11].

A dureza é usada pelo engenheiro de projeto, para especificar as condições finais de uma peça estrutural. Isto é devido, em parte, ao fato que os ensaios de dureza são

baratos e não consomem muito tempo e, também porque podem ser realizados sobre a peça acabada sem a necessidade de usinagem de um corpo de prova especial [08].

#### **2.4.2 IMPACTO**

Os ensaios de impacto são assim denominados por serem ensaios dinâmicos onde altas taxas de deformação são aplicadas nos procedimentos de teste. Os principais responsáveis pela maioria das falhas do tipo frágil que ocorrem em serviço são descontinuidades, que introduzem um estado triaxial de tensões, tal como o que existe na raiz de um entalhe, e baixas temperaturas. Porém, uma vez que estes efeitos são acentuados a uma taxa de carregamento elevada, ensaios de impacto têm sido utilizados para determinar a suscetibilidade dos materiais à fratura frágil [12].

Nos ensaios de impacto, corpos de prova entalhados são submetidos ao impacto de um dado peso sob temperaturas conhecidas em uma máquina pendular. Os resultados apresentados são obtidos na forma de energia absorvida pelo corpo de prova durante o impacto em função da temperatura [12].

Os ensaios mais conhecidos são denominados Charpy e Izod dependendo da configuração geométrica do entalhe e do modo de fixação do corpo-de-prova na máquina. Como resultado do ensaio obtém-se a energia absorvida pelo material até a fratura. A principal aplicação desse ensaio refere-se à caracterização do comportamento dos materiais, na transição da propriedade dúctil para a frágil como função da temperatura, possibilitando a determinação da faixa de temperatura na qual um material muda de dúctil para frágil [11].

#### **2.4.3 TRAÇÃO**

O objetivo do ensaio de tração é avaliar a tensão limite de resistência ( $\sigma_r$ ), a tensão limite de escoamento ( $\sigma_e$ ), o alongamento (A) e a estrição (S) do metal depositado. Trata-se de um ensaio amplamente utilizado na indústria de componentes mecânicos,

com a vantagem de fornecer dados quantitativos das características mecânicas dos materiais. O ensaio consiste na aplicação de carga de tração uniaxial crescente em um corpo-de-prova específico até a ruptura. O ensaio de tração é bastante utilizado como teste para controle das especificações da entrada de matéria-prima. Os resultados fornecidos pelo ensaio de tração são fortemente influenciados pela temperatura, pela velocidade de deformação pela anisotropia do material, pelo tamanho de grão, pela porcentagem de impurezas, bem como pelas condições ambientais [11].

A resistência à tração nos metais de solda normalmente deve ser maior do que a correspondente no metal de base. A resistência no metal de solda é baseada nos mesmos componentes que no metal de base ou na zona termicamente afetada (ZAC). As características mais importantes para o metal de solda são [08]:

- a) tamanho de grão fino (ferrita acicular);
- b) elementos que endurecem por solução sólida, tais como manganês e níquel;
- c) endurecimento por interação de discordâncias.

#### **2.4.4 INFLUÊNCIA DA MICROESTRUTURA NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS**

Estudos clássicos sobre resistência e tenacidade de diferentes fases microestruturais têm mostrado que a melhor combinação de propriedades pode ser encontrada com uma matriz de tamanho de grão muito fino que não possua qualquer fragilização por segunda fase contínua. Esta é exatamente a situação que pode ser desenvolvida em metais de solda que possuam altos níveis de ferrita acicular [08].

A resistência e a tenacidade do metal de solda como depositado são determinadas pelo conjunto de um grão de tamanho fino com uma maior proporção de ferrita acicular. A melhora produzida tanto na tenacidade no ensaio Charpy com entalhe V, quanto no

limite convencional da elasticidade, é devido ao aumento na quantidade de ferrita acicular [08].

Os elementos Mn, Mo, Ni, Si e Cr influenciam a tenacidade em dois principais modos:

- a) Modificam a microestrutura, com Mn, Mo e Ni em particular, facilitando a formação de ferrita acicular e, eventualmente, a de martensita na presença de altas quantidades de elementos de liga [08];
- b) Aumentam o limite de escoamento como um resultado das mudanças na microestrutura e do efeito direto da solução sólida de endurecimento [08].

### 3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

#### 3.1 CHAPA SOLDADA

Para a confecção das juntas soldadas foram utilizados os aços ASTM A-36 e API 5L GRAU X60, chapa bi-partida, com espessura de 12,7 mm e 14 mm respectivamente, comprimento de 500 mm, largura 70 mm (cada parte) e junta com chanfro em X. O chanfro foi confeccionado conforme (Figura 10).

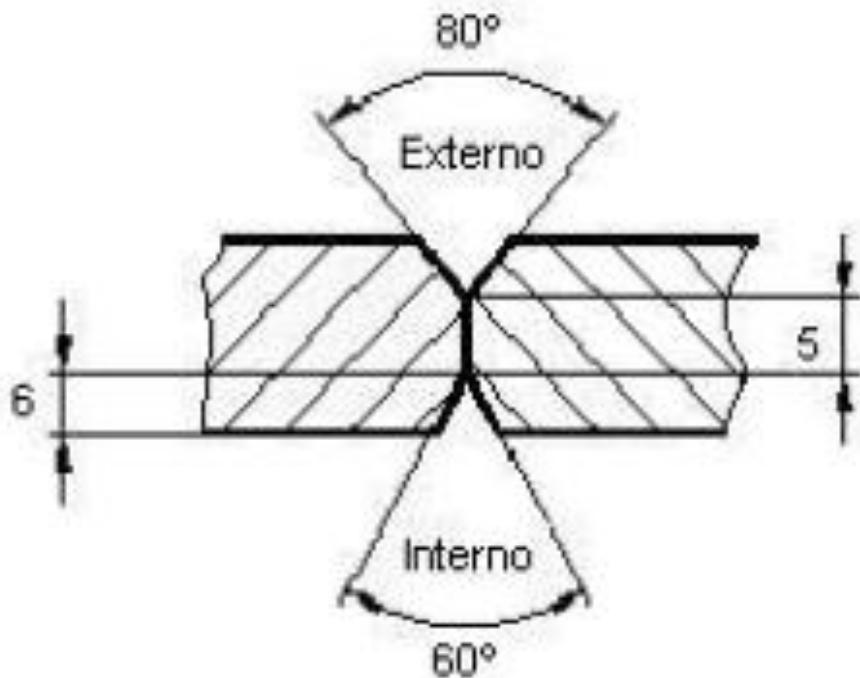


Figura 10 – Detalhe do chanfro da chapa a ser soldada.

Foram confeccionadas duas juntas soldadas sendo que para cada uma foram utilizados os consumíveis conforme as Tabelas 3 e 5.

### 3.1.1 METAL BASE E CONSUMÍVEIS PARA O AÇO ASTM A-36

O material empregado na confecção do corpo-de-prova foi retirado de chapas de aço carbono ASTM A-36. A Tabela 2 apresenta a composição química estabelecida pela norma ASTM.

Tabela 2 - Composição química (% em peso) do aço ASTM A-36.

C má ximo	Mn	P má ximo	S má ximo	Si má ximo	Cu mí nimo
0,2 5	080 1,20	– 4	0,0 50	0,0 0,40	0,20

Utilizou-se o arame/eletrodo EL12 - classificação AWS EA3, com 2,38mm de diâmetro. A composição química do eletrodo está apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 - Composição química (% em peso) do arame-eletrodo.

C	Mn	P	S	Si	Al	Cu	Cr	Ni
0,060	0,400	0,014	0,010	0,008	0,000	0,019	0,00	0,00

O fluxo utilizado tem a classificação F7AO – EM 12.

### 3.1.2 METAL BASE E CONSUMIVEIS PARA O AÇO API 5L GRAU X60

O material empregado na confecção do corpo-de-prova foi retirado de chapas de aço carbono API 5L X60. A Tabela 4 apresenta sua composição química:

Tabela 4 - Composição química (% em peso) do aço API 5L X60.

C	M n	P	S	S i	C u
0, 08	1, 54	0, 025	0, 005	0 ,18	0 ,01
Al b	N	V	Ti	C r	N i

0, 024	0, 041	0, 024	0, 013	0 ,03	0 ,02
<b>M o</b>	<b>S n</b>	<b>N</b>	<b>B</b>	<b>C a</b>	
0, 024	0, 041	0, 024	0, 013	0 ,03	

Utilizou-se o arame/eletrodo OK Autrod 12.24 - classificação AWS EA2. A composição química está apresentada na Tabela 5.

Tabela 5 - Composição química(% em peso) do arame-eletrodo.

<b>C</b>	<b>Mn</b>	<b>Mo</b>	<b>Si</b>
0,01	1,1	0,5	0,1

### 3.1.3 APORTE DE CALOR

Foi feito o cálculo do aporte de calor fornecido durante a realização das juntas soldadas, utilizando a Eq. (2), para se ter a ordem de grandeza e noção de quanto de energia foi necessário para produzir a solda.

$$H = \frac{V \cdot I}{v \cdot 1000} \quad \dots \dots \dots \text{Eq. (2)}$$

Onde:  $H$  = Aporte de Calor em quilojoules por mm;

$E$  = Tensão em volts;

$I$  = Corrente em ampéres;

$v$  = Velocidade de soldagem em mm/s

Na soldagem utilizamos o processo Tandem, conforme mencionado no item 2.1.3, com dois arames, sendo que primeiro foi executado um passe interno no lado do chanfro de 60° e em seguida foi executado um passe externo no lado do chanfro de 80°, conforme mostrado na Figura 12. Totalizando dois passes um interno e um externo.

## 3.2 ANÁLISES METALOGRÁFICAS

A Metalurgia do metal de solda de aços C-Mn e baixa liga difere significativamente da metalurgia do metal base em vários aspectos: As taxas de aquecimento e resfriamento de uma solda são muitas vezes superiores às submetidas ao aço durante seu processo de fabricação, a microestrutura do metal de solda é do tipo colunar e “como fundida”, não sendo submetida a nenhum tratamento termo-mecânico posterior; o teor de carbono do metal de solda é normalmente mantido abaixo de 0,1 %, enquanto os aços C-Mn e baixa liga possuem teor de carbono normalmente na faixa de 0,12 – 0,25 %C [5].

### 3.2.1 MACROGRAFIA

O objetivo da macrografia é caracterizar o perfil da macroestrutura na seção transversal do cordão de solda. As superfícies das amostras foram preparadas mediante o seu lixamento até a granulometria de # 320 e a seguir, serão atacadas quimicamente com uma solução de nital a 2%. Serão avaliados o número e a seqüência de deposição dos passes e das camadas de solda, a presença de porosidade, a falta de fusão, a falta de penetração etc.

Para a realização das macrografias foi separado um corpo de prova próximo a região central da chapa soldada (Figura 11), de cada um dos conjuntos soldados, com uma espessura de aproximadamente 10 mm.

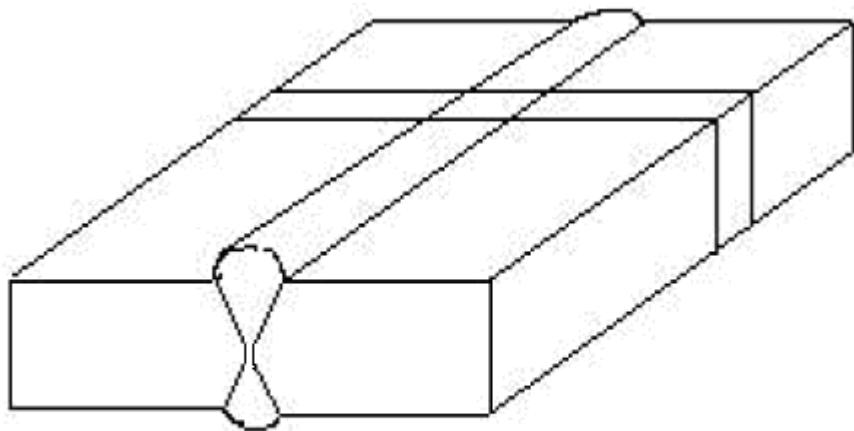


Figura 11 - Detalhe da região retirada do corpo de prova para realização da micrografia e macrografia.

Em seguida foi feito polimento utilizando as seguintes seqüência de lixas: (# 320, # 480, # 600, #800). Antes de realizar o ataque químico, foi realizado polimento com alumina, e logo após, o ataque químico foi com Nital 2%.

### 3.2.2 MICROGRAFIA

O principal objetivo desta análise é avaliar qualitativa e quantitativamente a microestrutura resultante do metal de solda. A analise qualitativa avaliará, pela microscopia ótica, a microestrutura colunar dos dois passes [01].

As amostras foram submetidas à 4 lixas diferentes (# 320, # 480, # 600, #800), após lixadas as amostra serão polidas com Alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e posteriormente atacadas com Nital 2%, e na região do metal de base, da ZTA e da zona fundida será realizada a análise quantitativa dos seus constituintes microestruturais. Para tal, é empregado o procedimento convencional de contagem por pontos, sendo fotografadas 10 pontos em lugares aleatórios no cordão de solda, com um aumento de 500X para quantificação das fases em conformidade com o IIW, ou seja, foram identificados 121 pontos,

perfazendo um total de 1210 pontos para cada amostra (Figura 12). Em seguida foram retiradas fotos com aumento de 50X para documentação.



Figura 12 – Foto da malha de 121 pontos

A terminologia que será adotada neste trabalho para a identificação dos microconstituintes, ou seja: ferrita acicular - AF, ferrita proutectoide – PF (G), ferrita poligonal - PF (I), ferrita com segunda fase alinhada - FS (A), agregado de ferrita e carbetos – FC, microfases e Martensita – M.

Como a microscopia ótica oferece subsídios razoáveis para o estabelecimento de relações entre a microestrutura e as propriedades mecânicas. A mesma então será adotada neste trabalho somente para identificar e para quantificar aqueles microconstituintes que normalmente se apresentam de fácil resolução, como é o caso das ferritas primária, acicular e com segunda fase. O restante dos demais microconstituintes, por ventura existentes no metal de solda (microfases e martensita), serão contabilizados juntos e simplesmente chamados de “outros”.

### 3.3 ENSAIO DE TRAÇÃO

O ensaio de tração foi realizado somente na junta soldada com o API 5L X60, visto que a norma API exige que para qualificação de material e solda com este aço são

necessários o ensaio de tração e impacto (item 4.5). Sendo assim foram retirados dois corpos de prova da região transversal da junta soldada, conforme Figura 13. A sua usinagem seguirá o estabelecido pela norma ASME sec IX.

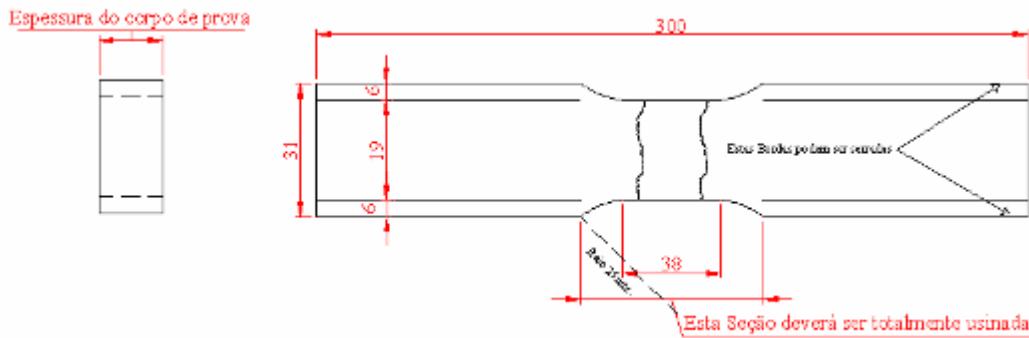


Figura 13 – Detalhe do corpo de prova para ensaio de tração

### 3.4 ENSAIO DE DUREZA

O objetivo do ensaio de dureza será avaliar a resistência à deformação plástica permanente do metal de solda e do metal base à temperatura ambiente. Os resultados de dureza foram obtidos empregando o procedimento de impressão Vickers, com carga de 1 Kgf. As impressões de dureza, foram realizadas na seção transversal plana e polida do metal de solda e metal base sobre 3 linhas distintas (Figura 14). Para tal, será empregada a técnica Vickers com uma carga de 1 kgf (escala HV1) e um tempo de duração da carga de 20 segundos.

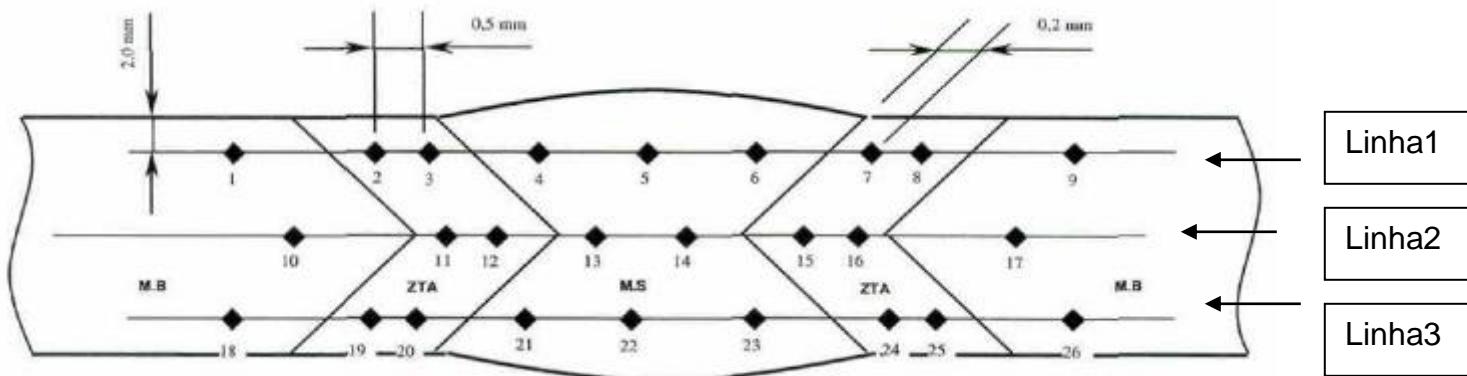


Figura 14 – Distribuição das impressões das medidas de dureza do corpo de prova.

### 3.5 ENSAIO DE IMPACTO

Para realização do ensaio Charpy foi utilizado um pêndulo instrumentado de 300 Joules e com velocidade de impacto de 5,52 m /s, tendo como resultado a energia absorvida.

### 3.6 PARÂMETROS DE SOLDAGEM

As Soldas foram confeccionadas utilizando-se os parâmetros conforme tabela 6 e tabela 7, onde estão representados os valores médios para cada caso.

Tabela 6 – Parâmetros de soldagem para o metal de base ASTM A-36.

Parâmetros	Eletrodo Guia	Eletrodo Rebocado
Tipo de Corrente	CC <sup>+</sup>	CA
Tensão (V)	35 V	35 V
Velocidade de Soldagem	2 m/min	2 m/min
Numero de Passes	Passe Duplo	Passe Duplo
Corrente de Soldagem	1000A	600A
Diâmetro do Arame (mm)	4mm	3,2mm
Abertura da Raiz (Kj/mm)	Sem Abertura	Sem Abertura
Aporte de Calor	1,051	0,63

Tabela 7 – Parâmetros de soldagem para o metal de base API 5L X60.

Parâmetros	Eletrodo Guia	Eletrodo Rebocado
Tipo de Corrente	CC <sup>+</sup>	CA
Tensão (V)	35 V	35 V
Velocidade de Soldagem	2 m/min	2 m/min
Numero de Passes	Passe Duplo	Passe Duplo
Corrente de Soldagem	1000A	600A
Diâmetro do Arame (mm)	4mm	3,2mm
Abertura da Raiz (Kj/mm)	Sem Abertura	Sem Abertura
Aporte de Calor	1,051	0,63

## 4 RESULTADOS

### 4.1 MACROGRAFIA

As Figuras 15 e 16 mostram as macrografias das juntas soldadas para o metal base ASTM A-36 e API 5L X60.



Figura 15 – Macrografia da junta solda confeccionada com o metal base ASTM A-36.



Figura 16 – Macrografia da junta solda confeccionada com o metal base API 5L X60.

#### 4.2 MICROGRAFIA

As micrografias apresentadas nas figuras abaixo, mostram para um aumento de 500X, os metais de solda para os dois diferentes tipos de juntas soldadas (Figuras 17 a 20), referenciando os microconstituintes encontrados.

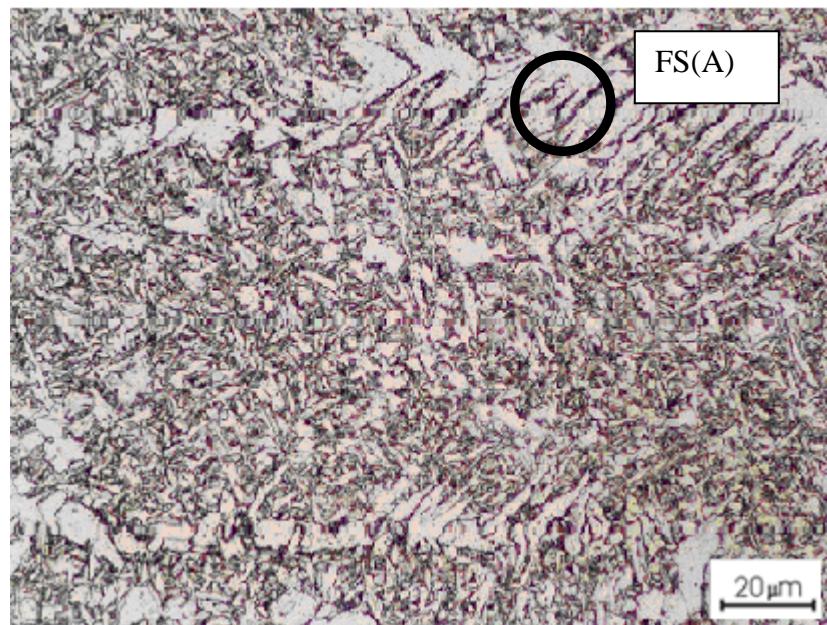


Figura 17 – Foto do primeiro passe do ASTM A-36

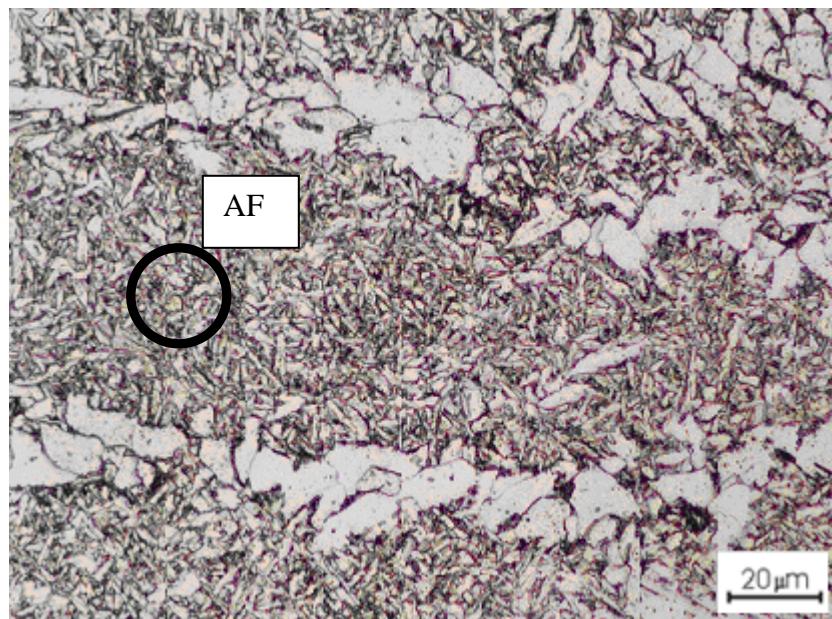


Figura 18 – Foto do segundo passe do ASTM A-36

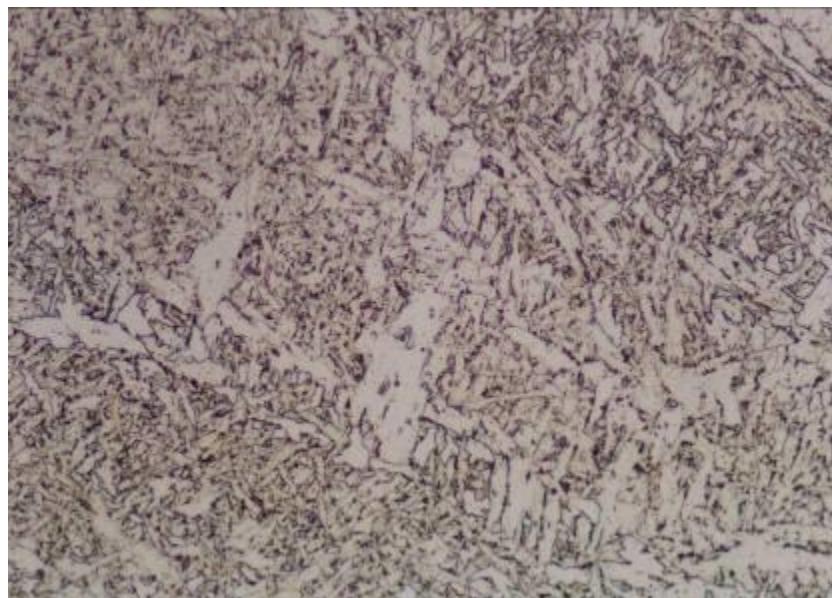


Figura 19 – Foto do primeiro passe do API 5L X60

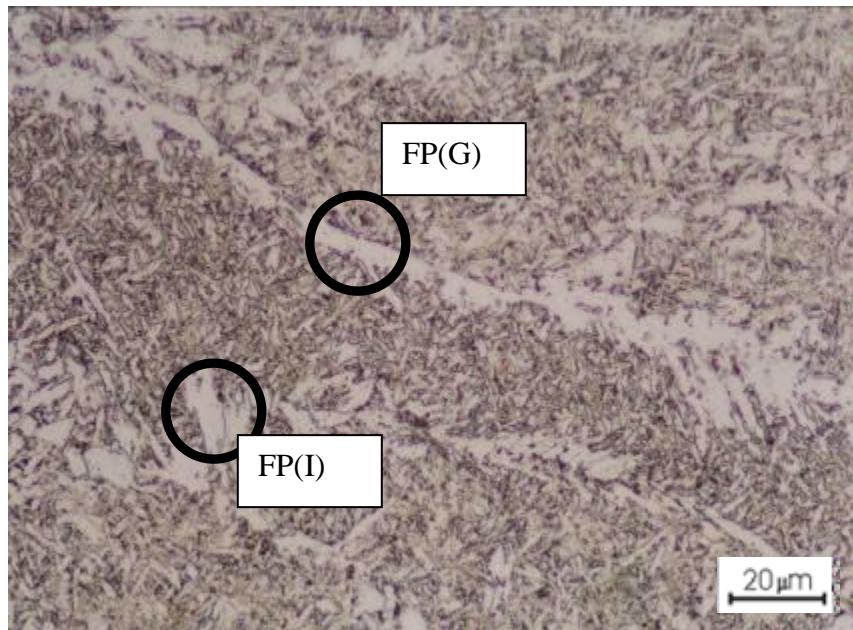


Figura 20 – Foto do segundo passe do API 5L X60

Foi realizada a contagem de fase para cada cordão, sendo divididos em primeiro cordão e segundo cordão para cada junta soldada respectivamente. Na Tabela 8 são mostrados os resultados percentuais dos microconstituintes dos metais de solda, adotando o procedimento recomendado pelo IIW (1988) para contagem de fases.

Tabela 8 – Quantificação dos microconstituintes do metal de solda

Corpo de Prova	FA [%]	FP (I) [%]	FP (G) [%]	FS (NA) [%]	FS (A) [%]
1º cordão A-36	43	33	18	2	4
2º cordão A-36	48	27	22	2	1
1º cordão API	41	36	22	0	1
2º cordão API	57	28	13	0	2

Observação: Foi encontrado uma percentagem insignificante de agregado ferrita/carboneto.

#### 4.3 ENSAIO DE DUREZA

Conforme seqüência de ensaio numerado na Figura 14 foram construídas as tabelas 9 a 10 e as Figuras 21 e 22, onde são mostrados os resultados das medidas obtidas (Dureza Vickers) nos ensaios de dureza, conforme procedimento mostrado no item 4.4. Nota-se que a media das durezas dos metais de solda são maiores do que as dos metais base.

Tabela 9 – Resultados em HV (para a carga de 1Kgf), das medidas obtidas nos ensaios de dureza para a junta soldada do aço ASTM A-36

Metal base	ZTA				Metal de solda						ZTA				Metal base
1 155	2 175,1	3 194,1	4 193,4	5 194,5	6 200	7 176,3	8 167,4	9 155,6							
10 156	11 190,5	12 199,5	13 196,2	14 202,9		15 198	16 190	17 150,3							
18 156	19 173,8	20 191,6	21 207,3	22 199,2	23 196,1	24 179,6	25 163	26 153,5							
Média 155,5	Média 187,5				Média 198,7				Média 179,5				Média 153,2		

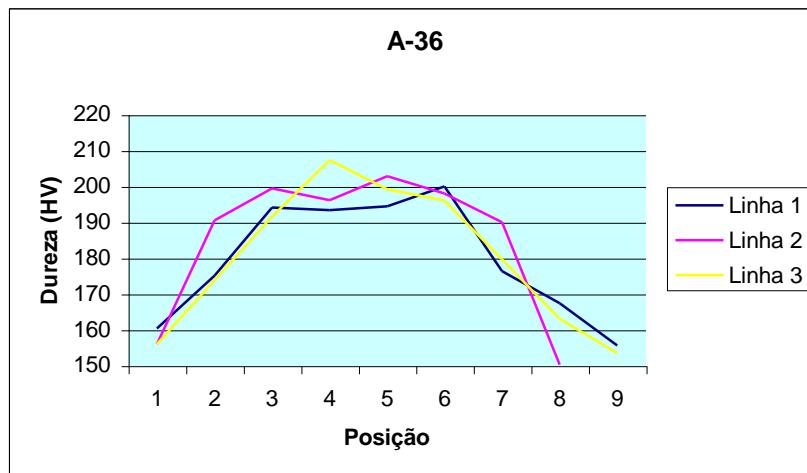


Figura 21 – Curva representativa das linhas de dureza para a junta soldada A-36

Tabela 10 – Resultados, em HV (para a carga de 1Kgf), das medidas obtidas nos ensaios de dureza para a junta soldada do aço API 5L X60

Metal base	ZTA				Metal de solda						ZTA				Metal base
1 193,52	2 190,2	3 192,8	4 202,4	5 201,3	6 196,7	7 198,3	8 188	9 181,6							
10 190,3	11 201,7	12 193,76	13 211,7	14 211		15 197,3	16 185,6	17 185							
18 185	19 194	20 192,4	21 211,94	22 186,4	23 193	24 191	25 193,3	26 178							
Média 189,6	Média 194,14				Média 201,8				Média 190,91				Média 181,53		

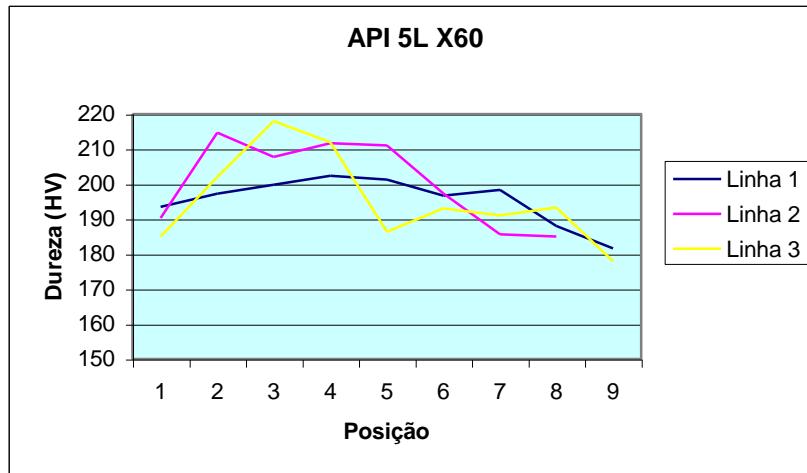


Figura 22 – Curva representativa das linhas de dureza para a junta soldada API

#### 4.4 ENSAIO DE TRAÇÃO

Resultados fornecidos pela TSA [14] de corpos de prova retirados da junta do aço API 5L X60 apresentam como resultado um limite de resistência médio ( $\sigma_r$ ) igual a 632 MPa que satisfaz a norma API. A ruptura ocorreu no metal de base.

#### 4.6 ENSAIO DE IMPACTO

Resultados fornecidos pela TSA [14] de ensaios de impacto para duas temperaturas diferentes, sendo elas  $-20^{\circ}\text{C}$  e  $-40^{\circ}\text{C}$ , são mostrados nas tabelas 11 e 12, mostram as correspondentes energias absorvidas para cada caso, que se encontram dentro do especificado pela norma.

Tabela 11 – Energia absorvida para temperatura de ensaio:  $-40^{\circ}\text{C}$ .

Temperatura de Ensaio: - 40°C		
C.P.	Energia Absorvida	
	Valores individuais (J)	Média (J)
1	110	121
2	137	
3	116	

Tabela 12 – Energia absorvida para temperatura de ensaio: - 20°C

Temperatura de Ensaio: - 20°C		
C.P.	Energia Absorvida	
	Valores individuais (J)	Média (J)
1	139	141
2	139	
3	145	

## 5. DISCUSSÕES

### 5.1 MICROGRAFIA E MICROESTRUTURA

Analizando as Figuras 17, 18, 19 e 20 podem-se observar a variação na microestrutura do metal fundido. As Figuras 17 e 18 mostram fotos da zona fundida do aço ASTM A-36 que comparado às fotos do aço API 5L X60 (Figuras 19 e 20) é notada a diferença das microestruturas, com relação ao refino das mesmas isso era de se esperar, visto que o aço API tende a apresentar características superiores as do aço ASTM A-36.

Através da micrografia, após a contagem de fase de cada cordão, para junta soldada no aço ASTM A-36 e no aço API 5L X60, e analisando os resultados percentuais dos microconstituintes dos metais de solda, observamos que no primeiro passe tem-se as mesmas características. Essa semelhança de características pode ser resultado do

passe consecutivo devido ao “tratamento térmico” após o calor gerado pelo segundo passe.

Observa-se, através da Tabela 8 que a microestrutura é basicamente formada de ferrita acicular e ferrita poligonal, sendo a quantidade de ferrita de segunda fase praticamente desprezível.

No segundo passe, o aço API 5L X60 apresentou mais volume de ferrita acicular (57%), essa característica garante ao material um aumento de tenacidade, já que em processos de solda por arco submerso a ferrita acicular é um fator fundamental para se alcançar bons níveis de tenacidade no metal depositado. Dentre os muitos constituintes microestruturais que conduzem à elevação dos níveis da tenacidade, a ferrita acicular é aquele que reconhecidamente apresenta o melhor desempenho. A sua morfologia apresenta-se como grãos colunares em malhas de finas agulhas. Tais arranjos são característicos de contornos de grãos de grande ângulo entre cristais adjacentes que, somado ao considerável refino dos seus grãos, propiciam a elevação da tenacidade devido a maior resistência a propagação de trincas intergranulares [01].

É possível que esta diferença de percentual de ferrita, no segundo passe, entre o aço API 5L X60 e o ASTM A-36 seja devido diferença da composição química do metal de base juntamente como par fluxo/metal de adição.

O segundo cordão apresentou baixos valores de ferrita primária e ferrita com segunda fase, estes baixos valores promovem uma qualidade maior do metal de solda, pois quando altos esses valores, tem-se diminuída a tenacidade do material [01].

A ferrita com segunda fase é juntamente com o carbono, o principal responsável por manifestações de envelhecimento em aços de baixo carbono. Isto resulta em maior resistência à fluência, à ruptura e em menores ductilidade e tenacidade [01].

## 5.2 DUREZA

Conforme mostrado nas Tabelas 9 e 10, verifica-se que a dureza média do metal de base está em torno de 156 HV para o ASTM A-36 e de 190 HV para o API 5LX-60, pode-se então presumir-se que há uma diferença de propriedades entre esses dois materiais como pode ser visto na correlação apresentada [11] e [13].

As figuras 21 e 22 mostram que a dureza no metal de solda do API mantiveram-se praticamente constante, em torno de 190 a 200 HV, ao contrário do que aconteceu com o A-36 que teve uma variação expressiva de sua dureza de 150 a 200 HV.

Essa maior homogeneidade do perfil de dureza leva a crer, ter sido devido a um maior refino de grão do API em relação ao A-36 e as melhores características apresentadas pelo API.

## 6. CONCLUSÕES

A microestrutura do aço ASTM A-36 é mais grosseira quando comparada com aço API 5LX-60, com isso espera-se que as propriedades do API 5LX-60 sejam melhores que as do ASTM A-36.

O perfil da microdureza do API 5LX-60 apresentou-se mais homogênea que a do ASTM A-36, vindo a confirmar as melhores propriedades do aço API 5LX-60 em relação ao aço ASTM A-36, com relação à dureza.

O aço API 5 L X60 atende a norma API 5L com respeito aos requisitos de propriedades mecânicas (limite de escoamento, limite de resistência, alongamento e energia absorvida charpy-V).

## **7. SUGESTÕES**

Sugere-se aos próximos trabalhos:

- Fazer a avaliação da tenacidade e da tração.
- Fazer a variação de insumos para verificação de novas propriedades.

## **8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- (01)** Mota, C.A.M.: Níquel e manganês como contraladores de tenacidade na soldagem com arames tubulares auto-protégidos. Tese de doutorado UFSC, 1998.
- (02)** Trindade, V.; Paulo Ferreira; Paranhos, R.; Guimarães, A.S.: Produção de tubos de aços de grandes diâmetros soldados pelo processo arco-submerso helicoidal, ABM, 2006.
- (03)** Baptista, A.L.B.; Soares, A.R.; Nascimento I.A.: Ensaio Metalográfico no Controle da Qualidade <[http://www.spectru.com.br/ensaio\\_metal.pdf](http://www.spectru.com.br/ensaio_metal.pdf)>
- (04)** Ramalho, J.P.; Jr, L.G.: Processo de Soldagem por Arco Submerso <<http://www.infosolda.com.br/download/61ddc.pdf>>
- (05)** Marques, P.V.; Modenesi, P.J.; Bracarence, A.Q.: Soldagem - Fundamentos e Tecnologia, Belo Horizonte, 2005.
- (06)** Modenesi, P.J.: Soldabilidade dos Aços Transformáveis, Belo Horizonte, março de 2004.

- (07)** Trindade, V.;Filho, J.C.P.; Paranhos, R.; Guimarães, A.S.: Estudo do tratamento térmico de normalização do metal de solda C-Mn e baixa liga, 2000
- (08)** Figueiredo, K.M.: Aplicação de ensaio de impacto Charpy instrumentado no estudo da tenacidade a fratura nas soldas a arco-submerso em aços utilizados em caldeiras, 2004
- (09)** Evans, G.M.: Effect of Carbon on the Microstructure and Properties of C-Mn All-Weld Metal Deposits, Welding Journal, pp. 313s-320s, March, 1983.
- (10)** <http://www.esab.com.br/literatura/apostilas/Apostila%20Metalurgia%20da%20Solda%20gem.pdf>
- (11)** Garcia, A.; Spim, J.A.; Santos C.A.: Ensaios dos materiais, Campinas, 1999.
- (12)** [http://www.unesp.br/propp/dir\\_proj/Industria/Industr09a.htm](http://www.unesp.br/propp/dir_proj/Industria/Industr09a.htm)
- (13)** Souza, S. A.: Ensaios Mecânicos de Materiais Metálicos – Fundamentos Teóricos e Práticos, 1982.
- (14)** Comunicação Privada