

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
PROJETO DE GRADUAÇÃO**

**AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS NA SOLDAGEM A ARCO SUBMERSO**

**AUTORES: Ednaldo Lepaus Baldan  
Marcos Caetano Melado**

**ORIENTADOR: Prof. Temístocles Souza Luz**

**VITÓRIA - ES  
Julho/2007**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
PROJETO DE GRADUAÇÃO**

**AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS NA SOLDAGEM A ARCO SUBMERSO**

Parte manuscrita do Projeto de Graduação dos alunos Ednaldo Lepaus Baldan e Marcos Caetano Melado, apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, para obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

**VITÓRIA – ES  
Julho/2007**

**EDNALDO LEPAUS BALDAN  
MARCOS CAETANO MELADO**

**AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS NA SOLDAGEM A ARCO SUBMERSO**

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

---

**Prof. Temístocles Souza Luz  
Orientador**

---

**Prof. Christian Mariani Lucas  
Examinador**

---

**Prof. Osvaldo Guilherme Cominelli  
Examinador**

**Vitória - ES, Julho de 2007.**

## AGRADECIMENTOS

A Deus

Aos nossos pais

Aos familiares e amigos

Ao prof. Temístocles de Sousa Luz

Ao C. A. Zampieri, Tec. laboratório de materiais, UFES

A todos que contribuíram para que este trabalho fosse realizado.

## RESUMO

O objetivo deste trabalho foi fazer uma análise da microestrutura e tenacidade ao impacto em juntas soldadas no processo a arco submerso, para diferentes parâmetros de soldagem no aço ASTM A-36. Com os resultados alcançados discutir a relação entre microestrutura e propriedades mecânicas para os diferentes parâmetros adotados.

Para a verificação desses efeitos foi realizada a soldagem variando os parâmetros adotados (tensão e velocidade de alimentação) e em seguida foram feitos: a macrografia, para verificar a conformidade do cordão de solda; a micrografia, para analisar a microestrutura formada e por ultimo o ensaio de Charpy para verificar a tenacidade da junta soldada. Foram obtidos diferentes tipos de microestruturas e diferentes valores de energia absorvida no ensaio Charpy para cada parâmetro adotado.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - O processo de soldagem por arco submerso (ESAB, 2004). .....	2
Figura 2 – Composição do metal de solda (ESAB, 2004). .....	7
Figura 3 – Penetração da junta (ESAB, 2004).....	8
Figura 4 – Reforço da solda (ESAB, 2004).....	8
Figura 5 – Linha de fusão (ESAB, 2004). .....	8
Figura 6 - Zona termicamente afetada (ESAB, 2004).....	8
Figura 7-Micrografia que mostra a microestrutura do metal de solda típico de um aço baixo-carbono: (A) ferrita de contorno de grão; (B) ferrita poligonal; (C) ferrita de Widmanstatten; (D) ferrita de acicular; (E) bainita superior; (F) bainita inferior (KOU, 2003). .....	12
Figura 8 - Predominância de ferrita acicular na microestrutura de uma solda de aço baixo-carbono e baixo-liga (KOU, 2003). .....	13
Figura 9 - Ferrita acicular e partículas de inclusão em uma solda de aço baixo-carbono e baixa-liga. (KOU, 2003). .....	13
Figura 10 - Exibição Esquemática do efeito de adições de liga, tempo de resfriamento de 800°C para 500°C, concentração de oxigênio na solda, e tamanho do grão da austenita (KOU, 2003).....	14
Figura 11 - Efeitos de elementos de ligas, tamanho de grão, e oxigênio em CCT no metal de solda de um aço baixo-carbono (KOU, 2003).....	15
Figura 12 - Energia absorvida em função da fração de volume de ferrita acicular em soldas a arco submerso (KOU, 2003). .....	15
Figura 13 – Equipamentos para soldagem. ....	17
Figura 14 - Plaina Rocco Junior 650 .....	18
Figura 15 – Microscópio óptico.....	18
Figura 16 - Serra Circular ERGOP .....	19
Figura 17 - junta de topo com chanfro em V (INFOSOLDA, 2006).....	19
Figura 18 – Dispositivo de fixação do corpo de prova. ....	20
Figura 19- Vista frontal do corpo de prova – Posição de soldagem. ....	21
Figura 20 - Relação entre a corrente de soldagem (CA) e a taxa de fusão (ESAB, 2004). .....	22
Figura 21 – Padronização do corpo de prova – Charpy (ASTM E23).....	25
Figura 22 – Soldagem numa junta de topo com chanfro em X.....	26

Figura 23 – Soldagem numa junta de topo com chanfro em V – Parâmetros inadequados.....	26
Figura 24 - Soldagem numa junta de topo com chanfro em V – Parâmetros adequados.....	26
Figura 25 - Macrografia do corpo-de-prova 1. ....	27
Figura 26 - Macrografia do corpo-de-prova 2. ....	27
Figura 27 – Macrografia do corpo-de-prova 3. ....	28
Figura 28 – Macrografia do corpo-de-prova 4. ....	28
Figura 29 – Zona fundida do corpo-de-prova 1 ( aumento de 500x). ....	29
Figura 30 – Zona fundida do corpo-de-prova 2 ( aumento de 500x). ....	29
Figura 31 – Zona fundida do corpo-de-prova 3 ( aumento de 500x). ....	30
Figura 32 – Zona fundida do corpo-de-prova 4 (aumento de 500x). ....	30

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Defeitos na soldagem e suas causas (ASM HANDBOOK).....	9
Tabela 2 - Composição química (Norma ASTM). ....	10
Tabela 3 – Propriedades Mecânicas (Norma ASTM). ....	10
Tabela 4 - Influência dos principais elementos de liga no aço carbono (Assumpção, 2006). ....	10
Tabela 5 - Composição química (ESAB, 2004). ....	16
Tabela 6 - Propriedades mecânicas (ESAB, 2004). ....	16
Tabela 7 - Dados do gráfico da Figura 20. ....	22
Tabela 8 – Parâmetros da soldagem.....	23
Tabela 9 – Parâmetros da soldagem.....	24
Tabela 10 - Resultados do ensaio Charpy em (KPM). ....	31
Tabela 11 - Resultados do ensaio Charpy (J). ....	31
Tabela 12 – Comparação da energia absorvida.....	31



## ÍNDICE

<b>AGRADECIMENTOS .....</b>	<b>IV</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>V</b>
<b>LISTA DE FIGURAS .....</b>	<b>VI</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>VIII</b>
<b>ÍNDICE.....</b>	<b>IX</b>
<b>CAPÍTULO I .....</b>	<b>1</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO II.....</b>	<b>2</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>2</b>
2.1 Descrição geral da soldagem a arco-submerso .....	2
2.1.1 Características do processo.....	2
2.1.2 Seqüência do processo .....	3
2.2 Variáveis controláveis durante a soldagem .....	3
2.2.1 Corrente de soldagem: .....	3
2.2.2 Tensão do arco: .....	4
2.2.3 Velocidade de soldagem:.....	4
2.2.4 Largura e altura da camada de fluxo: .....	5
2.2.5 Ajuste mecânico.....	5
2.3 Seleção do fluxo e arame.....	6
2.3.1 Tipos e características dos fluxos: .....	6
2.3.2 Fatores influenciam a escolha do fluxo: .....	6
2.3.3 Escolha do arame .....	7
2.4 Projeto e preparação da junta .....	7
2.4.1 Definição de termos .....	8
2.5 Variantes do processo.....	9
2.6 Defeitos na soldagem e suas causas.....	9
2.7 Classificação e composição química do aço ASTM A-36 .....	10
2.8 Efeitos dos elementos de liga .....	10
2.9 Microestrutura .....	11
2.9.1 Desenvolvimento de microestrutura.....	11
2.9.2 Fatores que afetam a microestrutura .....	14
2.9.3 Dureza de um metal de solda. ....	15

<b>CAPÍTULO III.....</b>	<b>16</b>
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>16</b>
3.1 Metal Base .....	16
3.2 Arame.....	16
3.3 Fluxo .....	16
3.4 Equipamentos usados para Soldagem.....	17
3.5 Equipamento para Plainar .....	17
3.6 Equipamento para Metalografia .....	18
3.7 Equipamento para corte .....	18
3.8 Metodologia.....	19
3.8.1 Obtenção do chanfro .....	19
3.8.2 Soldagem.....	20
3.8.3 Comparação entre as energias de soldagem (H). .....	24
3.9 Metalografia .....	25
3.9.1 Macrografia .....	25
3.9.2 Micrografia .....	25
3.10 Ensaio Charpy.....	25
<b>CAPÍTULO IV .....</b>	<b>26</b>
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>26</b>
4.1 Soldagem .....	26
4.1.1 Discussão sobre os parâmetros adotados. ....	27
4.2 Macrografia .....	27
4.3 Micrografia .....	28
4.4 Ensaio Charpy.....	31
<b>CAPÍTULO V .....</b>	<b>32</b>
<b>5 CONCLUSÕES.....</b>	<b>32</b>
<b>CAPÍTULO VI .....</b>	<b>33</b>
<b>6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>33</b>

## **CAPÍTULO I**

### **1 INTRODUÇÃO**

A soldagem de arco submerso é usada em uma larga faixa de aplicações industriais. Soldas de alta qualidade, alta taxas de deposição, penetração profunda e adaptação à automação tornam o processo adequado para a fabricação em larga escala, encontrando grande aplicação em estaleiros, caldeiraria de médio e grande porte, mineradoras, siderúrgicas, fábricas de perfis e estruturas metálicas etc., sendo usado na fabricação de navios e barcos, vagões, tubos no revestimento ou recuperação de peças que necessitam de ligas com necessidade específicas como resistência ao desgaste abrasivo e tenacidade, entre outras.

O processo é usado para soldar peças com espessura a partir de 1,5 mm até chapa de 300 mm de espessura, porém não é aplicável para todos os metais e ligas. Ele é largamente usado em aço carbono, aços estruturais de baixa liga, aços inoxidáveis e ainda alguns aços estruturais de alta resistência, aços de alto carbono e ligas de níquel.

As composições de ligas que podem ser soldadas por arco submerso têm se expandido com a crescente disponibilidade de eletrodos e fluxos (MODENESI, 2005).

Com base destas informações, adotamos o processo a arco submerso com o objetivo de estudar o efeito da variação de parâmetros da soldagem na formação da microestrutura do metal usado e influência na tenacidade ao impacto.

As etapas do projeto constituem de: soldagem dos corpos de prova, seguida da metalografia (macrografia e micrografia) para análise das microestruturas formadas e por ultimo o ensaio Charpy, para compararmos a tenacidade ao impacto de cada corpo de prova soldados com diferentes parâmetros.

## CAPÍTULO II

### 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1 Descrição geral da soldagem a arco-submerso

##### 2.1.1 Características do processo

A Soldagem ao Arco Submerso (Submerged Arc Welding, SAW) é um processo no qual a coalescência dos metais é produzida pelo aquecimento destes com um arco estabelecido entre um eletrodo metálico contínuo e a peça. O arco é protegido por uma camada de material fusível granulado (fluxo) que é colocado sobre a peça enquanto o eletrodo, na forma de arame, é alimentado continuamente. O fluxo na região próxima ao arco é fundido, protegendo o arco e a poça de fusão e formando, posteriormente, uma camada sólida de escória sobre o cordão. Este material pode também ajudar a estabilizar o arco e desempenhar uma função purificadora sobre o metal fundido. Como o arco ocorre sob a camada de fluxo, ele não é visível, daí o nome do processo. A Figura 1 ilustra o processo. (MODENESI, 2006).

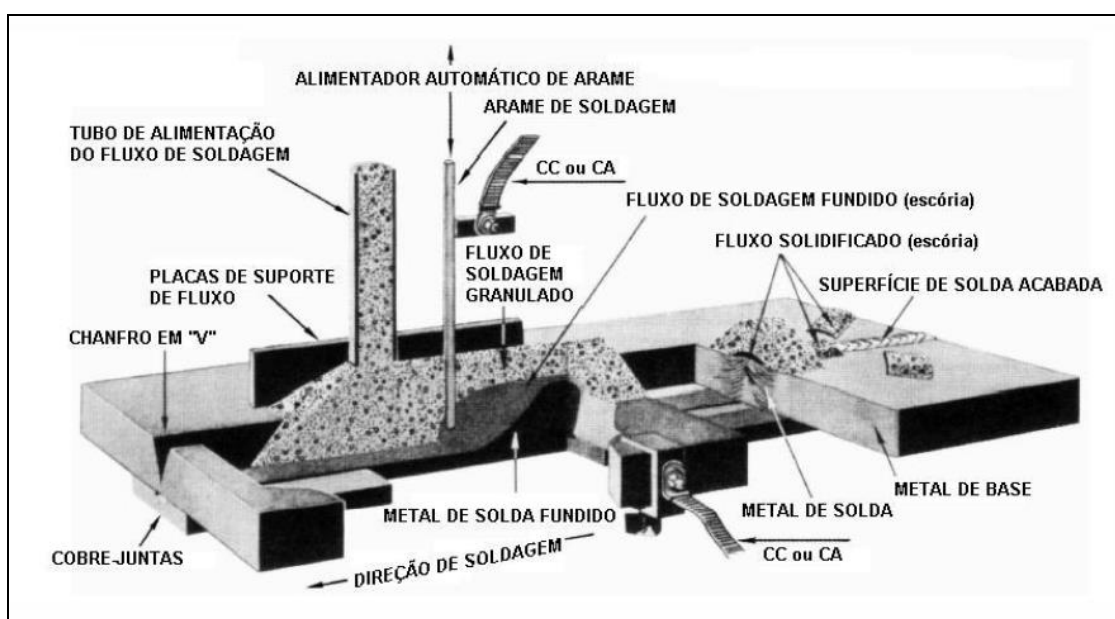


Figura 1 - O processo de soldagem por arco submerso (ESAB, 2004).

Dentre as vantagens deste processo destacam-se elevada velocidade de soldagem, maiores taxas de deposição, boa integridade do metal de solda, processo de fácil uso e melhor ambiente de trabalho e maior segurança para o operador. Por outro lado o processo é limitado às posições de soldagem plana e horizontal com pequeno ângulo (MODENESI, 2006).

### 2.1.2 Seqüência do processo

Primeiramente um arco elétrico é estabelecido entre o arame e a peça, em seguida temos a alimentação do arame através de um dispositivo de alimentação, depois o carro inicia seu deslocamento ao longo do cordão de solda (manual ou automaticamente). Durante esse deslocamento um fluxo para soldagem por arco submerso é alimentado através do tubo do silo e distribui-se continuamente sobre o cordão de solda por uma pequena distância à frente da região de soldagem protegendo completamente a região de soldagem do contato com a atmosfera.

O calor gerado pela passagem da corrente através da zona de soldagem funde a extremidade do arame e as bordas adjacentes das peças de trabalho, criando uma poça de metal fundido. A escória ou quaisquer bolhas de gás são prontamente varridas para a superfície devido à poça está em um estado líquido bem fluido e turbulento. Uma pequena quantidade de fluxo se funde cobrindo completamente a superfície da solda, dissolvendo e eliminando as impurezas que se separam do metal fundido e flutuam em sua superfície e também pode ser o agente de adição de certos elementos de liga. A combinação de todos esses fatores resulta em uma solda íntegra, limpa e homogênea. 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.

## 2.2 Variáveis controláveis durante a soldagem

As variáveis na soldagem por arco submerso influenciam diretamente na qualidade da solda. As variáveis, na ordem de importância, são:

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

### 2.2.1 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 de metal de 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 de 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 (ASM HANDBOOK).

### 2.2.2 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.

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 (ASM HANDBOOK).

### 2.2.3 Velocidade de soldagem:

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

a) 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.

b) 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 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 certo valor, a penetração aumentará porque o arame de solda estará à frente da poça de fusão (ASM HANDBOOK).

#### 2.2.4 Largura e altura da camada de fluxo:

A largura e a altura da camada de fluxo granulado influenciam na aparência e na 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.

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 que não ocorra mais centelhamento. Os gases serão liberados sem turbulência em torno do arame de solda, algumas vezes havendo queima deles.

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 (ASM HANDBOOK).

#### 2.2.5 Ajuste mecânico

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.

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 conseqüentemente em uma solda perdida (ASM HANDBOOK).

## 2.3 Seleção do fluxo e arame

### 2.3.1 Tipos e características dos fluxos:

#### a) Fluxos Fundidos

- Não são higroscópicos;
- Metal de solda com baixo teor de hidrogênio;
- Boa homogeneidade química;
- Podem ser utilizados com baixas velocidades de soldagem;
- Permitem a retirada de finos sem afetar a composição química e a granulometria;
- Não permitem a adição de compostos desoxidantes durante a sua fabricação.

#### b) Fluxos Aglomerados

- Baixa temperatura de fabricação;
- Altamente higroscópicos;
- Exige cuidados na armazenagem e ressecagem;
- Possibilidade de segregação de compostos;
- Podem-se adicionar desoxidantes e elementos de liga;
- Os finos não podem ser retirados sem causar variações na composição química do fluxo.

#### c) Fluxos Sinterizados

- Semelhante aos aglomerados;
- Adição de um aglomerante cerâmico;
- Após a pelletização o fluxo é sinterizado a 1400 °C;
- Limitação do uso de desoxidantes.

### 2.3.2 Fatores influenciam a escolha do fluxo:

Os fatores que influenciam a escolha do fluxo são:

- Características de desempenho;
- Propriedades mecânicas.



Para muitas soldas, as características de desempenho ditam que fluxos podem ser empregados. As características de desempenho incluem facilidade de remoção da escória, capacidade de remoção de óxidos e carepa, capacidade de condução de corrente elétrica, possibilidade de uso de vários arames e possibilidade de aplicação de corrente alternada.

Os fluxos para soldagem por arco submerso são escolhidos para satisfazer aos requisitos de propriedades mecânicas em conjunto com um arame particular e também para atender às necessidades de desempenho de cada aplicação (ESAB, 2004).

### 2.3.3 Escolha do arame

Arares para soldagem por arco submerso são escolhidos por sua influência nas propriedades mecânicas e/ou na composição química requerida para o metal de solda.

As propriedades mecânicas e químicas de uma solda por arco submerso são determinadas principalmente por quatro fatores: A composição do metal de base, a composição do arame empregado, o fluxo empregado e as condições de soldagem. A composição do metal de base é o fator mais importante em quatro a cinco passes, já que a razão entre o metal de base fundido e o metal de adição pode ser tão alta como 2:1 (veja a Figura 2). Na maioria dos outros processos de soldagem por fusão, os procedimentos de soldagem multipasse devem ser empregados, minimizando a influência da composição química do metal de base (ESAB, 2004).

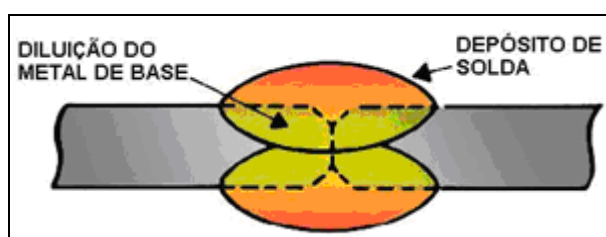


Figura 2 – Composição do metal de solda (ESAB, 2004).

## 2.4 Projeto e preparação da junta

O projeto e a preparação da junta são dois dos fatores mais importantes na execução de uma solda por arco submerso. Para usufruir totalmente das vantagens da soldagem por arco submerso, a junta deve ser adequadamente projetada e preparada e deve estar razoavelmente uniforme ao longo dos cordões de solda. Caso contrário, o operador de solda terá que fazer tentativas para compensar as irregularidades. O tempo despendido na preparação adequada da junta é mais que compensado pelas maiores velocidades de soldagem e soldas de melhor qualidade (ESAB, 2004).

### 2.4.1 Definição de termos

a) Penetração da junta: é a profundidade de fusão medida da superfície original do metal de base (veja a Figura 3). É algumas vezes expressa como um percentual da espessura da junta.

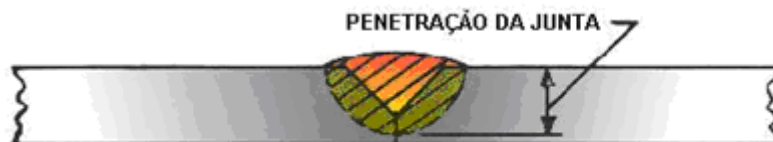


Figura 3 – Penetração da junta (ESAB, 2004).

b) Reforço da solda: é o metal de solda excedendo a quantidade necessária para o preenchimento da junta soldada (veja a Figura 4).

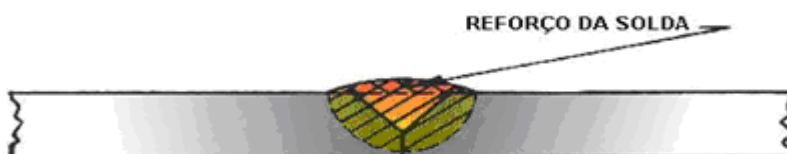


Figura 4 – Reforço da solda (ESAB, 2004).

c) Linha de fusão: é a junção do metal de solda com o metal de base (Figura 5).

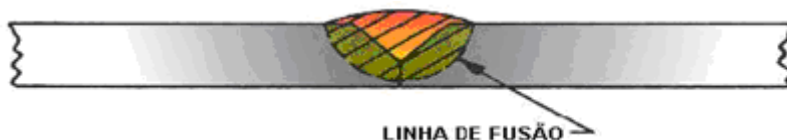


Figura 5 – Linha de fusão (ESAB, 2004).

d) Zona termicamente afetada: é uma parte do metal de base adjacente à solda que não foi fundido, porém teve sua microestrutura ou suas propriedades mecânicas alteradas devido ao calor (veja a Figura 6).



Figura 6 - Zona termicamente afetada (ESAB, 2004).

## 2.5 Variantes do processo

A soldagem por arco submerso leva a uma ampla variedade de combinações de arame e fluxo, a arranjos de um e de vários arames e ao uso de fontes de soldagem CC ou CA. O processo tem sido adaptado a uma gama de materiais e espessuras. Várias configurações de arcos múltiplos podem ser empregadas para controlar o perfil do cordão de solda e aumentar as taxas de deposição em relação à soldagem com um único arame. Os depósitos de solda podem variar desde cordões largos com pouca penetração para revestimentos até cordões estreitos com penetração profunda para juntas espessas. Parte dessa versatilidade provém do emprego de CA.

Os princípios que favorecem o uso de CA para minimizar o sopro magnético na soldagem com um único arame são freqüentemente aplicados na soldagem com arcos múltiplos para criar uma deflexão favorável do arco. A corrente que flui nos eletrodos adjacentes gera campos magnéticos interativos que podem tanto aumentar quanto diminuir um ao outro. No espaço entre os arcos, esses campos magnéticos são usados para produzir forças que irão defletir os arcos (e, portanto, distribuir o calor) nas direções benéficas à aplicação de soldagem pretendida (ESAB, 2004).

## 2.6 Defeitos na soldagem e suas causas

Os principais defeitos na soldagem e suas causas estão listados na Tabela 1.

Tabela 1 – Defeitos na soldagem e suas causas (ASM HANDBOOK).

DEFEITO	CAUSAS
Raiz perfurada	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Corrente muito alta;</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> </ul>
Mordedura	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Velocidade de soldagem muito alta;</li> <li>• Alinhamento do arame inadequado;</li> <li>• Tensão alta</li> </ul>
Vazios e trincas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Resfriamento inadequado;</li> <li>• Velocidade de soldagem muito alta;</li> <li>• Arame inadequado</li> </ul>

## 2.7 Classificação e composição química do aço ASTM A-36

São aços para aplicação em componentes onde as propriedades são bem definidas para permitirem sua utilização em projetos que exigem dobramento e boa soldabilidade. A Tabela 2 e 3 mostram, respectivamente, a composição química e as propriedades mecânicas.

Tabela 2 - Composição química (Norma ASTM).

Elemento	%
<b>C</b> (máximo)	0,25
<b>Mn</b>	0,80 -1,20
<b>P</b> (máximo)	0,040
<b>S</b> (máximo)	0,050
<b>Si</b>	0,40

Tabela 3 – Propriedades Mecânicas (Norma ASTM).

<b>Limite de escoamento mínimo</b>	250 MPa
<b>Limite de resistência</b>	400/550 MPa
<b>Alongamento mínimo</b>	
L <sub>0</sub> = 50 mm	21%
L <sub>0</sub> = 200 mm	18%

## 2.8 Efeitos dos elementos de liga

O fator mais importante na determinação das propriedades de certo tipo de aço é a composição química. Nos aços carbonos comuns, os elementos Carbono e Manganês têm influência no controle da resistência, ductilidade e soldabilidade. A Tabela 4 mostra algumas influências dos principais elementos de liga no aço carbono (Assumpção, 2006).

Tabela 4 - Influência dos principais elementos de liga no aço carbono (Assumpção, 2006).

Elemento	C	Mn	Si
Solução sólida	Sim	sim	Sim
Formando carbonetos	Sim	não	Não
Tamanho de grão	-	Aumenta	Aumenta
Temperatura de transformação A1	-	diminui	Aumenta
Tenacidade	diminui	aumenta	Aumenta
Resistência à tração	aumenta	aumenta	Aumenta
Soldabilidade	diminui	diminui	Diminui

Além dos elementos de liga outros fatores afetam as propriedades mecânicas dos aços, tais como o histórico termomecânico do material que diz respeito aos processos térmicos e cargas sofridas durante fabricação, a geometria, temperatura, estados de tensões e velocidade de deformação da estrutura (Assumpção, 2006).

## **2.9 Microestrutura**

### **2.9.1 Desenvolvimento de microestrutura.**

As dendritas ou células do metal de solda nem sempre são discerníveis. Primeiro a microsegregação, especialmente segregação de soluto, na região interdendrítica ou intercelular, resultante no metal de solda pode ser muito pequena para tirar a dendrita ou estrutura celular do interior do grão embora a própria estrutura de grão ainda possa estar muito clara. Segundo, se a difusão do estado sólido acontecer rapidamente, a microsegregação ou é pequena ou é homogeneizada rapidamente, e as dendritas ou células resultantes no metal de solda podem estar obscuro. Terceiro, se ocorrer transformações de fase após a solidificação, elas podem produzir novas microestruturas no interior do grão e ou ao longo do contorno de grão e o subgrãos resultantes na estrutura do metal de solda pode ser obscurecido (KOU, 2003).

Para temperaturas mais baixas a mobilidade da frente de crescimento da ferrita de contorno de grão diminui e forma-se a ferrita de Widmanstätten. Essas podem crescer mais rapidamente, porque carbono é empurrado aos lados das pontas crescentes. Átomos substitucionais não difundem durante o crescimento da ferrita de Widmanstätten. Para temperaturas mais baixa não há tempo suficiente para a ferrita de Widmanstätten crescer ao interior do grão. Então forma-se outro tipo de ferrita, denominada ferrita acicular, com uma característica de textura de cesta. A Figura 7 mostra a microestrutura do metal de solda de um aço baixo-carbono e baixa-liga. A Figura 7a mostra a presença de: ferrita de contorno de grão (A); ferrita poligonal (B); ferrita de Widmanstätten (C); ferrita de acicular (D). Na Figura 7b mostra a presença de: bainita superior (E); (F) bainita inferior (F).

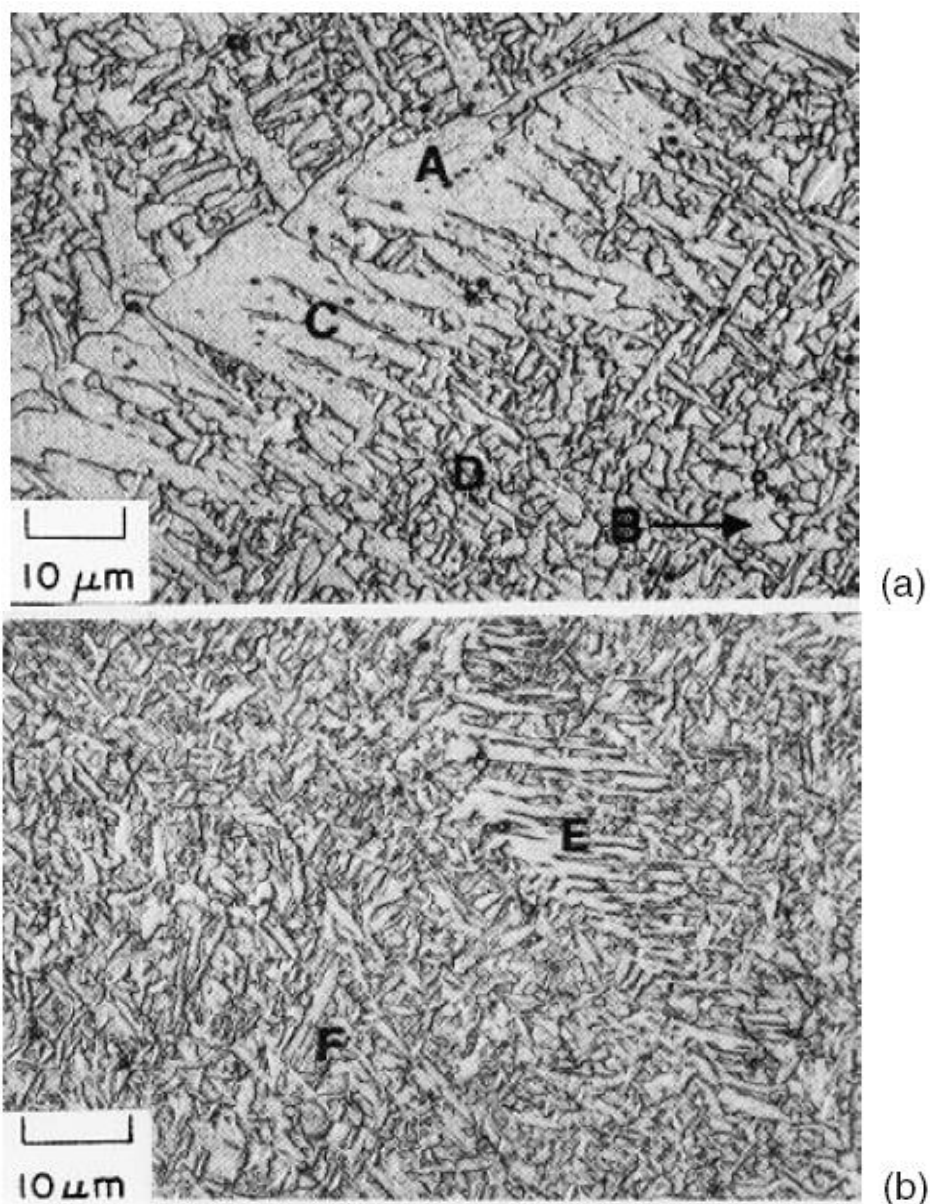


Figura 7-Micrografia que mostra a microestrutura do metal de solda típico de um aço baixo-carbono: (A) ferrita de contorno de grão; (B) ferrita poligonal; (C) ferrita de Widmanstatten; (D) ferrita de acicular; (E) bainita superior; (F) bainita inferior (KOU, 2003).

A microestrutura da solda de um aço baixo-carbono que apresenta, predominantemente, ferrita acicular é mostrada em Figura 8 e em uma ampliação maior na Figura 9. As partículas escuras são inclusões (KOU, 2003).

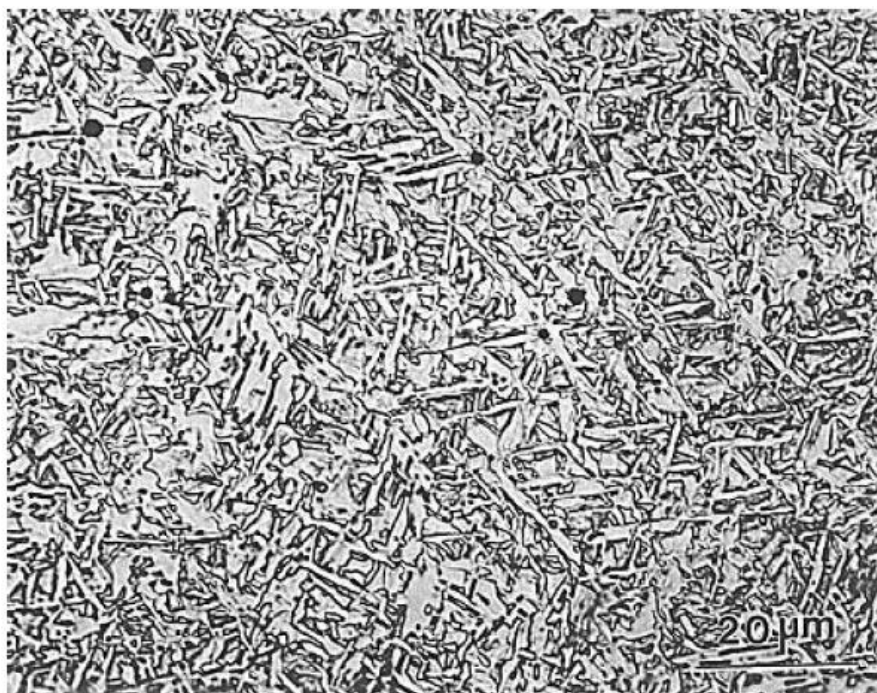


Figura 8 - Predominância de ferrita acicular na microestrutura de uma solda de aço baixo-carbono e baixo-liga (KOU, 2003).

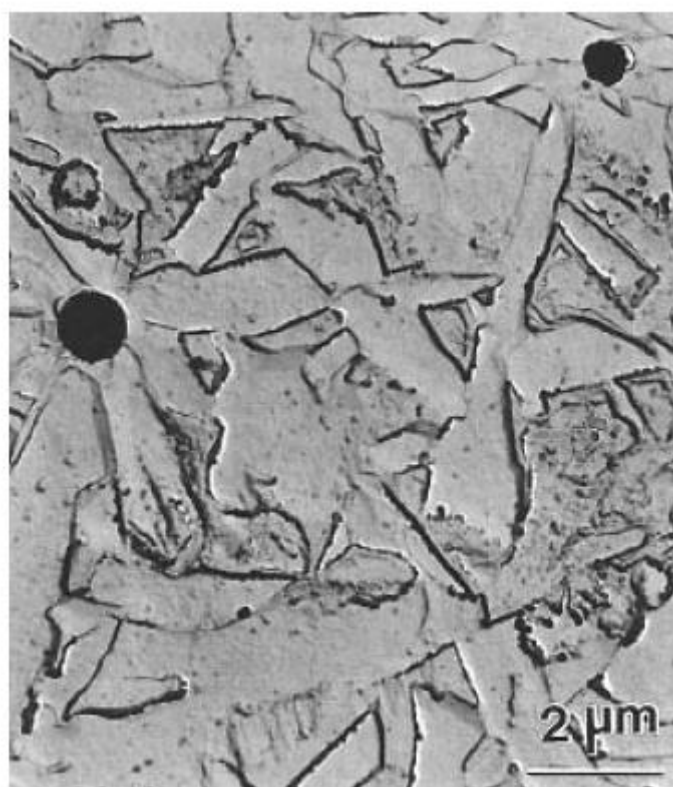


Figura 9 - Ferrita acicular e partículas de inclusão em uma solda de aço baixo-carbono e baixa-liga. (KOU, 2003).

## 2.9.2 Fatores que afetam a microestrutura

A Figura 10 mostra o efeito de vários fatores no desenvolvimento de microestrutura do metal de solda: a composição do metal de solda, o tempo de resfriamento de 800 a 500°C ( $\Delta t_{8-5}$ ), a concentração de oxigênio no metal de solda, e o tamanho de grão da austenita. As setas verticais indicam as direções nas quais estes fatores aumentam em força. Isto será explicado com ajuda de curvas de CCT (KOU, 2003).

A – tempo de resfriamento - Considerando o CCT esquerdo na curva (linhas quebradas) na Figura 11, com a redução da velocidade de resfriamento ( $\Delta t_{8-5}$  aumenta) da curva 1 para a curva 2 e curva 3, o produto de transformação pode mudar da predominância de bainita (Figura 10c), para predominância de ferrita acicular (Figura 10b) e para a predominância de ferrita de contorno de grão e ferrita de Widmanstätten (Figura 10a).

B - Adição de elementos de liga - A adição de elemento de liga (com alta capacidade de endurecimento) trocará as curvas de CCT para tempos mais longos e temperaturas mais baixas. Considere agora a curva de resfriamento 3 na Figura 11. O produto de transformação pode mudar da predominância de ferrita de contorno de grão e ferrita de Widmanstätten (na curva CCT da esquerda) para predominância de ferrita acicular (na curva CCT do meio) e para predominância de bainita (na curva CCT da direita). Isto está mostrado na Figura 10.

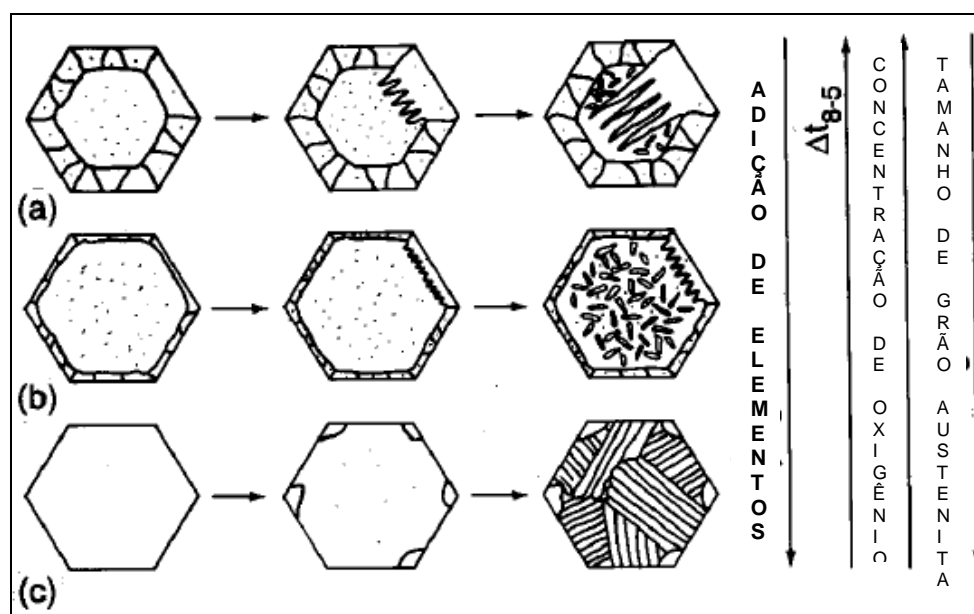


Figura 10 - Exibição Esquemática do efeito de adições de liga, tempo de resfriamento de 800°C para 500°C, concentração de oxigênio na solda, e tamanho do grão da austenita (KOU, 2003).



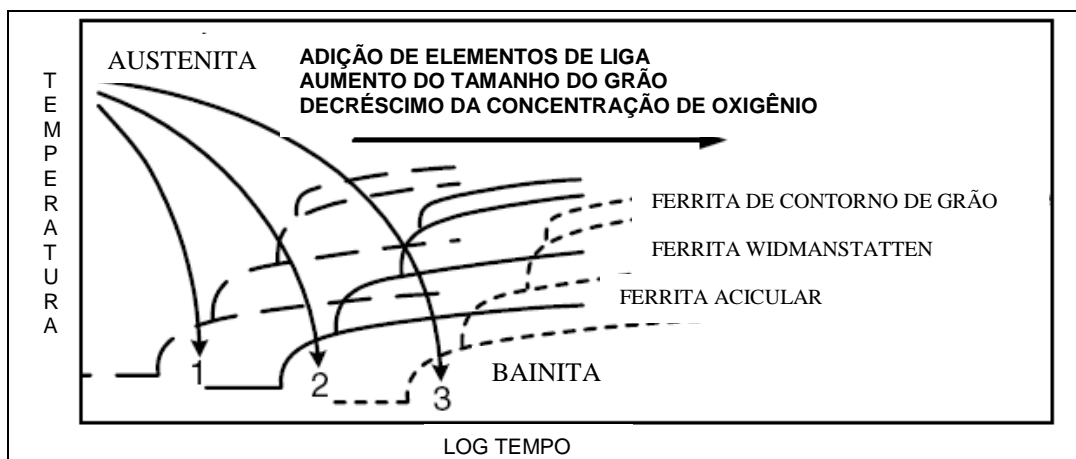


Figura 11 - Efeitos de elementos de ligas, tamanho de grão, e oxigênio em CCT no metal de solda de um aço baixo-carbono (KOU, 2003).

C - Tamanho do Grão: Semelhante ao efeito da adição de elemento de liga, ou seja, um aumento no tamanho do grão da austenita (menor a área de contorno de grão para a nucleação da ferrita) também vai mudar as curvas de resfriamento CCT para tempos mais longos e mais temperaturas baixas.

D - Concentração de oxigênio no metal de solda: Para menores concentrações de oxigênio no metal de solda, as curvas de resfriamento CCT serão deslocadas para tempos mais longos e temperaturas mais baixas, que serão favoráveis para a nucleação da ferrita acicular.

### 2.9.3 Dureza de um metal de solda.

A ferrita acicular é desejável porque melhora a resistência ao impacto de um metal de solda. Como mostrado na Figura 12, observou-se que a resistência ao impacto aumenta com a maior quantidade de ferrita acicular no metal de solda (KOU, 2003).

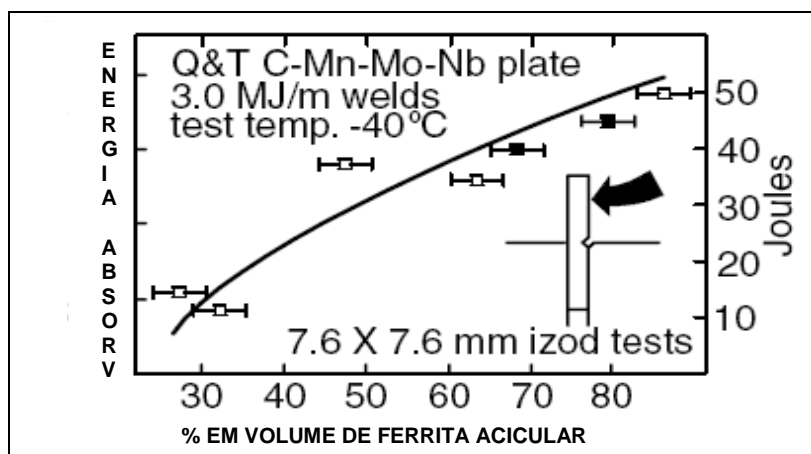


Figura 12 - Energia absorvida em função da fração de volume de ferrita acicular em soldas a arco submerso (KOU, 2003).

## CAPÍTULO III

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Metal Base

Foram utilizados 8 corpos-de-prova de aço ASTM A-36 nas dimensões 12,7mm x 50mm x 200mm, soldados dois a dois.

#### 3.2 Arame

O arame utilizado foi da classe ASME SFA-5.17 F7A0-EM12K (F48A2-EM12K). As Tabelas 5 e 6 mostram, respectivamente, a composição química e propriedades mecânicas do arame.

Tabela 5 - Composição química (ESAB, 2004).

<b>Composição química</b>	
<b>C</b>	0,08
<b>%Si</b>	1,08
<b>%Mg</b>	1,65
<b>%Cu</b>	0,10

Tabela 6 - Propriedades mecânicas (ESAB, 2004).

<b>Propriedades Mecânicas</b>	
<b>Limite de resistência</b>	635 MPa
<b>Limite de escoamento</b>	560 MPa
<b>Alongamento</b>	27%
<b>Ch V (-18° C)</b>	32 J

#### 3.3 Fluxo

O fluxo utilizado foi da classe ASME SFA-5.17 F7AZ-EL12 (F48AZ-EL12), classificado como um fluxo aglomerado ativo, ácido, de grande versatilidade. Aplicável em velocidade de soldagem elevada, CC+ / CA. Destaca-se por sua excelente remoção de escória e ótima aparência do cordão de solda. Aplicável em construções gerais, tubulações, perfis e rodas. Em soldas multipasses é possível o aumento dos teores de Si e Mn do metal de solda; recomenda-se uma espessura máxima da chapa a ser soldada de 25 mm (ESAB, 2004).

### 3.4 Equipamentos usados para Soldagem

- Máquina de soldagem Universal (Inversal 600) (Figura 13) - Laboratório de Soldagem – UFES – Responsável por fornecer corrente do processo. Capacidade de 600 A.
- Cabeçote de soldagem mecanizada (Figura 13) – Laboratório de Soldagem - UFES Consiste de um carro acionado por um motor elétrico, com velocidade estável que se desloca sobre um trilho colocado sobre a peça ou um outro suporte. Nelas são montados o alimentador de arame, Silo de fluxo, e a tocha de soldagem.
- Controlador Tartilope V2 (Figura 13). Laboratório de Soldagem - UFES. Permite o ajuste dos diversos parâmetros de operação como velocidade de alimentação do arame, velocidade de soldagem e tensão de soldagem.

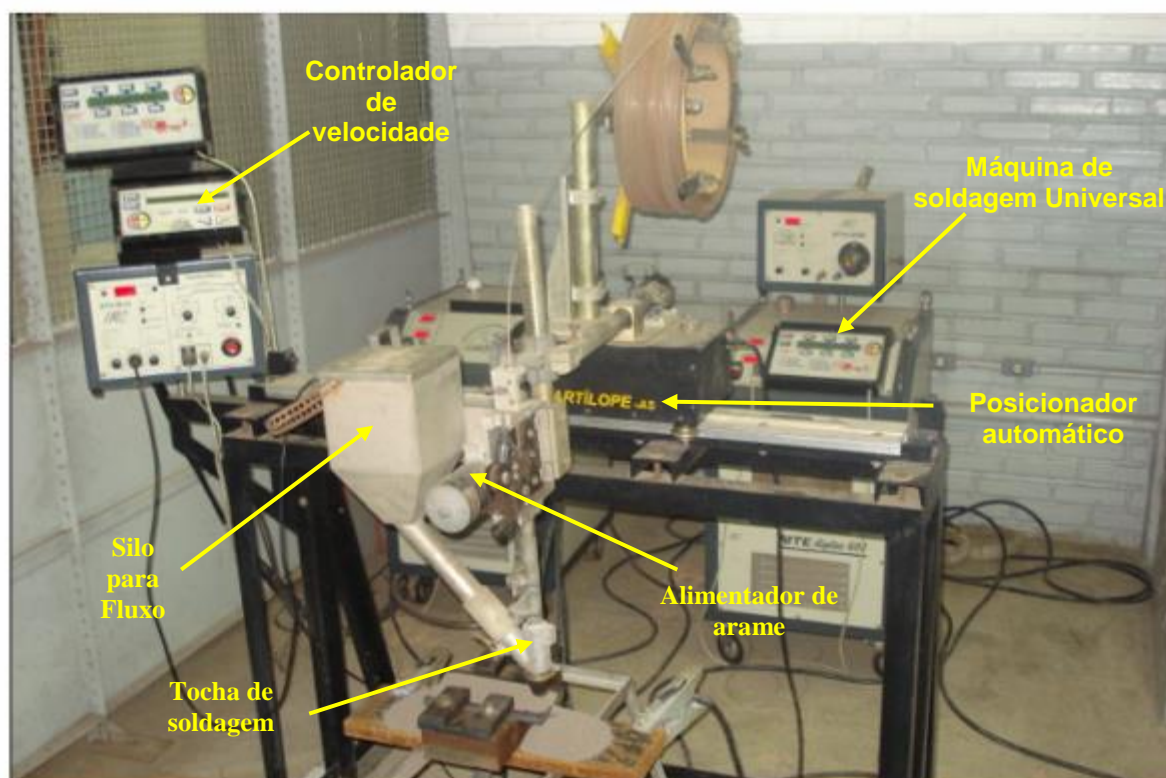


Figura 13 – Equipamentos para soldagem.

### 3.5 Equipamento para Plainar

- Plaina Rocco Junior 650 - Laboratório de Mecânica – UFES. Figura 14. Utilizada para usinagem dos corpos de prova.



Figura 14 - Plana Rocco Junior 650

### 3.6 Equipamento para Metalografia

- Microscópio Óptico OLIMPUS modelo BX 60M. Laboratório de materiais – UFES. (Figura 15). Utilizados na análise de microestruturas, com capacidade de aumento de até 1000 vezes.



Figura 15 – Microscópio óptico.

### 3.7 Equipamento para corte

- Serra Circular ERGOP. Laboratório de Mecânica – UFES. Figura 16. Usado para cortar os corpos de prova para análise de macrografia.



Figura 16 - Serra Circular ERGOP

### 3.8 Metodologia

Os ensaios foram realizados obedecendo a seguinte ordem: Usinagem do material para a obtenção do chanfro, soldagem, metalografia, padronização dos corpos para o ensaio e a aplicação do teste de Charpy.

#### 3.8.1 Obtenção do chanfro

Tomando com referência o catálogo de tipos de chanfros para juntas soldadas (INFOSOLDA, 2006), a junta adequada para soldagem desse corpo de prova é a junta de topo com chanfro em V (Figura 17) e a usinagem do material foi obtido através do processo de plainamento.

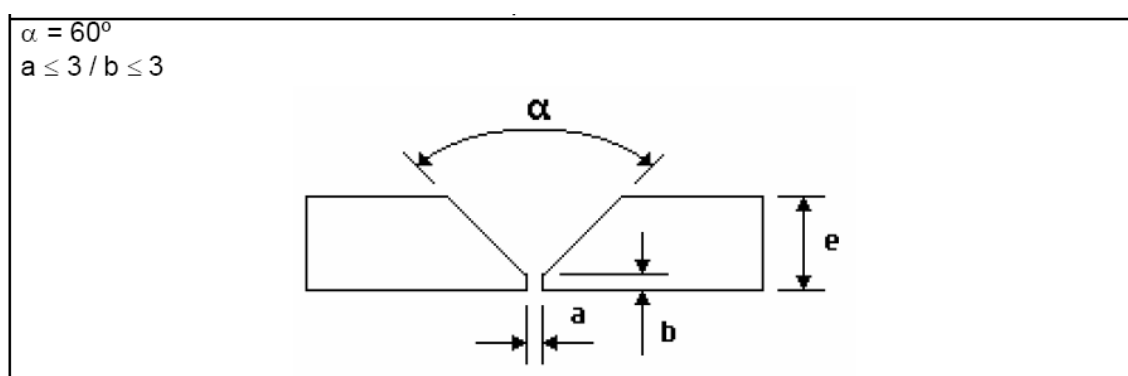


Figura 17 - junta de topo com chanfro em V (INFOSOLDA, 2006).

### 3.8.2 Soldagem

A soldagem foi realizada com o processo arco submerso, em dois passes. Os corpos de prova foram colocados em um dispositivo de fixação (Figura 18), desenvolvido para manter o alinhamento durante a soldagem e evitar que o calor transferido durante o processo cause o empenamento do corpo de prova. Foram utilizando os seguintes parâmetros:

- Distância entre bico de contato e a peça ( $Dbp$ ) = 25 mm – constante para todos os ensaios;
- Tensão = 25 V e 30 V;
- Velocidade de alimentação.



Figura 18 – Dispositivo de fixação do corpo de prova.

#### 3.8.2.1 Obtenção da velocidade de alimentação ( $V_{al}$ ) e da velocidade de soldagem ( $V_{sol}$ ).

O volume de solda ( $J_T$ ) necessário para o preenchimento do chanfro da Figura 19 é:

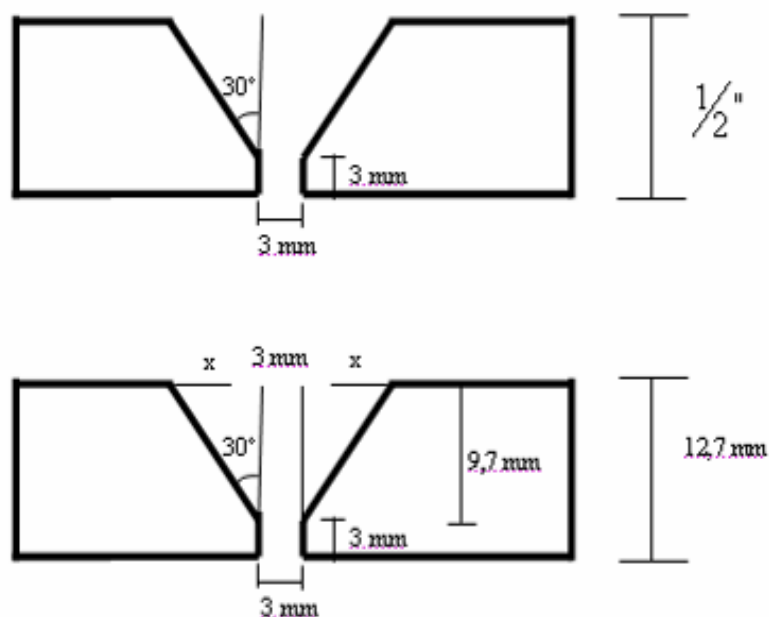


Figura 19- Vista frontal do corpo de prova – Posição de soldagem.

De acordo com a figura 19, temos:

$$\operatorname{tg} 30^{\circ} = \frac{x}{9,7} \rightarrow x = 5,6 \text{ mm}$$

Logo,

A área total ( $A_T$ ) será:

$$A_T = (3 \times 12,7) + 2 \cdot (5,6 \times 9,7) / 2 = 92,42 \text{ mm}^2$$

Como o comprimento da barra é de 200 mm, temos:

$$J_T = 92,42 \times 200 = 18484 \text{ mm}^3 = 18,5 \text{ cm}^3$$

Como devemos ter um reforço na solda, adotamos  $J_T = 20 \text{ cm}^3$ , divididos em dois passes de  $10 \text{ cm}^3$ .

A velocidade de alimentação ( $V_{al}$ ) e a velocidade de soldagem ( $V_{sol}$ ) foram obtidas através dos cálculos abaixo, tomando com referência o gráfico da figura 20.



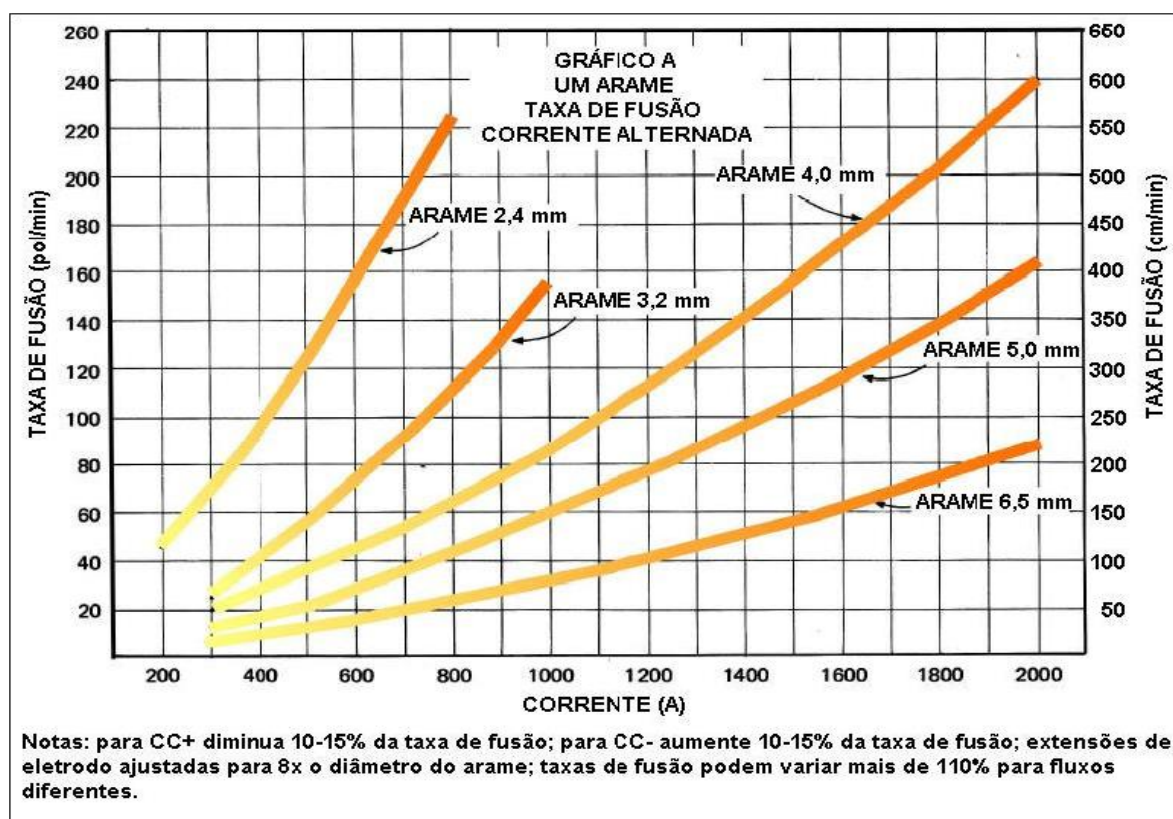


Figura 20 - Relação entre a corrente de soldagem (CA) e a taxa de fusão (ESAB, 2004).

Usamos um arame de Ø 2,4 mm e uma fonte que fornece corrente CC<sup>+</sup>. Então:

Tabela 7 - Dados do gráfico da Figura 20.

Corrente (A)	Velocidade de Alimentação $V_{al}$ (cm/min)	$V_{al} - 12\%$ (cm/min)	$V_{al} - 12\%$ (m/min)
300	175	154,0	1,540
400	240	211,2	2,112
450	275	242,0	2,420
500	310	278,2	2,782

Da relação:

$$\frac{\text{Volume de solda}}{\text{Tempo}} = V_{al} \cdot A_{el}; \quad \rightarrow \quad \text{Tempo}(t) = \frac{J_T}{V_{al} \cdot A_{el}}$$

$J_T$  = Volume de solda;

$$\text{Área do eletrodo } A_{el} = \frac{\pi \phi_{el}^2}{4} = 0,0452 \text{ cm}^2$$

Calculamos o tempo de soldagem (t):



1) Para 300A:

$$t_1 = \frac{J_T}{V_{al} \cdot A_{el}} = \frac{10}{154.0,0452} = 1,4366 \text{ min}$$

2) Para 400A:

$$t_2 = \frac{J_T}{V_{al} \cdot A_{el}} = \frac{10}{211,2.0,0452} = 1,0399 \text{ min}$$

3) Para 450A:

$$t_3 = \frac{J_T}{V_{al} \cdot A_{el}} = \frac{10}{242.0,0452} = 0,9142 \text{ min}$$

4) Para 500A:

$$t_4 = \frac{J_T}{V_{al} \cdot A_{el}} = \frac{10}{278,2.0,0452} = 0,7952 \text{ min}$$

Como velocidade de Soldagem ( $V_{sol} = \frac{L}{t}$ ), temos:

- $V_{1sol} = \frac{20}{1,4366} = 13,92 \text{ cm/min}$

- $V_{2sol} = \frac{20}{1,0399} = 19,23 \text{ cm/min}$

- $V_{3sol} = \frac{20}{0,9142} = 21,87 \text{ cm/min}$

- $V_{4sol} = \frac{20}{0,7952} = 25,15 \text{ cm/min}$

Iniciamos a prática utilizando os parâmetros adotados e calculados, observando a corrente durante a soldagem. Os valores encontram-se na tabela 8 abaixo:

Tabela 8 – Parâmetros da soldagem.

Corpo-de-prova	Tensão (V)	$V_{al}$ (m/min)	$V_{sol}$ (cm/min)	Corrente (A)
1	25	1,6	13,8	215
2	30	1,6	13,8	250

No entanto, utilizando esses parâmetros, não foi conseguido resultado satisfatório devido o problema de falta de penetração. Então utilizamos os parâmetros representados na tabela 9 abaixo:

Tabela 9 – Parâmetros da soldagem.

Corpo-de-prova	Tensão (V)	$V_{al}$ (m/min)	$V_{sol}$ (cm/min)	Corrente (A)
1	25	2,4	21,8	370
2	30	2,4	21,8	395
3	25	2,8	25,0	440
4	30	2,8	25,0	480

Com a adoção desses parâmetros conseguimos o resultado esperado na soldagem, que era a penetração total da solda.

### 3.8.3 Comparação entre as energias de soldagem (H).

A energia de soldagem é definida como:

$$H = \frac{V \cdot I}{V_{sol}} \eta$$

Onde:

- $\eta$  é o rendimento térmico do processo que foi considerado 98%;
- $V$  é a tensão em volts;
- $I$  é a corrente em Ampére;
- $V_{sol}$  é a velocidade de soldagem.

Utilizando a formula acima e os valores da Tabela 9 nas unidades adequadas, obtivemos:

- $H_1 = \frac{25 \cdot 370}{3,6333} 0,98 = 2,5 \text{ kJ/mm}$
- $H_2 = \frac{30 \cdot 395}{3,6333} 0,98 = 3,2 \text{ kJ/mm}$
- $H_3 = \frac{25 \cdot 440}{4,1666} 0,98 = 2,6 \text{ kJ/mm}$
- $H_4 = \frac{30 \cdot 480}{4,1666} 0,98 = 3,4 \text{ kJ/mm}$

### 3.9 Metalografia

#### 3.9.1 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 # 400 e a seguir, foram atacadas quimicamente com uma solução de Nital a 9%. Foram analisadas quanto à presença de porosidade, a falta de fusão, falta de penetração e largura do cordão de solda.

#### 3.9.2 Micrografia

O objetivo da micrografia é analisar a variação da microestrutura da zona fundida de acordo com a variação dos parâmetros utilizados. As superfícies das amostras foram preparadas mediante o seu lixamento até a granulometria de # 800 e em seguida foram polidas usando uma pasta de diamante e atacadas quimicamente com uma solução de Nital a 4%.

### 3.10 Ensaio Charpy

O objetivo do ensaio Charpy é medir a energia absorvida por um corpo de prova padronizado (ASTM E23), de acordo com a Figura 21 abaixo:

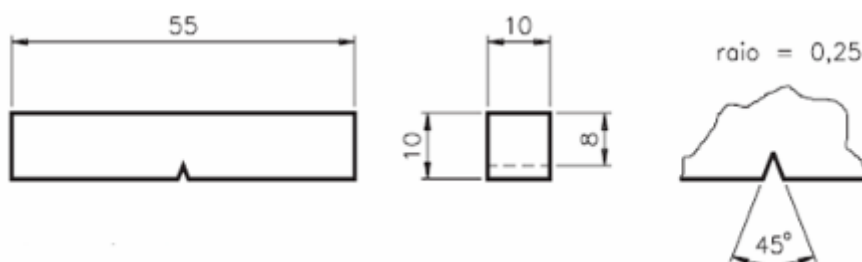


Figura 21 – Padronização do corpo de prova – Charpy (ASTM E23).

## CAPÍTULO IV

### 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 4.1 Soldagem

Primeiramente foi utilizada a junta de topo com chanfro em X, no entanto segundo a literatura (ESAB, 2004) a preparação da junta é um dos principais fatores a ser observado para esse processo. Levando isso em consideração, foi verificado que a escolha inadequada do tipo de junta proporcionou problemas no que tange ao estabelecimento da união adequada.

Na Figura 22 é observado esse tipo de defeito. Nota-se a falta de penetração.



Figura 22 – Soldagem numa junta de topo com chanfro em X.

De acordo com o que é explícito na metodologia, usando o tipo de junta adequado (junta de topo com chanfro em V), ocorreram duas situações:

- Parâmetros inadequados: A energia de soldagem foi insuficiente para obter penetração total da solda. Figura 23.



Figura 23 – Soldagem numa junta de topo com chanfro em V – Parâmetros inadequados.

- Parâmetros adequados: A energia foi suficiente para obter a penetração total da solda. Figura 24.



Figura 24 - Soldagem numa junta de topo com chanfro em V – Parâmetros adequados.

#### 4.1.1 Discussão sobre os parâmetros adotados.

Após a realização da soldagem, utilizando os parâmetros (Tensão e velocidade de alimentação) da Tabela 8, observamos que não houve penetração suficiente da solda no corpo-de-prova, que pode ser justificado pela baixa corrente resultante da baixa velocidade de alimentação e, conseqüentemente, uma energia de soldagem insuficiente. Figura 23.

Com a adoção dos parâmetros (Tensão e  $V_{al}$ ) da Tabela 9, obtivemos resultado satisfatório, pois o aumento da velocidade de alimentação resultou numa maior energia, que foi suficiente para haver penetração total da solda no corpo-de-prova. Figura 24.

## 4.2 Macrografia

Através da macrografia foi possível observar a integridade da solda. Verificando as Figuras 25, 26, 27 e 28 não foi observada a presença de não conformidades, como porosidade, falta de penetração e de fusão do metal.

Foi possível verificar a interação dos parâmetros com a configuração da solda. Com a variação da tensão, observa-se nas Figuras 26 e 28 que o aumento da tensão provoca o aumento na largura do cordão de solda. Já com relação à corrente, que é função da velocidade de alimentação, com o seu aumento tem-se uma maior penetração da solda, Figuras 25 e 27. (MODENESI, 2005).



Figura 25 - Macrografia do corpo-de-prova 1.



Figura 26 - Macrografia do corpo-de-prova 2.



Figura 27 – Macrografia do corpo-de-prova 3.

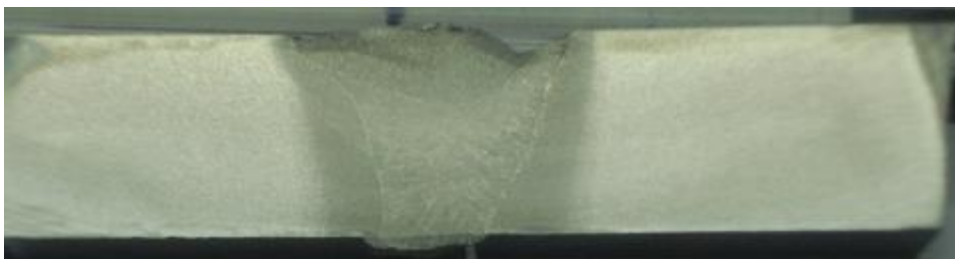


Figura 28 – Macrografia do corpo-de-prova 4.

### 4.3 Micrografia

Segundo a literatura (KOU, 2003) os parâmetros de soldagem, as quais definem o nível de energia imposta durante a soldagem, irão influenciar diretamente na microestrutura da zona fundida. No que se relaciona à microestrutura dos aços baixo carbono e baixa liga, material este utilizado como consumível para a soldagem com arco submerso, o nível de energia irá definir quais as formações microestruturais poderão ser desenvolvidas nessa região durante esse processo. Como foi citada anteriormente, a velocidade de resfriamento indicará quais dessas formações (ferrita de contorno de grão, ferrita poligonal, ferrita de Widmanstatten, ferrita acicular, bainita superior e bainita inferior) serão predominantes. Com relação ao fluxo utilizado, quanto maior o nível de tensão e de corrente, maior é a fusão do fluxo e maior será a sua interação com o metal fundido, ajudando na formação de ferrita acicular.

Tomando como referência a Figura 7, podemos observar que nas Figuras 29, 30, 31 e 32 é possível verificar a presença da maioria dessas formações, sendo que, na Figura 29 verificamos a predominância de ferrita de contorno de grão e nas figuras 30, 31 e 32 a predominância de ferrita acicular.

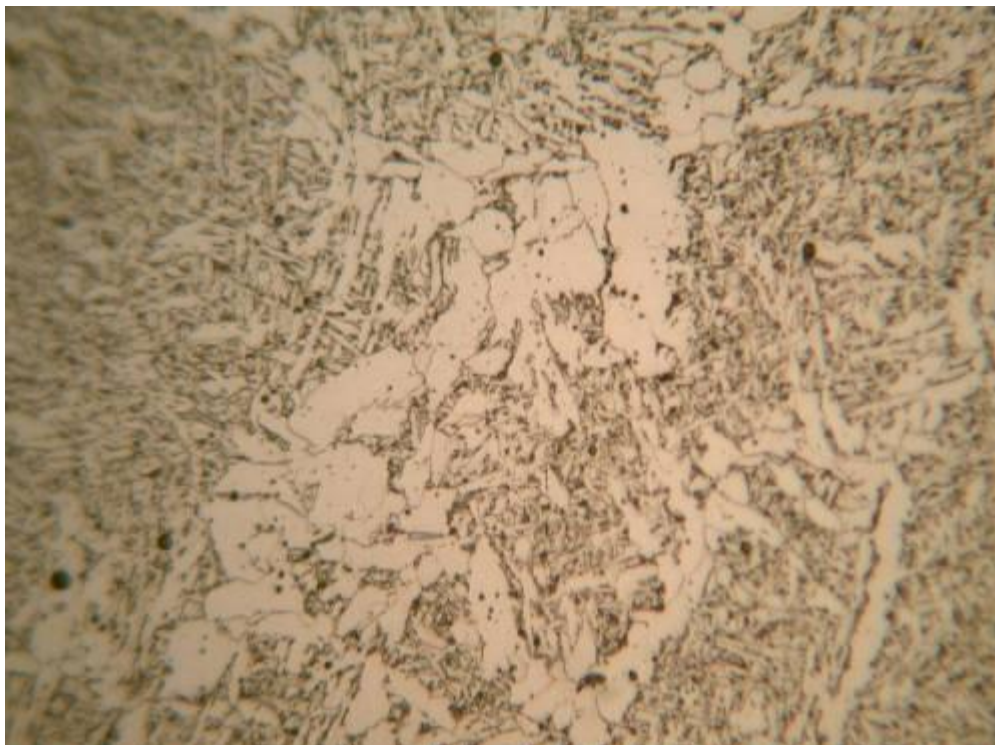


Figura 29 – Zona fundida do corpo-de-prova 1 ( aumento de 500x).

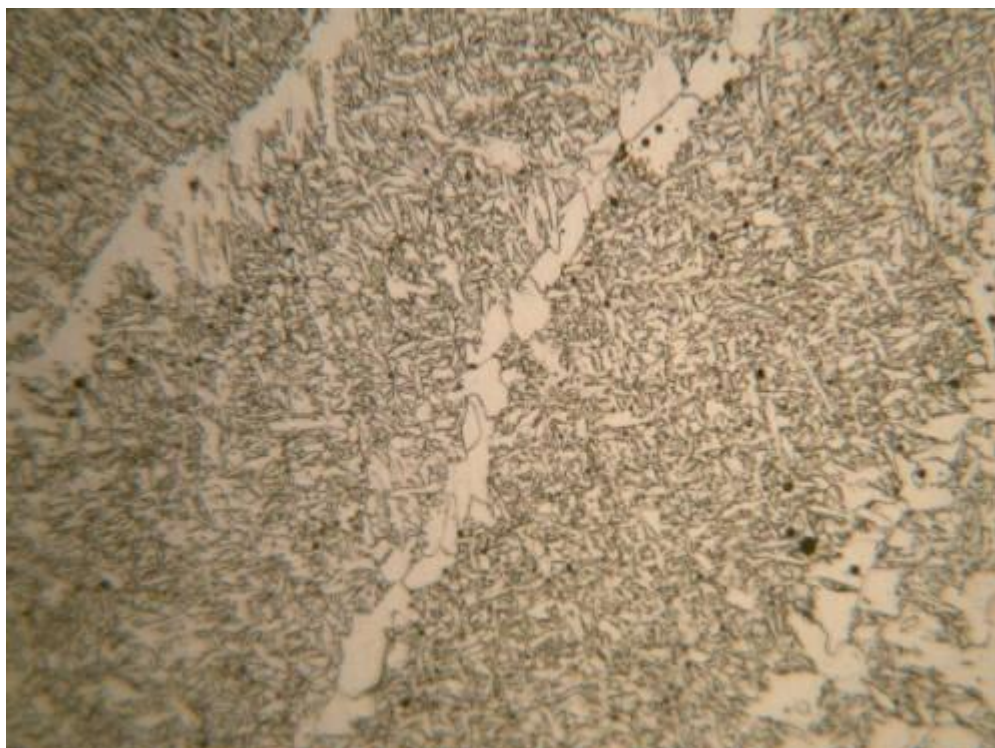


Figura 30 – Zona fundida do corpo-de-prova 2 ( aumento de 500x).



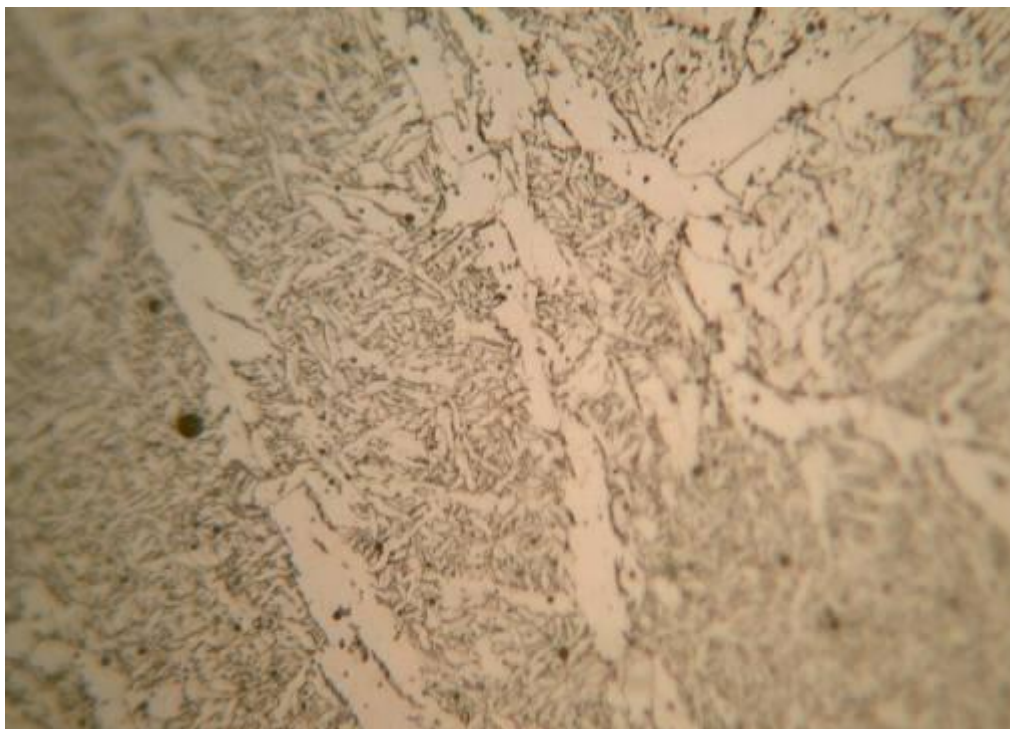


Figura 31 – Zona fundida do corpo-de-prova 3 ( aumento de 500x).

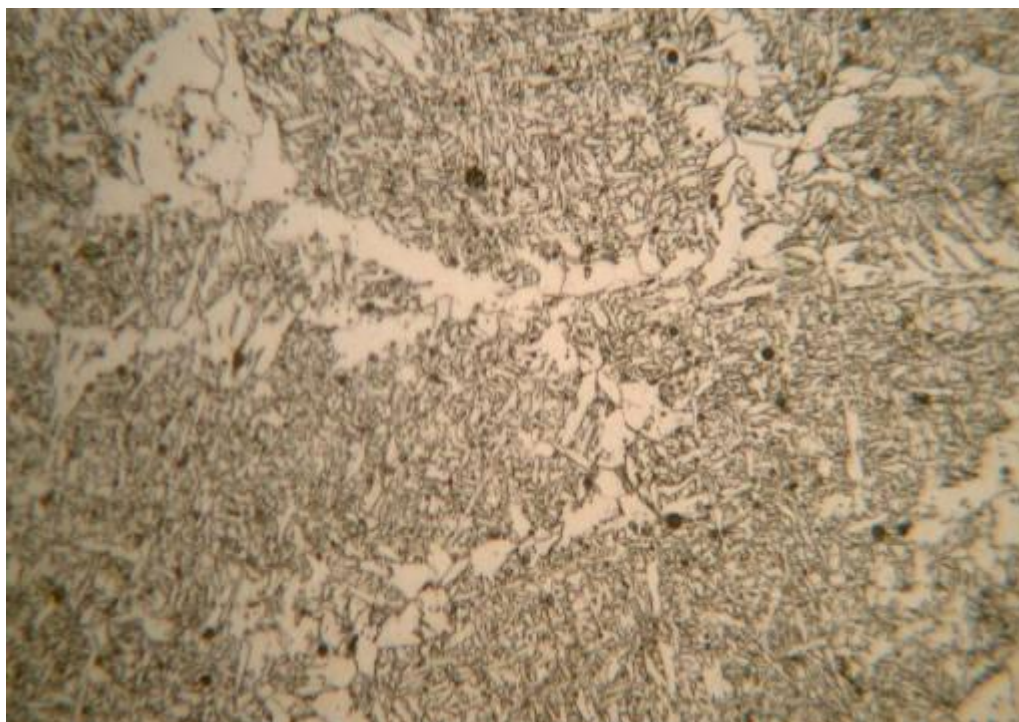


Figura 32 – Zona fundida do corpo-de-prova 4 (aumento de 500x).

Segundo a literatura (KOU, 2003), a presença da ferrita acicular é desejada em função da mesma proporcionar uma maior tenacidade na zona fundida, haja vista a minimização do tamanho de grão gerado pela presença desse tipo de formação, como é



mostrado na Figura 32. Assim sendo é esperado, segundo o que se observa na Figura 32 que essa apresente maior tenacidade ao impacto.

#### 4.4 Ensaio Charpy

No Ensaio Charpy os corpos de prova foram posicionados de maneira adequada permitindo a aplicação do teste. Foram realizados 4 ensaios para cada condição de soldagem. Os resultados estão apresentados na Tabelas 10 e 11.

Tabela 10 - Resultados do ensaio Charpy em (KPM).

Teste	Corpo de Prova 1	Corpo de Prova 2	Corpo de Prova 3	Corpo de Prova 4
1	5,4	8,6	9,9	9,6
2	5,7	7,4	8,0	10,3
3	6,4	7,5	7,2	8,0
4	5,9	7,3	8,3	10,9

Na Tabela 8, temos os respectivos valores transformados em Joule (J). Considerando: 1 Kpm = 9,81J.

Tabela 11 - Resultados do ensaio Charpy (J).

Teste	Corpo de Prova 1	Corpo de Prova 2	Corpo de Prova 3	Corpo de Prova 4
1	53	84	97	94
2	56	73	78	101
3	63	74	71	78
4	58	72	81	107
<b>Média</b>	<b>57 ± 4</b>	<b>76 ± 6</b>	<b>82 ± 11</b>	<b>95 ± 12</b>

De acordo com os resultados obtidos podemos observar que com aumento dos parâmetros aumentou-se a energia de soldagem e conseqüentemente maior foi a tenacidade ao impacto, o que pode ser observado no corpo de prova 4, de acordo com a tabela 12.

Tabela 12 – Comparação da energia absorvida.

Corpo de Prova	Tensão (V)	Corrente (A)	Energia de soldagem (kJ)	Energia absorvida (J)
1	25	370	2,5	57 ± 4
2	30	390	3,2	76 ± 6
3	25	440	2,6	82 ± 11
4	30	480	3,4	95 ± 12

Os cálculos da energia de soldagem foram mostrados no item 3.8.3 deste trabalho.

## CAPÍTULO V

### 5 CONCLUSÕES

Para as condições deste trabalho e os resultados obtidos, pode-se concluir que:

- A escolha adequada dos parâmetros de soldagem e do projeto da junta, irá interferir diretamente na integridade da união. Como foi mostrada, a escolha certa do chanfro, para chapa usada, é do tipo em “V” e os parâmetros devem ser escolhidos de forma a fornecerem energia suficiente para completa penetração da solda e fusão do metal de base.

- A variação dos parâmetros de soldagem irá influenciar diretamente na formação da microestrutura da junta soldada. Pois como foi visto, o aumento dos parâmetros implica uma maior energia de soldagem e assim maior tempo para resfriamento, o que favorece a formação de ferrita acicular, cuja formação melhorou a tenacidade do metal.

- Da mesma maneira, quanto maior a energia de soldagem, maior a interação dos elementos de liga do fluxo na zona fundida, mais refinados os grãos da junta soldada e, consequentemente, maior a tenacidade ao impacto.

- Como isso fica evidente que o corpo de prova 4, cuja soldagem foi realizada com tensão de 30 V e velocidade de alimentação de 2,8 m/min apresentou melhor resultado, pois devido a alta energia de soldagem obtida com os parâmetros adotados, apresentou grande quantidade de ferrita acicular com grão mais refinados em sua microestrutura, garantindo assim uma tenacidade ao impacto maior em relação aos demais corpos de prova.

## **CAPÍTULO VI**

### **6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Avaliar a variação dos parâmetros da soldagem, a arco submerso, na zona termicamente afetada avaliando a microestrutura e a resistência à tração.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- **APOSTILA DE ARCO SUBMERSO ESAB**, 2004, disponível em: [www.esab.com.br/literatura/apostilas](http://www.esab.com.br/literatura/apostilas). Acesso em: 02 de fev. 2007.
  
- **ASSUMPÇÃO, G. A., Estudo da Técnica Dupla Camada na Soldagem do Aço ABNT 1045**. Vitória, 2006. Projeto de Graduação, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo.
  
- **CATÁLOGO ESAB**, disponível em: [www.esab.com.br](http://www.esab.com.br). Acesso em 04 de Abril de 2007.
  
- **CATÁLOGO INFOSOLDA**, disponível em: [www.infosolda.com.br](http://www.infosolda.com.br). Acessado em 10 de Maio de 2007.
  
- **HANDBOOK, ASM**, Welding Brazing and Soldering, volume 6, ASM International.
  
- **KOU**, Sindo. **Welding Metallurgy**, Second Edition, 2003.
  
- **MODENESI, P. J., Marques, P. V.. Apostila Introdução aos Processos de Soldagem**. Belo Horizonte: UFMG, 2006.
  
- **MODENESI, P. J., Marques, P. V., Bracarense A. L.. Soldagem Fundamentos e Tecnologia** Belo Horizonte: UFMG, 2005.
  
- **NORMA ASTM A-36**, aços ns Fátima, tabela aço A-36, disponível em: [www.acosnsfatima.com.br/normas ASTM-A36.asp](http://www.acosnsfatima.com.br/normas ASTM-A36.asp). Acesso em: 02 de fev. 2007.
  
- **ASTM E23- 94b**, Norma - American Society Testing Materials, Standard Methods for Impact Testing of Metallic Materials, Philadelphia, PA, 1989.