

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**AVALIAÇÃO COMPARATIVA DOS PROCESSOS DE SOLDAGEM  
GMAW E FCAW UTILIZANDO AÇO ASTM A-36 PARA VERIFICAR A  
SOLDABILIDADE, PROPRIEDADES METALÚRGICAS E  
GEOMÉTRICAS,  
E RESISTÊNCIA MECÂNICA**

**Autor: Nancy Del Ducca Barbedo**

**Orientador: Prof. Dr. Edmilson Otoni Corrêa**

**Co-Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Carvalho Castro**

Itajubá, Outubro de 2011

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**AVALIAÇÃO COMPARATIVA DOS PROCESSOS DE SOLDAGEM  
GMAW E FCAW UTILIZANDO AÇO ASTM A-36 PARA VERIFICAR A  
SOLDABILIDADE, PROPRIEDADES METALÚRGICAS E  
GEOMÉTRICAS,  
E RESISTÊNCIA MECÂNICA**

**Autor: Nancy Del Ducca Barbedo**

**Orientador: Prof. Dr. Edmilson Otoni Corrêa**

**Co-Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Carvalho Castro**

**Curso: Mestrado em Engenharia Mecânica**

**Área de Concentração: Projeto e Fabricação**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Itajubá, Outubro de 2011

MG – Brasil

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**AVALIAÇÃO COMPARATIVA DOS PROCESSOS DE SOLDAGEM  
GMAW E FCAW UTILIZANDO AÇO ASTM A-36 PARA VERIFICAR A  
SOLDABILIDADE, PROPRIEDADES METALÚRGICAS E  
GEOMÉTRICAS,  
E RESISTÊNCIA MECÂNICA**

**Autor: Nancy Del Ducca Barbedo**

**Orientador: Prof. Dr. Edmilson Otoni Corrêa**

**Co-Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Carvalho Castro**

**Composição da Banca Examinadora:**

## **Agradecimentos**

A Deus, pela força e paciência;

A minha família, pelo apoio e incentivo;

Ao meu orientador, Prof. Dr. Edmilson Otoni Correa e ao co-orientador, Prof. Dr. Carlos Alberto Carvalho Castro, pela competência, dedicação, paciência e amizade;

A ESAB, pela doação dos arames;

Aos funcionários da oficina mecânica, e do laboratório de materiais pelo apoio e participação durante a fase de realização dos ensaios;

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) através do programa de bolsas, pelo apoio financeiro;

## **Resumo**

BARBEDO, N. D. *Avaliação comparativa dos processos de soldagem GMAW e FCAW utilizando aço ASTM A-36 para verificar a soldabilidade, propriedades metalúrgicas e geométricas, e resistência mecânica.* 2011, 56 p. Dissertação (Mestrado em Projeto e Fabricação) - Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá.

*Atualmente, na indústria metal-mecânica um dos principais objetivos é a busca da maior produtividade com o menor custo de fabricação. Neste âmbito, na área de soldagem têm sido utilizados vários processos dentre os quais, tem-se destacado o processo GMAW (Gás Metal Arc Welding) e FCAW (Flux Cored Arc Welding). Com o intuito de comparar o desempenho destes dois processos no que se refere à qualidade da junta soldada, neste trabalho, as soldas foram feitas na posição plana e em chanfro em chapas de aço carbono ASTM A-36. Para o delineamento dos experimentos e posterior análise da influência dos parâmetros, utilizou-se uma ferramenta estatística baseada na técnica do projeto e análise de experimentos, DOE, aplicados através do software Minitab. Neste quesito variou-se a tensão, corrente e velocidade de soldagem em ambos os processos. Na primeira etapa foram analisadas a soldabilidade e as propriedades geométricas dos aços soldados nos dois processos em soldas na posição plana. Na segunda etapa, as soldas foram realizadas em chanfro, onde foram verificadas as propriedades metalúrgicas e resistência mecânica, utilizando os melhores parâmetros encontrados na posição plana. Ambos os processos tem características distintas em relação às propriedades metalúrgicas, porém os dois tiveram boa soldabilidade e resistência mecânica satisfatória.*

**Palavras-chave:** FCAW, GMAW, DOE.

## ***Abstract:***

*BARBEDO, N. D. Comparative Evaluation of the GMAW and FCAW Welding Processes Using Steel ASTM A-36 to verify the weldability, mechanical and metallurgical properties. 2011, 56 p. Dissertação (Mestrado em Projeto e Fabricação) - Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá.*

*Today in the metalworking industry a major goal is the pursuit of higher productivity with lower manufacturing cost. In this context, in welding processes have been used several of which, has highlighted the GMAW (Gas Metal Arc Welding) and FCAW (Flux Cored Arc Welding). In order to compare the performance of these two processes in relation to the quality of the weld, in this work, welds were made in flat position and bevel Carbon Steel Plates ASTM A-36. For the design of experiments and subsequent analysis of the influence of parameters, we used a statistical tool based on technical analysis and design of experiments, DOE, applied through the Minitab software. In this regard, it was varied the voltage, current and welding speed in both processes. In the first step we analyzed the geometric properties and weldability of steel soldiers in the two cases in welds in the flat position. In the second step, the welds were made in muzzle, where the metallurgical properties were observed, using the best parameters found in the flat position. Both processes have different characteristics in relation to the metallurgical properties, but both have good weldability and satisfactory mechanical strength*

***Key-words:*** FCAW, GMAW, DOE.

## Sumário

Sumário .....	i
Lista de Figuras.....	iii
Lista de Tabelas .....	v
Lista de Equações .....	vi
Simbologia.....	vii

## CAPÍTULO 1

Introdução.....	1
1.1.Objetivos .....	2
1.2.Importância do tema .....	3
1.3.Estrutura do Trabalho.....	3

## CAPÍTULO 2

### Revisão bibliográfica

2.1. Processos FCAW e GMAW .....	4
2.1.1. GMAW.....	6
2.1.2 .FCAW .....	8
2.2. A industrialização frente aos dois processos de soldagem .....	10
2.3. Arames sólidos e tubulares .....	10
2.3.1. Arames Sólidos.....	10
2.3.2. Arames Tubulares .....	11
2.3.2.1. Arames Tubulares Tipo “Metal Cored” .....	11
2.3.2.2.Arames Tubulares Rutílicos .....	12
2.4. Influência do gás de proteção nos processos de soldagem.....	12
2.5. Transferências metálicas .....	13
2.6. Principais variáveis de soldagem .....	15
2.7. Orientação do Eletrodo.....	17
2.8. Soldabilidade .....	18
2.9. Diluição .....	19
2.10. Metalurgia.....	19
2.10.1. Regiões da junta soldada .....	19
2.10.2 Aporte Térmico.....	2

2.10.3. Metalografia.....	21
2.11. Técnica de projetos e análise de experimentos .....	23
2.11.1. Planejamento Fatorial Completo $2^k$ .....	25
2.11.2. Metodologia da Superfície de Resposta (MSR) .....	26

### **CAPÍTULO 3**

Materiais e Métodos.....	28
3.1. Preparação das Amostras.....	29
3.1.1. Delineamento dos Experimentos .....	29
3.2. Soldas sobre chapas.....	30
3.3. Soldas em junta .....	33
3.4. Preparação dos corpos de prova para ensaios mecânicos.....	34
3.4.1. Teste de Dureza .....	34
3.4.2. Teste de Tração .....	35
3.4.3. Microestrutura .....	36

### **CAPÍTULO 4**

Resultados e Discussões.....	38
4.1. Delineamento dos Experimentos .....	38
4.2. Soldas em chanfro .....	42
4.3. Teste de Microdureza .....	44
4.4. Teste de tração .....	44
4.5. Microestrutura.....	46

### **CAPÍTULO 5**

Conclusão .....	57
Referências Bibliográficas .....	58
Anexos	
Anexo A .....	63

## Lista de Figuras

- Figura 1 – geometria do cordão de solda. a) processo GMAW. b) processo FCAW. (Araujo, 2004).
- Figura 2 – Processo básico de soldagem GMAW. (Fortes, 2005)
- Figura 3 – Processo básico de soldagem FCAW. (Fortes, 2004)
- Figura 4 - Efeito do gás de proteção no perfil do cordão. (Jeffus, 2007).
- Figura 5 - Principais tipos de transferência metálica (Barra, 2003).
- Figura 6 - Influência do “*stick-out*” na geometria do cordão de solda. Fonte: Wainer (1992).
- Figura 7 – Efeito da orientação do eletrodo na morfologia do cordão de solda. (Felizardo)
- Figura 8 – regiões da junta soldada
- Figura 9 – Esquema das regiões de uma solda por fusão. A – zona fundida (ZF), B – zona termicamente afetada (ZTA), C – metal de base (MB). (Bracarense, 2009)
- Figura 10 - Diagrama esquemático mostrando diferentes alterações que podem ocorrer na zona fundida em uma solda em um aço de baixo carbono. (Bracarense, 2009)
- Figura 11 – Principais fases encontradas na soldagem de aços de baixa liga onde PF: ferrita primária, PF (G): ferrita de contorno de grão, PF (I): ferrita intergranular poligonal, AF: ferrita acicular, FS (A): ferrita com segunda fase alinhada, FS (NA): Ferrita com segunda fase não alinhada, FC: ferrita com carboneto agregado (inclui perlita), M: Martensita. (Lancaster, 1999)
- Figura 12 – Exemplo de gráfico de superfície de resposta para  $x_1$ ,  $x_2$  (Junior, 2003).
- Figura 13 – Esquema da junta a ser soldada.
- Figura 14 – Banco de ensaios. 1) fonte de soldagem. 2) gás de proteção. 3) tocha. 4) carro tartaruga. 5) corpo de prova
- Figura 15 – Esquema de soldas sobre chapas (BOP).
- Figura 16 – Estereomicroscópio utilizado para ampliação dos cordões de solda.
- Figura 17 - - Representação das características geométricas do cordão. W – largura, H – reforço e D – profundidade do cordão. (Barbedo, 2007)
- Figura 18 – Microdurômetro utilizado para ensaios de microdureza Vickers
- Figura 19 – Corpo de prova para ensaio de tração
- Figura 20- Equipamento utilizado para os ensaios de tração.
- Figura 21 – Microscópio utilizado para observar a microestrutura dos corpos de prova
- Figura 22 – Corpos de prova em seus parâmetros ótimos. a) ER70S-6 (1,2 mm). b)

ER70S-6 (1,0 mm). c) E71T-1 (1,2 mm). d) E71T-1 (1,0 mm). e) E70C-6M (1,2 mm). f) E70C-6M (1,0 mm)

Figura 23 – Influência dos parâmetros de soldagem na geometria do cordão. a) ER70S-6 (1,2 mm). b) ER70S-6 (1,0 mm). c) E71T-1 (1,2 mm). d) E71T-1 (1,0 mm). e) E70C-6M (1,2 mm). f) E70C-6M (1,0 mm).

Figura 24 – Soldas em chanfro. a) ER70S-6 (1,2 mm). b) ER70S-6 (1,0 mm). c) E71T-1 (1,2 mm). d) E71T-1 (1,0 mm). e) E70C-6M (1,2 mm). f) E70C-6M (1,0 mm).

Figura 25 – Comparação entre os perfis de microdureza.

Figura 26 – Gráficos de tensão  $\times$  deformação para cada junta soldada.

Figura 27 – Análise metalográfica das soldas para cada arame utilizado. As imagens estão organizadas em: metal de base, zta e metal de adição, respectivamente. a) ER70S-6 (1,2 mm de diâmetro). b) ER70S-6 (1,0 mm de diâmetro). c) E71T-1 (1,2 mm de diâmetro). d) E71T-1 (1,0 mm de diâmetro). e) E70C-6M (1,2 mm de diâmetro). f) E70C-6M (1,0 mm de diâmetro).

## **Lista de Tabelas**

Tabela 1 – Composição química dos arames

Tabela 2 – Composição química típica para o aço ASTM A-36.

Tabela 3 – Quadro resumo dos ensaios a serem realizados com o arame ER70S-6

Tabela 4 – Quadro resumo dos ensaios a serem realizados com o arame E71T-1.

Tabela 5 – Quadro resumo dos ensaios a serem realizados com o arame E70C-6M

Tabela 6 – Parâmetros fixos de soldagem

Tabela 7. Propriedades mecânicas para o aço ASTM A-36

Tabela 8. Parâmetros ótimos das soldas sobre chapas

Tabela 9 – Média das forças, tensões e deformações máximas dos ensaios de tração

## **Lista de Equações**

Equação 1 - Energia de soldagem absorvida pela junta soldada

Equação 2 - Superfície de resposta

Equação 3 - função de primeira ordem

Equação 4 - função de segunda ordem

## Simbologia

### Lista de Símbolos e Abreviaturas

GMAW	Gás Metal Arc Welding
FCAW	Flux Cored Arc Welding
SMAW	Shielded Metal Arc Welding
ASTM	American Society for Testing and Materials
ZTA	Zona Termicamente Afetada
MIG	Metal Inert Gas
MAG	Metal Active Gas
HSLA	<i>High-strength low-alloy</i>
DBCP	Distância Bico de Contato Peça
$E$	Energia de soldagem [J/cm]
$H$	Rendimento do arco
$U$	Tensão de soldagem [V]
$I$	Corrente de soldagem [A]
$V$	Velocidade de soldagem [cm/min]
$T_c$	Temperatura crítica
$T_f$	Temperatura de fusão
$T_p$	Temperatura de pico
ZF	Zona Fundida
MB	Metal de Base
F	Ferrita
GF	Ferrita de contorno de grão
PF	Ferrita primária
FS (A)	Ferrita com segunda fase alinhada
FS (NA)	Ferrita com segunda fase não alinhada
FC	Ferrita com carbonetos agregados

AF	Ferrita acicular
A	Austenita
CFC	Cúbica de Face Centrada
M	Martensita
TCC	Tetragonal de Corpo Centrado
DOE	Design Of Experiments
N	Número de Experimentos
$2^k$	Planejamento fatorial completo
MSR	Metodologia da Superfície de Resposta
Y	Superfície de resposta
$x_k$	Fatores de entrada
$\epsilon$	Erro experimental
ER70S-6	Eletrodo maciço
E71T-1	Eletrodo rutílico
E70C-6M	Eletrodo tipo “metal cored”
BOP	Bead on Plate
CC <sup>+</sup>	Soldagem na polaridade reversa
LSO	Laboratório de Soldagem
W	Largura do cordão de solda
H	Reforço do cordão
D	Profundidade do cordão.
d	Desejabilidade individual
D	Desejabilidades combinadas

# Capítulo 1

## Introdução

Atualmente, na indústria metal-mecânica um dos principais objetivos é a busca da maior produtividade com o menor custo de fabricação. Neste âmbito, na área de soldagem têm sido utilizados vários processos dentre os quais, tem-se destacado o processo GMAW (*Gás Metal Arc Welding*) e FCAW (*Flux Cored Arc Welding*).

O aumento da participação dos processos de soldagem com arames tubulares e arames maciços em todo o mundo tem ocorrido à custa de um declínio do processo eletrodo revestido. Isto vem ocorrendo porque os processos de soldagem a arco elétrico com atmosfera protetora têm apresentado um contínuo desenvolvimento devido à qualidade, custos e flexibilidade destes processos, sendo esses, os mais adequados à mecanização (MOREIRA, 2006). Neste aspecto pode ser acrescentado às indústrias automobilísticas e principalmente a naval envolvendo a parte de navios e plataformas.

A indústria naval brasileira apresentou nos últimos anos uma retomada de suas atividades. Este movimento está relacionado principalmente ao programa da Petrobrás em aumentar a produção de petróleo em alto mar buscando a auto-suficiência. Exigências para que parte da construção das plataformas, embarcações e seus equipamentos sejam realizados por construtores locais vêm promovendo a reativação dos estaleiros e atraindo investidores estrangeiros que arrendaram estaleiros no Brasil, (Ferraz et al., 2002).

A demanda expandiu ainda mais quando a Petrobrás lançou o programa de substituição da frota de navios de apoio “offshore” definindo, no edital de concorrência internacional, preferência por navios de bandeira brasileira, induzindo as empresas operadoras, nacionais e estrangeiras, a contratar a construção local dessas embarcações. O resultado é que a indústria chegou ao final do primeiro semestre de 2002 em face de uma nova realidade, em que os principais desafios não são mais as encomendas, e sim como reativar instalações no curto prazo e montar uma competente capacidade produtiva, para atendê-las, (Vieira, 2006).

Neste aspecto as empresa tiveram que planejar todo o seu escopo para gerenciar o novo recomeço da indústria naval. Para tanto foi necessário utilizar alguns conhecimentos, principalmente na área de soldas, pois como há vários processos de soldagem a arco, como: SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*) que é o processo com eletrodo revestido, GMAW (MIG/MAG), FCAW (Arame Tubular) entre outros, foi necessário desenvolver metodologias rápidas e eficazes, pois era uma exigência do mercado em expansão.

Os processos de soldagem GMAW e FCAW são amplamente aplicados na indústria de petróleo. Ambos os processos podem ser aplicados em uma variedade de aços, tais como os de baixo carbono, inoxidáveis entre outras ligas ferrosas. Outra característica importante destes dois processos é a excelente produtividade devida à possibilidade de automação dos equipamentos. Estes dois processos já são empregados em nível industrial, entretanto, as diferenças em termos microestruturais e propriedades mecânicas foram pouco exploradas a nível científico.

No caso da soldagem com eletrodo revestido (SMAW), as taxas de deposição, bem como o fator de trabalho, ou seja, a razão entre o tempo durante o qual uma máquina pode fornecer uma determinada corrente máxima de soldagem e um tempo de referência (10 minutos conforme normas internacionais), deixavam a desejar, mas tinham consciência que este processo era essencial para vários seguimentos da soldagem, principalmente em passes de raízes, pois se trata de um processo manual. A soldagem a arco com arame tubular (FCAW) e arame sólido (GMAW) são processos que acumulam vantagens, como: alto fator de trabalho do soldador, alta taxa de deposição, resultando em alta produtividade e qualidade da solda produzida.

Outra característica muito importante foi à necessidade em aumentar a produtividade, superar a escassez de trabalho qualificado e o aumento crescente das exigências de segurança elevou a demanda pela automação, superando assim, muitos dos problemas do dia a dia da soldagem.

Diante deste cenário, fica claro a demanda de se explorar ainda mais os processos GMAW e FCAW em suas características, aplicações e vantagens. Para se ter uma avaliação mais concreta este projeto de pesquisa pretende investigar os processos GMAW e FCAW verificando a sua soldabilidade, as suas propriedades metalúrgicas e geométricas e a sua resistência mecânica. Para atingir este objetivo, procurar-se-á utilizar metodologias comparativas entre os processos, bem como avaliar as variáveis pertinentes aos processos.

### **1.1. Objetivos:**

- Verificar a soldabilidade do aço ASTM A-36 utilizando os processos de soldagem GMAW e FCAW em chapas soldadas;
- Verificar a influência das variáveis sobre as propriedades metalúrgicas no cordão de solda;
- Verificar o comportamento mecânico, ou seja, a resistência mecânica nas juntas

soldadas pelos processos GMAW e FCAW;

- Analisar o perfil de dureza nas zonas termicamente afetadas (ZTA), metal de solda e no metal de adição entre os dois processos;
- Investigar as propriedades que afetam a geometria, ou seja, penetração, a largura dos cordões de solda utilizando como base as variáveis: tensão, corrente e velocidade de soldagem nos processos GMAW e FCAW.

## **1.2. Importância do Tema**

- Comparar os arames maciços e tubulares em relação às propriedades geométricas, mecânicas e metalúrgicas;
- Utilizar a técnica de análise de experimentos DOE;

## **1.3. Estrutura do Trabalho**

Esta dissertação está subdividida em 5 capítulos:

- Capítulo 1: Apresenta a introdução do trabalho e seus objetivos;
- Capítulo 2: Apresenta informações teóricas sobre o assunto abordado neste trabalho, publicações científicas, pesquisas e livros técnicos.
- Capítulo 3: O procedimento experimental descreve-se a experimentação, mostrando os processos e as variáveis a serem investigadas em cada fase, bem como a utilização da técnica de delineamento de experimentos;
- Capítulo 4: Os resultados e discussões mostram os resultados obtidos e toda a análise sobre os mesmos, como dificuldades e sucessos;
- Capítulo 5: Expõe as conclusões finais do trabalho;

## Capítulo 2

### Revisão Bibliográfica

A soldagem é o principal processo de união entre metais utilizando fontes de calor, podendo ou não ter aplicação de pressão. (Wainer, 1992). Suas aplicações vão desde a fabricação de grades e portões até equipamentos da indústria petrolífera e nuclear, (Bracarense, 2009)

#### 2.1.Processos FCAW e GMAW

Os processos de soldagem com proteção gasosa tiveram início na década de 20. Foi nesta época a concepção básica do GMAW, entretanto este somente se tornou comercial após 1948. Inicialmente, foi considerado um processo de alta densidade de corrente, pequenos diâmetros de eletrodos de metal nu onde se utiliza um gás inerte para proteção. Sua primeira aplicação foi na soldagem de alumínio. Por causa dessa característica, o processo era conhecido como Metal Inert Gas – MIG, denominação ainda utilizada para o processo.

A evolução subsequente do processo incluiu a soldagem com baixas densidades de corrente e corrente pulsada, aplicação em uma vasta faixa de materiais e emprego de gás ativo ou uma mistura de gases. Este último desenvolvimento levou à aceitação formal do termo GMAW (Gas Metal Arc Welding) para denominação do processo, devido aos gases inertes e ativos utilizados.

Na década de 50, a introdução da combinação do gás de proteção CO<sub>2</sub> com eletrodos contendo fluxo interno (arames tubulares) propiciou significantes melhorias nas condições de operação e na qualidade da solda. A primeira apresentação pública deste processo (conhecido como FCAW) foi no ano de 1954 e, em 1957, os equipamentos utilizados já possuíam uma configuração similar a atual. Experiências deste período já demonstravam significantes melhorias nas propriedades das soldas quando o arco e o metal fundido estão protegidos da contaminação pela atmosfera. De qualquer modo, o desenvolvimento do eletrodo revestido no final desta década, reduziu o interesse por estes processos.

Em virtude da necessidade do aumento de produtividade dos processos de soldagem, o processo SMAW foi cedendo espaço para outros tipos de processos que possibilitassem maior automação e produtividade, como aquele no qual a combinação entre a proteção gasosa a base

de CO<sub>2</sub> e o uso de arames com fluxo interno proporcionaram um avanço ainda maior na qualidade do cordão de solda gerado. Na soldagem FCAW os gases de proteção empregados podem ter tanto uma característica inerte, como no caso de misturas a base de Argônio ou Hélio, nas quais os elementos químicos presentes no gás de proteção não migram para o interior do metal de solda, quanto uma característica ativa, para o caso de misturas que utilizam proporções de CO<sub>2</sub> ou O<sub>2</sub>, aonde os elementos presentes no gás de proteção tenderão a migrar para o interior do metal de solda, causando alterações no teor de Carbono e na quantidade de óxidos, (Moreira, 2006).

O aumento da participação dos processos de soldagem FCAW e GMAW em todo o mundo tem ocorrido à custa de um declínio do processo eletrodo revestido. Isto porque os processos de soldagem a arco elétrico com atmosfera protetora (FCAW e GMAW) têm apresentado um contínuo desenvolvimento devido às suas características e baixo custo, sendo esses processos os mais adequados à mecanização. Adicionalmente, tais processos de soldagem vêm apresentando ao longo dos anos contínuos desenvolvimentos através da introdução das tecnologias arco pulsado, alimentadores de arames mais confiáveis e a utilização de gases de proteção à base de Argônio (Ventrella, 2006).

Os processos de soldagem GMAW e FCAW são amplamente aplicados na indústria de petróleo. Ambos os processos podem ser aplicados em uma variedade de aços, tais como baixo carbono, inoxidável entre outras ligas ferrosas. Outra característica importante destes dois processos é a excelente produtividade devida à possibilidade de automação dos equipamentos. Estes dois processos já são empregados a nível industrial, entretanto, as diferenças em termos micro estruturais e propriedades mecânicas foram pouco exploradas a nível científico.

A soldagem a arco com arame tubular (FCAW) e arame sólido (GMAW) são processos que acumulam vantagens, como: alto fator de trabalho do soldador, alta taxa de deposição, resultando em alta produtividade e qualidade da solda produzida.

Os eletrodos tubulares e os arames sólidos possuem muita similaridade quanto aos equipamentos usados na soldagem como nos tipos de aplicações recomendadas. Algumas características como alta produtividade, boa flexibilidade e facilidade de operação tornam os processos GMAW e FCAW altamente competitivos e, em muitos casos, concorrentes diretos nas aplicações de soldagem, (Rodrigues, 2005).

Em relação à geometria do cordão de solda, as diferenças são geradas devidas, principalmente, ao comportamento do arco e da transferência metálica. Soldas realizadas com arames tubulares possuem o arco mais largo, com aspecto liso e com boa penetração. Soldas

realizadas com arames sólidos geram alta penetração, porém estreita, do tipo dediforme (finger). Essas diferenças podem ser observadas na Figura 1.

Na soldagem GMAW, a tocha deve estar totalmente alinhada para juntas em ângulo, pois um pequeno desalinhamento pode causar falta de fusão lateral. No processo FCAW, devido ao arco mais largo, há uma tolerância maior para o desalinhamento da tocha, reduzindo, assim, os defeitos por falta de fusão. (Araujo, 2004).

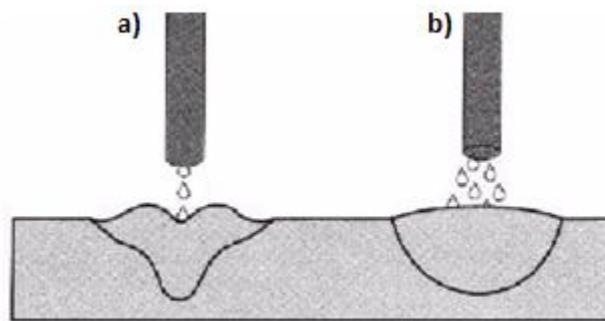


Figura 1 – geometria do cordão de solda. a) processo GMAW. b) processo FCAW. (Araujo, 2004).

### 2.1.1.GMAW

É um processo de soldagem a arco que utiliza um arco entre uma alimentação contínua de metal e a poça de fusão. Esse processo utiliza como proteção para a poça de soldagem contra contaminação do ar externo uma fonte externa de gás de proteção.

A soldagem pelo método GMAW foi introduzida em 1920 e comercializada a partir de 1948.

O processo GMAW pode ser utilizado nos modos automático, semi-automático e mecanizado. Todos os metais comercialmente importantes, tais como aços carbono, aços de alta resistência e baixa liga (HSLA), aço inoxidável, alumínio, cobre, titânio e ligas de níquel podem ser soldados em todas as posições de soldagem através da escolha apropriada de gás de proteção, de eletrodos e das variáveis de soldagem (Villani, 2006).

Como já citado no item 2.1, o processo GMAW era conhecido como processos MIG (*Metal Inert Gas*) e MAG (*Metal Active Gas*). Esse processo utiliza como fonte de calor um arco elétrico mantido entre o eletrodo nu consumível, alimentado continuamente, e o metal base. A proteção da região de soldagem é feita por um fluxo de gás inerte (MIG) ou ativo (MAG). A soldagem pode ser automática ou semi-automática.

A Figura 2 ilustra esquematicamente o processo.

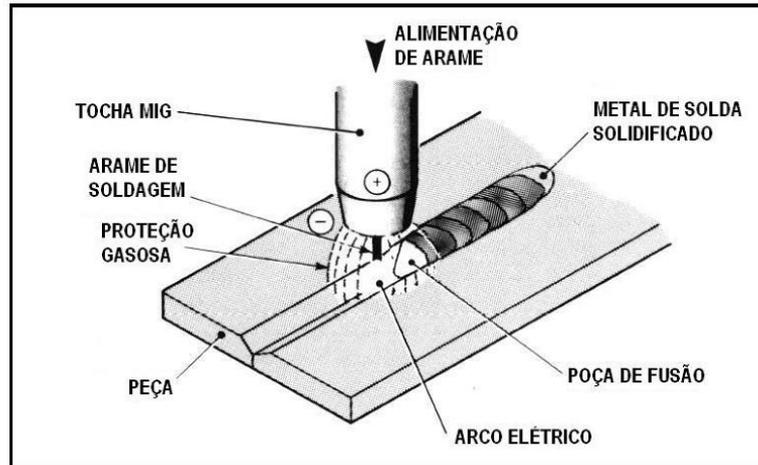


Figura 2 – Processo básico de soldagem GMAW. (Fortes, 2005)

Devido a ação do gás de proteção, o processo MIG é adequado à soldagem de aços carbono, aços de baixa, média e alta liga, aços inoxidáveis, alumínio e suas ligas, magnésio e suas ligas, cobre e suas ligas. O processo MAG é utilizado na soldagem de aços de baixo carbono e aços de baixa liga. Pode ser usado nos modos automático, semi-automático e mecanizado. (Almeida, 2004).

O processo de soldagem MIG/MAG apresenta varias vantagens, como:

- A soldagem pode ser executada em todas as posições;
- Não há necessidade de remoção de escoria;
- Alta taxa de deposição do metal de solda;
- Pode ser realizada com altas velocidades de soldagem;
- Alimentação contínua;
- Penetração de raiz mais uniforme;
- Poucos problemas de distorção e tensão residual;
- Soldagem de fácil execução;

As principais limitações do processo são:

- Maior velocidade de resfriamento aumentando, assim, a ocorrência de trincas;
- A soldagem deve ser protegida de correntes de ar;
- A soldagem não é fácil em locais de difícil acesso, pois o bocal da pistola precisa ficar próximo do metal base a ser soldado;
- Grande emissão de raios ultravioleta.
- Equipamento de soldagem mais caro e complexo que o do processo com eletrodo revestido.

O processo GMAW é influenciado por algumas variáveis, tais como: corrente de soldagem, tensão do arco, polaridade de soldagem, extensão do eletrodo (*stick-out*), posição do eletrodo, tipo de junta, diâmetro do eletrodo, características do gás de proteção e velocidade de soldagem, (Hermans, 1999).

Vale ressaltar que o conhecimento e controle destas variáveis são essenciais para a obtenção de soldas de qualidade satisfatória. Estas variáveis não são completamente independentes e mudanças em uma delas requerem mudanças em uma ou mais das outras para produzir os resultados desejados. Habilidade considerável e experiência podem ser necessárias para seleção de parâmetros para cada aplicação. Os valores ótimos são afetados pelo tipo de metal de base, pela composição do eletrodo, pela posição de soldagem e pelos requisitos de qualidade. Então, não há uma mudança única nos parâmetros que leve a um resultado ótimo em cada caso, (Vieira, 2006).

### 2.1.2.FCAW

O processo FCAW (Flux Cored Arc Welding) é aquele onde a união entre os metais é obtida através do arco elétrico entre o eletrodo e a peça a ser soldada. A proteção do arco neste processo é feita pelo fluxo interno do arame podendo ser, ou não, complementada por um gás de proteção. Além da função de proteger o arco elétrico da contaminação pela atmosfera, o fluxo interno do arame pode também atuar como desoxidante através da escória formada, acrescentar elementos de liga ao metal de solda e estabilizar o arco. A escória formada, além de atuar metalurgicamente, protege a solda durante a solidificação, (Fortes, 2004). A Figura 3 ilustra esquematicamente o processo.

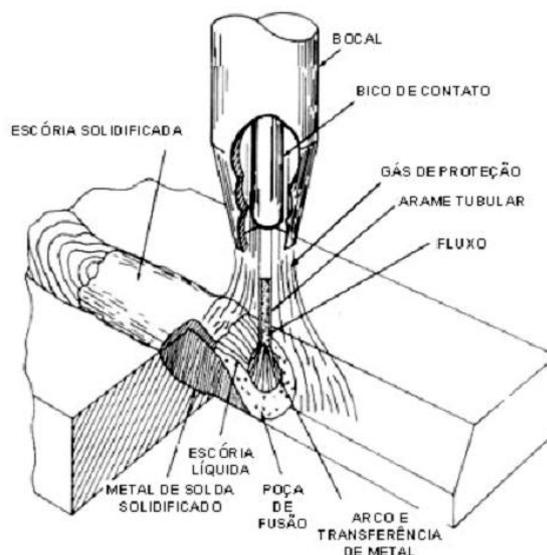


Figura 3 – Processo básico de soldagem FCAW. (Fortes, 2004)

A soldagem com arame tubular possui inúmeras semelhanças em relação ao processo GMAW no que diz respeito aos equipamentos e princípios de funcionamento. Este fato lhe permite compartilhar o alto fator de trabalho e a taxa de deposição, característicos da soldagem GMAW. Por outro lado, através da soldagem FCAW é possível obter a alta versatilidade da soldagem com eletrodos revestidos no ajuste de composição química e facilidade de trabalho em campo, (Gomes, 2006).

Os benefícios da soldagem com arames tubulares estão relacionados a algumas características, tais como:

- Produtividade relacionada à utilização de arames contínuos;
- Benefícios metalúrgicos provenientes do fluxo interno do arame.

O processo de soldagem com arame tubular tem duas variações:

• Eletrodo com proteção gasosa - o fluxo interno tem principalmente a função de desoxidante e de introdutor de elementos de liga. As funções de proteção do arco e ionização da atmosfera ficam mais a cargo do gás introduzido a parte. O gás de proteção usualmente é o dióxido de carbono ou uma mistura de argônio e dióxido de carbono. O processo de proteção a gás é apropriado para produção de peças pequenas e soldagem de elevada penetração;

• No processo sem proteção a gás, há uma diferenciação no interior da tocha e o arame é denominado autoprotégido, ou seja, o próprio eletrodo possui um fluxo interno que se encarrega de auxiliar na proteção da poça de fusão.

Como no outro processo, o FCAW tem propriedades que favorecem a sua escolha em comparação com outros processos a arco, tais como:

- A qualidade da solda depositada;
- Alta taxa de deposição;
- Alta produtividade;
- Cordões com aparências e contornos satisfatórios;
- A maioria dos aços podem ser soldados;
- É muito bom para materiais com espessuras maiores;
- Menos susceptível a trincas;
- O eletrodo autoprotégido é mais tolerante a variação do ambiente, ou seja, soldagem ao ar livre.

Em relação as suas limitações, as principais são:

- O arame tubular tem custo maior em relação ao GMAW;
- Possui escória, ou seja, necessita de uma limpeza adequada para realizar novos cordões;

- Limitado a soldagem de metais ferrosos e liga a base de níquel.
- São gerados mais fumos do que o processo GMAW.

Os arames tubulares permitem uma maior versatilidade que os arames sólidos para se adequar a alguma aplicação particular ou algum requisito especial, pela possibilidade de se alterar a formulação ou o percentual de fluxo que pode variar de 15% a 50% de seu peso, (Marques, 1991).

O processo FCAW pode ser aplicado em tubulações industriais, tanque de armazenamento, vasos de pressão, pontes, plataformas marítimas, etc. (Campos, 2005).

## **2.2.A Industrialização Frente aos Dois Processos de Soldagem**

O processo FCAW é normalmente um processo semi-automático e muito semelhante ao processo a arco com proteção por gás e eletrodo consumível (GMAW), no que diz respeito a equipamentos e princípios de funcionamento. Por outro lado, o processo também se assemelha à soldagem a arco com eletrodos revestidos (SMAW), do ponto de vista metalúrgico. Assim, a soldagem FCAW é um processo que acumula as principais vantagens da soldagem GMAW, como alto fator de trabalho do soldador, alta taxa de deposição, alto rendimento, resultando em alta produtividade e qualidade da solda produzida, bem como as da soldagem SMAW, como alta versatilidade, possibilidade de ajustes da composição química do cordão de solda e facilidade de operação em campo, (Ordóñez, 2004).

Atualmente nos vários seguimentos industriais, a construção naval ou estruturas “offshore” ganhou destaques frente ao mercado internacional. Isto surgiu devido à demanda de construções de navios, plataformas, pois o Brasil estava à mercê de algumas potências neste ramo. Vale ressaltar a Coreia como especializada em navios de grande porte, Cingapura, especializada em plataformas e navios para a indústria de petróleo “offshore”, e os Estados Unidos, que focaliza a indústria militar. A maior parte dos países europeus entrincheirou-se em nichos de navios especiais e sofisticados. O Japão constrói toda a linha de navios e luta para aumentar a produtividade e reduzir custos (Ferraz et al., 2002).

## **2.3.Arames sólidos e tubulares**

### **2.3.1.Arames Sólidos**

São arames contínuos e maciços, podendo, em alguns casos, serem protegidos por uma fina camada de cobre com o objetivo de evitar a oxidação. Os arames sólidos podem ser

utilizados para soldar diversos materiais, como: aços carbono, aços de alta liga, alumínio, cobre e aços inoxidáveis. A soldagem com arames maciços não apresenta escória e a produção da poça de fusão é totalmente dependente do gás de proteção.

Soldagens utilizando o processo GMAW são aplicadas quando se necessita elevada taxa de deposição, como no caso da recuperação de componentes de turbinas hidráulicas cavitadas. Neste caso, aplica-se, inicialmente, um material que tenha baixo custo e de baixa usinagem, como, por exemplo, o arame maciço a base de aço carbono AWS ER70S-6. Posteriormente é feita a soldagem de revestimento com arames que utilizam materiais mais nobres como o Cavitalloy, Hidrolloy, ou arames a base de aço inoxidável austenítico ou martensítico, (Moreira, 2008).

### **2.3.2. Arames Tubulares**

Arames tubulares são arames contínuos e ocos que possuem em seu interior fluxos que permitem a soldagem dos mais diversos tipos de materiais, como aços carbono, aços de alta resistência e baixa liga (HSLA) e aços inoxidáveis, além de poderem ser utilizados para depositar revestimentos duros sobre superfícies sujeitas à abrasão e ao impacto, (Fortes, 2004).

A principal diferença entre o processo com arame tubular e maciço é o metal de adição que, no arame tubular, contém em seu interior um fluxo em forma de pó. Este fluxo contém elementos desoxidantes que auxiliam na proteção e estabilidade do arco, além de poder conter elementos de liga. Segundo Lucas (1999), o fluxo contido no interior dos arames tubulares podem ser rutilico básico ou metálico, dependendo da composição química do mesmo.

#### **2.3.2.1. Arames Tubulares Tipo “Metal Cored”**

Os arames tubulares do tipo “metal cored” possuem fluxo metálico em seu interior com a função de unir o metal de solda juntamente com os elementos contidos no interior do eletrodo para aumentar a força do material depositado e também para desoxidá-lo. (Bauné, 2000).

Por apresentar elevadas taxas de deposição, mínima quantidade de escória e respingo, excelente aparência e baixo nível de fumos, o arame do tipo “metal cored” vem obtendo a preferência de muitas empresas, principalmente dos segmentos automotivos e de transporte. (Barhorst, 2000).

Segundo Araujo (2004), é possível trabalhar com velocidades e correntes de soldagem maiores com o arame tubular “metal cored” que com o arame maciço, sem prejudicar a qualidade da solda.

### **2.3.2.2 Arames Tubulares Rutílicos**

Arames tubulares rutílicos contêm em seu interior fluxos não metálicos, formadores de escória e estabilizadores do arco. Esses fluxos internos também têm a função de proteger e purificar o metal de solda além de reduzir o número de respingos e controlar as características de fusão do eletrodo.

Os fluxos rutílicos possuem grande quantidade de óxido de titânio (rutila) e alguns silicatos. Os fluxos básicos possuem grande quantidade de carbonato de cálcio (calcário) e fluoreto de cálcio (fluorita).

A queima deste fluxo durante a abertura do arco trás vários benefícios para o cordão de solda, como:

- Adição de elementos químicos desoxidantes, como Mn, Si e Al;
- Adição de elementos de liga desejada a determinadas aplicações;
- Proteção gasosa adicional nos arredores da poça de fusão;
- Proteção térmica e química pela formação de uma camada de escória.

## **2.4. Influência do gás de proteção nos processos de soldagem**

As pesquisas com os gases de proteção tiveram início na década de 1940. Durante os últimos cinquenta anos, a indústria de gás industrial contribuiu significativamente com a indústria da soldagem, produzindo e purificando gases diferentes e misturas de gases.

O gás de proteção tem uma grande influência nas características do arco, no tipo de transferência de metal, nas velocidades de soldagem, nas perdas por projeções (respingos), na penetração e na forma externa da solda, (Quites, 2002).

O gás de proteção representa 3% do custo da soldagem de um aço carbono, sendo 18% de arame, 2% de energia e 77% de mão de obra, (Irving, 1999).

Gases como Argônio ou Hélio puro produzem excelentes resultados na soldagem de materiais não ferrosos. No entanto, na soldagem com materiais ferrosos, esses gases produzem cordões irregulares. A adição de O<sub>2</sub> (1% a 5%) ou CO<sub>2</sub> (3% a 25%) aumenta a qualidade e a produtividade do cordão de solda. (Moyer, 2002). A adição de oxigênio,

segundo Suban & Tusek, reduz a tensão superficial e permite uma ionização mais fácil da mistura de gases. Os autores também relatam que a adição de gás carbônico aumenta a penetração da solda e a dureza do cordão.

A Figura 4 mostra os efeitos na geometria do cordão, quando são utilizados gases e misturas diferentes de gases: Ar + 1 a 5% O<sub>2</sub>, 75% Ar + 25% CO<sub>2</sub> e 100% CO<sub>2</sub>.

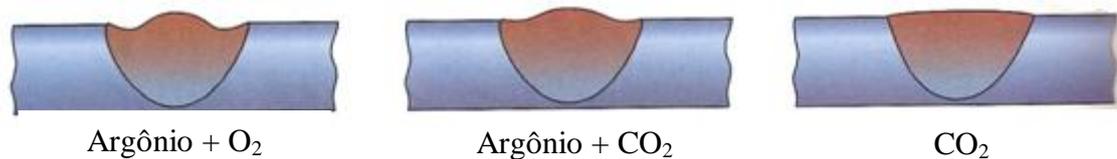


Figura 4 - Efeito do gás de proteção no perfil do cordão. (Jeffus, 2007).

Na soldagem utilizando gás inerte (MIG), o gás utilizado pode ser Ar (Argônio), He (Helio), ou misturas de gases ricos em Ar complementadas com He, O<sub>2</sub> (Oxigênio) ou CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono). O gás inerte atua na proteção da região soldada, além de auxiliar na abertura e manutenção do arco voltaico.

## 2.5. Transferências metálicas

Dentre as características fundamentais de operacionalidade e eficiência do processo, estão os modos de transferência do metal de adição, pois afetam a habilidade de soldar em varias posições, a profundidade do cordão, a estabilidade da poça de fusão e a quantidade de respingos, (Subramanian et al, 1998).

A transferência do metal depende do gás de proteção, do tipo e intensidade da corrente de soldagem, do comprimento, diâmetro e da composição química do eletrodo ou arame, (Campos, 2005).

Os principais modos de transferências metálicas são: curto circuito globular, spray, e arco pulsado.

a) *Transferência por curto circuito*: O material é transferido para poça de fusão somente quando ocorre o contato do arame com a poça, não ocorre transferência de material pelo arco elétrico. O curto-circuito ocorre em níveis relativamente baixos de corrente e tensão, possibilitando assim a soldagem de pequenas espessuras. No modo curto-circuito é possível a soldagem em todas as posições (Quites, 2002).

b) *Transferência globular*: Ocorre em níveis de tensão mais elevados que no curto-circuito. As gotas de metal fundido são transferidas para a poça de fusão principalmente pela ação da força gravitacional, o que limita a soldagem na posição plana. O diâmetro das gotas é maior que o diâmetro do arame. É comum neste modo de transferência a ocorrência de falta de fusão, falta de penetração e respingos. Não é um modo muito utilizado nas indústrias, (Quites, 2002).

c) *Transferência por spray*: A partir do globular, com aumento da corrente de soldagem, o diâmetro das gotas de metal que se transferem para a peça diminui, até certa faixa de corrente no qual o modo de transferência muda bruscamente de globular para *spray*. Esta corrente na qual ocorre esta mudança no modo de transferência é chamada corrente de transição. As gotas desta vez são pequenas e são destacadas da ponta do arame devido às certas forças magnéticas que atuam nas direções radiais e axiais. O cordão tem um bom acabamento e praticamente não há respingos. Devido aos altos níveis de corrente, a soldagem se torna difícil nas posições vertical e sobre cabeça, podendo ocorrer escorrimento a partir da poça de fusão. (Modonesi et al, 1994).

d) *Transferência por corrente pulsada*: É o modo de transferência controlada que se dá através do controle da forma de onda da corrente de soldagem, utilizando a corrente pulsada. O pulsado une as vantagens da transferência por *spray*, mas em níveis menores de corrente média, permitindo a sua utilização em chapas finas e a soldagem em todas as posições. No pulsado existem dois níveis de corrente, uma acima da corrente de transição (corrente de pico) que atua em um intervalo de tempo (tempo de pico) e outro abaixo da corrente de transição (corrente de base) que atua em um intervalo de tempo (tempo de base). O destacamento da gota formada na ponta do arame ocorre quando se sobrepõe a corrente de pico. O diâmetro da gota é aproximadamente o mesmo do eletrodo.

Na figura 5 verifica-se os modos de transferência metálica.

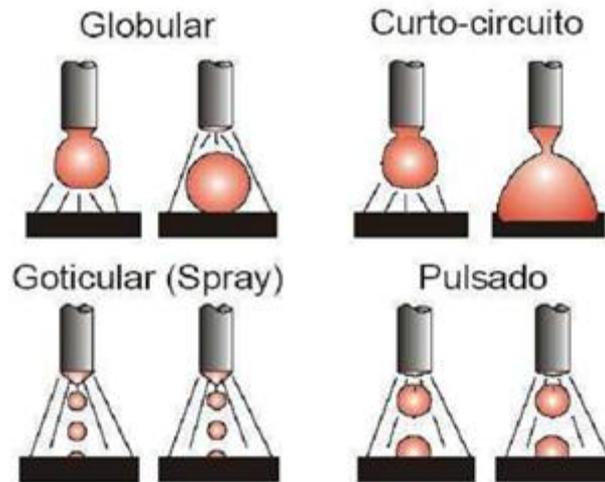


Figura 5 - Principais tipos de transferência metálica (Barra, 2003).

## 2.6.Principais variáveis de soldagem

As variáveis do processo determinam as características finais do cordão de solda, como dimensões, acabamento e propriedades mecânicas. Definem também a maior ou menor probabilidade de ocorrência de alguns tipos de defeitos, como trincas, poros, mordeduras e outros. Dimensões inadequadas do cordão de solda podem contribuir para falha de uma estrutura soldada, pois a penetração determina a capacidade de carga de tensão de uma junta soldada (Smati, 1986). Cada uma dessas variáveis pode ser controlada separadamente, apesar de que o efeito de uma está diretamente relacionado com a atuação da outra.

Diversas variáveis influenciam nas características do cordão de solda, dentre elas destacam-se a corrente de soldagem, a tensão, a velocidade de soldagem, o comprimento e diâmetro do eletrodo, a inclinação da tocha de soldagem, a proteção gasosa e a velocidade de alimentação do arame. As principais variáveis dos processos de soldagem GMAW e FCAW serão apresentadas a seguir:

*Corrente de soldagem:* influencia diretamente a taxa de deposição, o modo de transferência metálica e as características geométricas do cordão. Portanto, sua escolha dependerá da espessura das peças a serem unidas, do diâmetro do eletrodo e das características desejadas dos cordões de solda. Além disso, uma corrente de baixa intensidade pode ocasionar pouca estabilidade ao arco elétrico. Se as variáveis do processo forem mantidas constantes e o valor da corrente de soldagem for aumentado, ocorrerá aumento na

penetração e na profundidade da solda, na taxa de deposição do metal de adição e no diâmetro da gota de solda até o ponto de transição, (Alves, 2008).

No processo GMAW a corrente de soldagem está diretamente relacionada à velocidade de alimentação do arame (desde que a extensão do eletrodo seja constante). Quando a velocidade de alimentação do arame é alterada, a corrente de soldagem varia no mesmo sentido (Giraldo, 2008).

A corrente de soldagem tem grandes efeitos no processo com arames tubulares, sendo que a taxa de deposição e a penetração do processo são diretamente proporcionais ao aumento da corrente de soldagem. (Gomes, 2006).

Segundo Mostafa (2006) o aumento da corrente, na soldagem FCAW, reduz o tamanho das gotas, mas aumenta o ritmo das mesmas que, ao golpear a poça de fusão, faz com que ocorra uma penetração mais profunda.

*Tensão:* afeta tanto o modo de transferência metálica quanto a geometria do cordão. A tensão influencia diretamente o comprimento do arco que controla o perfil do cordão, a profundidade da penetração e a quantidade de respingos. Quando a tensão do arco diminui, a penetração aumenta. Quando a tensão aumenta, o comprimento do arco também aumenta, aumentando assim, a probabilidade de ocorrência de porosidade e de mordeduras. (Gomes, 2006).

*Velocidade de soldagem:* representa a taxa linear em que o arco se move ao longo da junta de solda. Pode-se observar que a penetração, primeiro aumenta e depois diminui com o aumento da velocidade de soldagem, sendo máxima para velocidades intermediárias. Quando a velocidade é muito baixa, a quantidade de material depositado por unidade de comprimento da solda aumenta, a poça de fusão fica com dimensões elevadas e o calor do arco atua diretamente na poça e não no metal de base, fazendo com que a penetração seja baixa. Por outro lado para velocidades de soldagem muito altas, a quantidade de calor transferida por unidade de comprimento é reduzida e a penetração também diminui, podendo ocorrer ainda mordeduras ao longo do cordão (Miranda, 1999).

*Extensão livre do eletrodo (stick out):* A extensão do eletrodo é a distância entre o último ponto de contato elétrico, normalmente a extremidade do bico de contato, e a peça de trabalho, conforme apresentado na Figura 6.

Quando a distância do bico de contato à peça é muito grande, pode ocorrer uma deficiência na ação do gás de proteção. Para uma taxa de alimentação fixa do arame, qualquer aumento desta distância reduz a corrente fornecida pela fonte. Sales (2001) menciona um estudo em que o aumento da distância bico de contato peça (DBCP) pode provocar um

aumento significativo do reforço do cordão de solda e diminuição da largura do cordão. Esta tendência é mais pronunciada para a soldagem com o CO<sub>2</sub> puro.

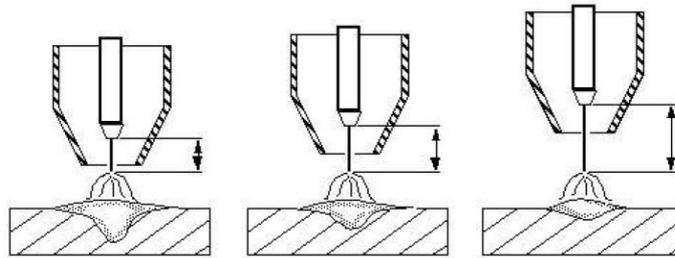


Figura 6 - Influência do “stick-out” na geometria do cordão de solda. Fonte: Wainer (1992).

Aloraier (2010) estudou a influência dos parâmetros de soldagem na geometria do cordão e verificou que a largura do cordão aumenta com o aumento da tensão de soldagem e diminui com o aumento da velocidade de soldagem.

## 2.7. Orientação do Eletrodo

A orientação do eletrodo em relação à junta soldada afeta o formato e a penetração do cordão de solda quando as outras variáveis são mantidas constantes. Esta influência é maior que a observada quando se altera a tensão e a corrente de soldagem. (Felizardo). A orientação do eletrodo pode ser descrita de duas maneiras:

- a) Ângulo da tocha: É a medida de inclinação entre o eixo do eletrodo e a superfície adjacente do metal de base.
- b) Sentido de soldagem: Tem-se nesta situação, a técnica do arraste, onde a tocha puxa a poça de fusão e a técnica do avanço, onde a tocha empurra a poça de fusão.

A Figura 7 ilustra o efeito da orientação do eletrodo na morfologia do cordão de solda. Observa-se que o cordão fica mais largo e achatado quando a tocha é usada na técnica de avanço e a penetração é máxima quando a técnica utilizada é a de arraste, com ângulo de aproximadamente 25° com a perpendicular.

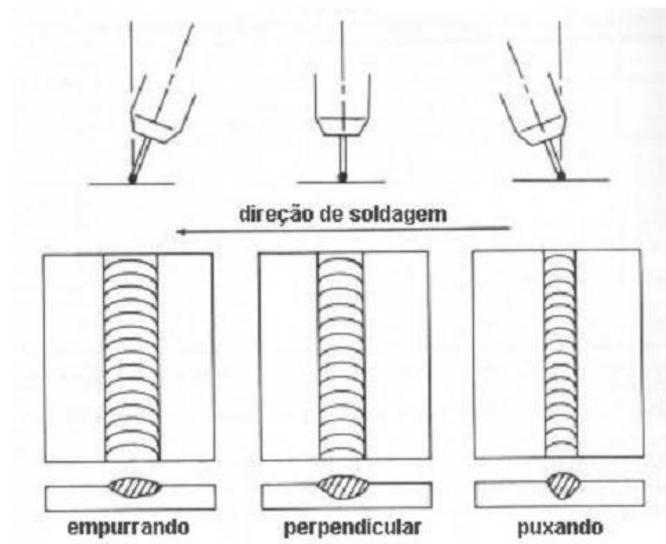


Figura 7 – Efeito da orientação do eletrodo na morfologia do cordão de solda.

(Felizardo, 2005)

## 2.8.Soldabilidade

A soldabilidade pode ser definida como a capacidade que um material apresenta de ser soldado sob as condições impostas pelos códigos e normas de fabricação para uma estrutura específica e de forma aceitável e com desempenho satisfatório nos serviços pretendidos, (AWS, 1998).

A maioria das ligas metálicas é soldável, no entanto, algumas ligas são mais difíceis que outras, dependendo do processo utilizado. Além disso, o desempenho esperado para uma junta soldada depende fundamentalmente da aplicação destinada. Assim, para determinar a soldabilidade de um material, é necessário considerar o processo e procedimento de soldagem e sua aplicação. Também é fundamental conhecer bem o material que será soldado, o projeto da solda e da estrutura e os requerimentos de serviço, como cargas, ambiente, etc. (Modonesi, 2004).

A soldabilidade dos aços carbono depende dos seus teores de C e Mn e dos níveis de impurezas. Os aços carbono com percentual de carbono de até 0,15% possuem excelente soldabilidade por não serem temperados. Aços com percentual de carbono entre 0,15% e 0,30% possuem boa solubilidade, entretanto, existe a possibilidade de endurecimento e algumas precauções devem ser tomadas. (Moreira, 2008)

## 2.9. Diluição

Na soldagem por fusão, a diluição é a parcela de metal base que entra na composição da zona fundida (metal de solda), podendo variar de 5% a 100%. Em grande parte das aplicações (em aços de baixo carbono) a diluição tem pouca importância no que diz respeito ao comportamento da junta em serviço. No entanto, em algumas aplicações especiais, a diluição se torna determinante no processo, podendo favorecer falhas durante a operação do equipamento, (Zeemann, 3003).

## 2.10. Metalurgia

### 2.10.1. Regiões da junta soldada

Em juntas soldadas, as principais regiões analisadas são: o metal base, a zona termicamente afetada (ZTA), a zona de ligação e o metal de adição. A Figura 8 ilustra esquematicamente essas regiões.

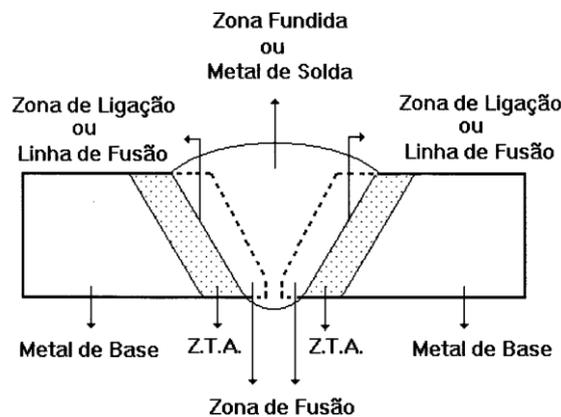


Figura 8 – regiões da junta soldada.

As características microestruturais destas regiões dependem basicamente das condições térmicas na qual a junta foi submetida e da composição química do metal de base e do metal de adição (Lancaster, 1999).

A dureza na zona termicamente afetada (ZTA), não está relacionada somente com a composição química do consumível, mas também com as condições operacionais de soldagem, as quais influem na temperatura entre passes, e, portanto, nas transformações microestruturais e, conseqüentemente, na dureza. (Fortes, 2004)

### 2.10.2. Aporte Térmico

Durante o processo de soldagem, a junta soldada é submetida a temperaturas que dependem, basicamente, da energia de soldagem e da temperatura de preaquecimento.

A energia de soldagem absorvida pela junta soldada, segundo Quites (2002), é dada pela equação 1.

$$E = \frac{\eta \times 60 \times U \times I}{v}$$

Onde:

$E$  = Energia de soldagem [J/cm];

$\eta$  = Rendimento do arco;

$U$  = Tensão de soldagem [V];

$I$  = Corrente de soldagem [A];

$v$  = Velocidade de soldagem [cm/min].

O rendimento da soldagem depende do processo empregado, sendo seu valor de  $\eta = 0,80$  para FCAW e de  $\eta = 0,78$  para GMAW, (Quites, 2002).

A repartição térmica de uma junta soldada é representada pelas temperaturas máximas atingidas ao longo da seção transversal da junta, como mostra a figura 9.

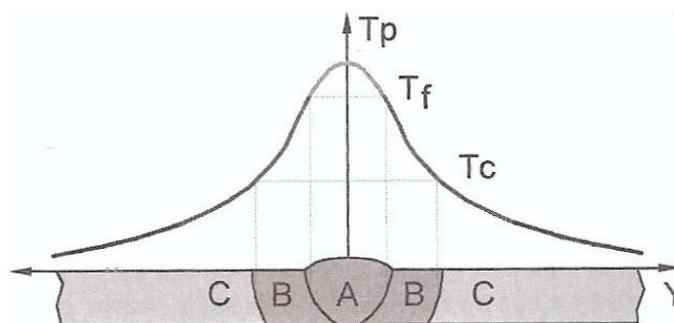


Figura 9 – Esquema das regiões de uma solda por fusão. A – zona fundida (ZF), B – zona termicamente afetada (ZTA), C – metal de base (MB). (Bracarense, 2009)

A curva de repartição térmica permite definir, para uma junta soldada por fusão, três regiões básicas:

- *Metal base*: Região mais afastada da solda. Não é afetada pelo processo de soldagem.

As suas temperaturas de pico são inferiores a temperatura crítica do material.

• *Zona termicamente afetada (ZTA)*: Região não fundida do metal base que teve sua microestrutura alterada pelo ciclo térmico de soldagem. As temperaturas de pico desta região foram superiores à temperatura crítica do material em questão e inferiores à sua temperatura de fusão.

• *Zona fundida*: Região onde o metal fundiu-se e solidificou-se durante a operação de soldagem. As temperaturas de pico desta região foram superiores a temperatura de fusão do metal base.

O ciclo térmico da soldagem influencia fortemente as reações e alterações estruturais ocorridas em determinadas regiões do material, (Bracarense, 2009). A Figura 10 representa as alterações e reações esperadas na soldagem a arco de um aço de baixo carbono, para um ponto situado na zona fundida.

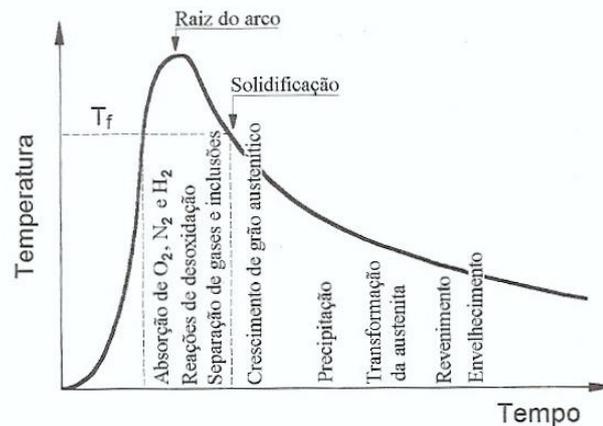


Figura 10 - Diagrama esquemático mostrando diferentes alterações que podem ocorrer na zona fundida em uma solda em um aço de baixo carbono. (Bracarense, 2009)

Combinação de grãos grosseiros e altas taxas de resfriamento podem formar fases frágeis e duras no metal fundido e na ZTA de aços soldados. Além disso, a presença de hidrogênio difundido na soldagem pode causar o trincamento a frio do conjunto soldado (Kou, 1987).

### 2.10.3. Metalografia

As fases que podem ser formadas na soldagem de um aço de baixa liga são:

• Ferrita (F): solução sólida intersticial de ferro e carbono com estrutura CCC (cúbica de corpo centrado);

- Ferrita de contorno de grão (GF): ferrita pró-eutóide que cresce longitudinalmente e é anterior a austenita de contorno de grão. Pode ser equiaxial ou poligonal;
- Ferrita primária (PF): ferrita formada imediatamente após a solidificação e não associada ao contorno de grão;
- Ferrita com segunda fase alinhada (FS (A)): ferrita com placas laterais;
- Ferrita com segunda fase não alinhada (FS (NA)): ferrita com distribuição de micro fases;
- Ferrita com carbonetos agregados (FC): ferrita refinada juntamente com estrutura de carbonetos;
- Ferrita acicular (AF): pequenos grãos de ferrita não alinhados encontrados dentro dos grãos de austenita. É gerada pelo cisalhamento da matriz austenítica e pela difusão de carbono para a austenita remanescente;
- Austenita (A): solução sólida intersticial de ferro e carbono com estrutura CFC (cúbica de face centrada);
- Martensita (M): solução sólida intersticial de ferro e carbono com estrutura TCC (tetragonal de corpo centrado).

Segundo Kaçar (2005), a ferrita acicular é a microestrutura responsável pelo aumento da tenacidade de metais de solda de aço carbono de baixa liga.

A Figura 11 ilustra algumas das principais fases encontradas na soldagem em aço de baixo carbono.

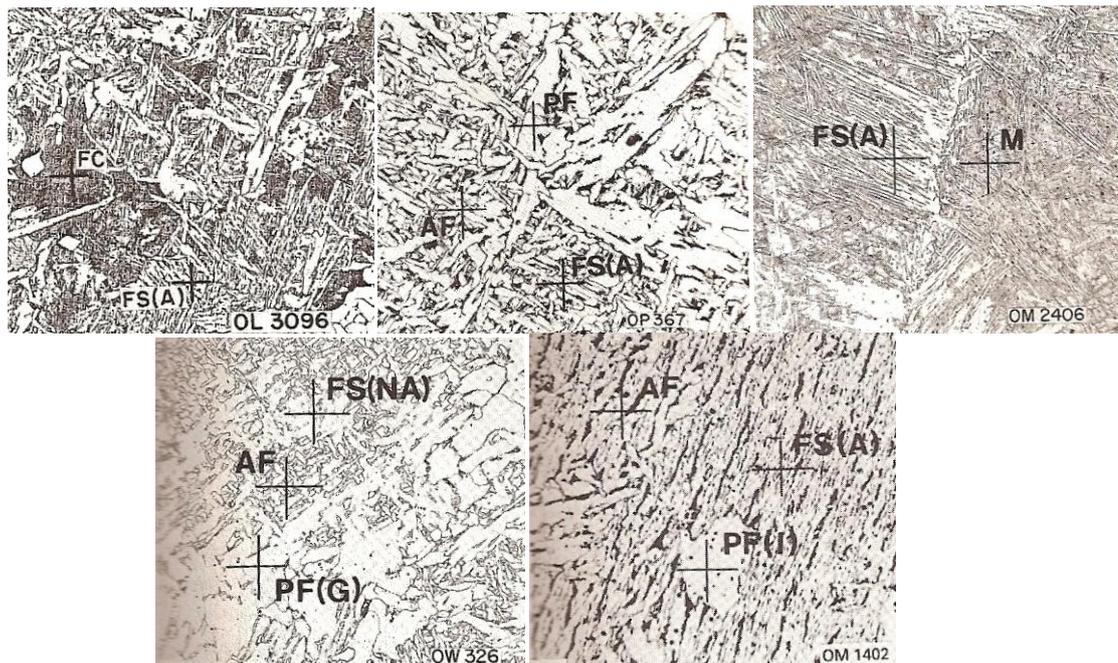


Figura 11 – Principais fases encontradas na soldagem de aços de baixa liga onde PF: ferrita primaria, PF (G): ferrita de contorno de grão, PF (I): ferrita intergranular poligonal, AF: ferrita acicular, FS (A): ferrita com segunda fase alinhada, FS (NA): Ferrita com segunda fase não alinhada, FC: ferrita com carboneto agregado (inclui perlita), M: Martensita.

(Lancaster, 1999)

O refino de grãos de ferrita acicular pode ser obtido adicionando elementos de liga como Ti e Nb, que atuarão como obstáculos ao movimento dos contornos de grão de austenita inibindo o seu crescimento e fazendo com que a ferrita acicular formada em seu interior seja mais refinada, (Moreira, 2008).

## **2.11. Técnica de projetos e análise de experimentos**

O planejamento de experimentos, ou DOE (Design Of Experiments) é definido como “uma abordagem sistemática e rigorosa para a resolução de problemas de engenharia, que aplica princípios e técnicas na fase de coletas de dados de modo a assegurar a geração de conclusões de engenharia válida, defensável e suportáveis.” (NIST, 2000)

A técnica de projetos e análise de experimentos teve início na década de 30, entretanto, é ainda pouco conhecida. Esta técnica vem despertando o interesse no meio acadêmico após as idéias do Dr. Genesi Tagushi terem sido apresentadas nos anos 80.

Estudos relatam o sucesso da aplicação do projeto de análise de experimentos, como a redução do índice de defeitos em um determinado processo de soldagem de 47% para 0,074%, sendo realizados apenas 18 testes contra os mais de 2000 que seriam necessários. (Mont’Alvão, 1998).

Algumas aplicações datam mesmo das primeiras décadas do século, com os trabalhos pioneiros de Fisher e Student (citado por Neto et al, 1995). De acordo com Montgomery (1991), Fisher foi o inovador da utilização de métodos estatísticos no projeto experimental, mas há outras contribuições significantes de Yates, Bose, Kempthorne, Cochran e Box.

Segundo Konda et al (1999), muitas indústrias têm utilizado esta técnica para a resolução de seus problemas, conhecendo melhor o processo e melhorando suas dispersões.

O planejamento experimental, baseado nos fundamentos estatísticos é uma poderosa ferramenta para se chegar as condições otimizadas de um processo. (Haas, 2010).

A determinação da influência de uma ou mais variáveis sobre outras de interesse, pode ser um grande problemas para os experimentadores.

Assim, a condução adequada dos experimentos, de acordo com o planejamento elaborado, garante o sucesso do problema em estudo. Durante a sua realização, deve-se estar atento para detectar as anormalidades ocorridas, além de documentá-las para posterior análise, quando, então, serão estimados os fatores incluídos no modelo utilizando métodos estatísticos adequados, culminando na inferência, interpretação, discussão dos resultados, além da recomendação de melhorias, quando necessário.

Uma vez selecionados os fatores e seus respectivos níveis, gera-se uma combinação desses fatores sob a forma de arranjos experimentais. O arranjo mais comum é o fatorial completo, para o qual o número de experimentos é igual ao número de níveis experimentais, elevado ao número de fatores. No caso típico de fatoriais em dois níveis, o número de experimentos é dado por  $N=2^k$ . Fatoriais completos cobrem todo o espaço experimental. Entretanto, devido ao seu crescimento exponencial, arranjos com grande número de fatores podem tornar um processo de experimentação inviável. Para esses casos, Montgomery & Runger (2003), afirmaram que, se houver pouco interesse nas interações, pode-se negligenciá-las, gerando-se frações do experimento completo sem comprometer, entretanto, a detecção da presença de fatores influentes.

Para a área industrial, normalmente procura-se extrair o máximo de informações sobre a influência dos fatores de entrada, pois estas são as variáveis que controlam o processo, sobre as respostas (fatores de saída) ou variáveis de interesse. Esse procedimento é feito com o menor número possível de observações, visando a diminuição de custo e a maximização da rapidez.

Dentre as técnicas de análise de experimentos, destaca-se o DOE (*Design of Experiments*), que é um método econômico de experimentos que identifica as variáveis que mais influem no processo realizando um número mínimo de experimentos. Desta forma, obtém-se maior desempenho do processo, minimizando a variabilidade e os custos envolvidos. (Bussoloti, 2005). Este processo foi elaborado para determinar, entre vários fatores, qual é o mais influente no processo. Antony et al (1998) cita o DOE como uma das técnicas mais importantes para a melhoria de qualidade.

Embora o DOE seja considerada uma poderosa ferramenta para melhorar os processos, sua aplicação real em situações reais permanece um pouco limitada, (Tanco et al., 2008).

O DOE calcula o erro experimental do estudo realizado. Caso seja maior do que 15% são possíveis que um ou mais dos seguintes fatores tenham acontecido (Antony, 2003):

- Mais de uma variável atua no experimento;
- Falta de bloqueio das variáveis que não influenciam no processo;
- Falta de calibração nos equipamentos ou uso de equipamentos não confiáveis.

Gunaraj & Murugan (2000) desenvolveram trabalhos nesta área, como o desenvolvimento de modelos matemáticos na previsão e otimização do volume de um cordão de solda para um processo de arco submerso utilizando a metodologia de superfície de resposta com precisão de aproximadamente 98% de confiabilidade. Esses mesmos autores também desenvolveram modelos matemáticos para verificar a influência dos parâmetros no formato da ZTA (1999).

Rowlands e Antony (2003) fizeram uma análise dos parâmetros de soldagem por resistência elétrica na resistência mecânica da solda, gerando modelos matemáticos.

Junior (2003) utilizou a metodologia de superfície de respostas para otimizar um processo de solda MIG/MAG, gerando resultados bastante confiáveis.

Solana & Ocaña (1997) desenvolveram modelos matemáticos para explicar os principais mecanismos físicos que têm surgido na penetração de soldagem laser. Outros modelos também têm sido aplicados para avaliar as características mecânicas da dinâmica de máquinas para soldagem por resistência elétrica, estudaram Wu, Zhang e Bay (2005).

Siva, Almeida, Mota e Braga (2007) compararam dois modelos matemáticos desenvolvidos por análise de regressão múltipla para as características geométricas dos cordões de solda.

Um projeto de análise de experimentos geralmente segue os seguintes passos:

1. Definição do objetivo do experimento, ou seja, o que se pretende analisar para gerar dados confiáveis e respostas apropriadas;
2. Seleção da resposta;
3. Seleção das variáveis do processo;
4. Determinação dos níveis de cada fator;
5. Escolha do projeto de experimento adequado;
6. Planejamento do experimento que consiste em selecionar a matriz experimental com os fatores e níveis escolhidos;
7. Execução;
8. Análise e interpretação dos resultados.

### **2.11.1.Planejamento Fatorial Completo $2^k$**

Aplicações:

Em processos nos quais já se tem um prévio domínio e que a realização das corridas não demanda alto tempo ou custo.

Principais vantagens:

Permite a varredura completa da região de estudo, pois utiliza todos os fatores e seus repetíveis níveis.

Principais desvantagens:

Não identifica variação intermediária, pois só trabalha em dois níveis, além de demandar um alto número de corridas para problemas com grande número de variáveis.

Empresas que começam a utilizar o DOE como ferramenta de melhoria devem estar cientes dos potenciais problemas que podem surgir pelo caminho (Firka, 2011).

### **2.11.2. Metodologia da Superfície de Resposta (MSR)**

A metodologia de superfície de resposta é um agrupamento de ferramentas matemáticas e estatísticas usado para modelagem e análise de problemas em que a resposta desejada é influenciada por diversas variáveis tem como objetivo otimizar essas respostas, (Montgomery, 2005)

O método da superfície de resposta é muito útil para a modelação e análise de problemas nos quais as respostas são influenciadas por várias variáveis e o grande objetivo é a otimização das respostas, (Gil, 2003).

De acordo com Montgomery (1991), a superfície de resposta é representada pela seguinte função:

$$Y = f(x_1, x_2, \dots, x_k) + \epsilon$$

Onde  $x_1, x_2, \dots, x_k$  representam os fatores de entrada e  $\epsilon$  o erro experimental observado na resposta.

A figura 12 representa graficamente o MSR

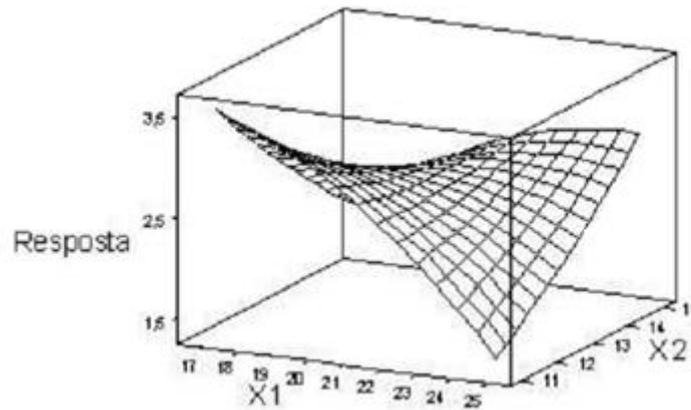


Figura 12 – Exemplo de gráfico de superfície de resposta para  $x_1$ ,  $x_2$  (Junior, 2003).

Ainda segundo Montgomery (1991), a grande maioria dos problemas de MSR, não se conhece a relação entre os fatores de entrada e saída. Portanto, esta relação deve ser aproximada usando, geralmente, polinômios de primeira ordem, ou, se o processo é relativamente próximo ao ótimo, um polinômio de segunda ordem. A seguir, serão apresentadas as funções de primeira e segunda ordem com seguintes variáveis de entrada:  $x_1$ ,  $x_2$  e  $x_3$ .

- Primeira ordem:

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3$$

- Segunda ordem:

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3$$

Como uma das principais técnicas do Projeto e Análise de Experimentos, a Metodologia de Superfície de Resposta tem sido utilizada com frequência por vários pesquisadores, contribuindo para a otimização e para um melhor entendimento dos fenômenos que caracterizam os mais diversos processos de fabricação. Sendo assim, casos de sucesso no emprego desta metodologia podem ser observados em Nilo Júnior (2003), Correia et al. (2005), Palani e Murugan (2007), Rodrigues et al. (2008), Balasubramanian et al. (2009a) e Lakshminarayanan e Balasubramanian (2009).

## CAPÍTULO 3

### Materiais e Métodos

Neste trabalho foram utilizados seis tipos de arames, sendo dois sólidos (GMAW) e quatro tubulares (FCAW), todos doados pela ESAB. Os nomes dos arames são: ER70S-6, E71T-1 (rutílico) e E70C-6M (tipo “metal cored”), com diâmetros de 1,0 e 1,2 mm. A composição dos arames é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição química dos arames.

<b>Material</b>	<b>C (%)</b>	<b>Si (%)</b>	<b>Mn (%)</b>	<b>P (%)</b>	<b>S (%)</b>	<b>Cu (%)</b>
ER70S-6	0,06 – 0,15	0,80 – 1,15	1,40 – 1,85	0,025	0,035	0,50
E71T-1	0,03	0,55	1,45	0,013	0,01	
E70C-6M	0,12	0,90	1,75	0,03	0,03	0,50

O material utilizado para a confecção dos corpos de prova foi o aço ASTM A-36, com 200 x 160 x 3 mm. Na Tabela 2 é possível verificar a composição química do aço A-36.

Tabela 2 – Composição química típica para o aço ASTM A-36.

<b>C (%)</b>	<b>Si (%)</b>	<b>Mn (%)</b>	<b>Ni (%)</b>	<b>Mo (%)</b>	<b>P (%)</b>	<b>S (%)</b>	<b>Cu (%)</b>	<b>Al (%)</b>	<b>V (%)</b>
0,17	0,23	0,62	0,01	0,013	<0,027	<0,018	<0,3	<0,1	<0,1

Foram feitas soldas sobre chapas (BOP) e soldas em chanfro, sendo que o chanfro foi fresado no sentido de seu comprimento (200 mm) para a formação de um ângulo de aproximadamente 30°, conforme o esquema mostrado na figura 13. Para a realização dos ensaios fez-se um planejamento fatorial completo.

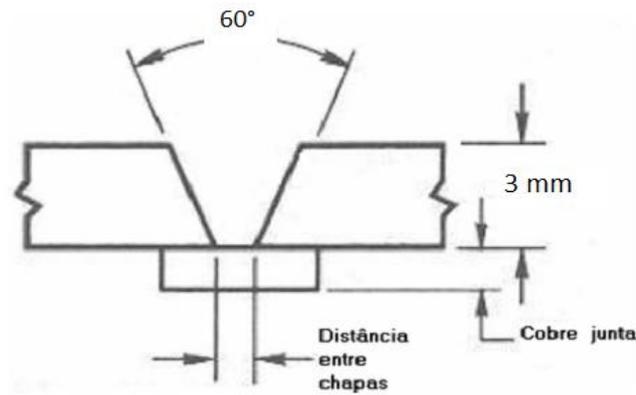


Figura 13 – Esquema da junta a ser soldada.

Os ensaios foram divididos em duas etapas. Em ambas as etapas foram avaliadas tensão, corrente e velocidade de soldagem. Na primeira etapa, em que as soldas foram realizadas sobre chapas, avaliou-se a soldabilidade e as propriedades geométricas dos aços soldados com os dois processos (GMAW e FCAW). Na segunda etapa, em que as soldas foram realizadas em chanfro, verificaram-se as propriedades mecânicas (dureza e resistência à tração) do aço soldado.

### 3.1.Preparação das Amostras

#### 3.1.1.Delineamento dos Experimentos

Para que os cordões de solda fossem realizados de maneira econômica utilizou-se o método de delineamento de experimentos (DOE) com fatorial completo ( $2^3$ ) com três pontos centrais e uma réplica, totalizando dezoito experimentos para cada arame.

Esta técnica também permite avaliar quantitativamente a influência das variáveis nas propriedades geométricas dos cordões. As variáveis foram selecionadas conforme a indicação do fabricante para se obter uma solda de qualidade e são mostradas nas Tabelas 3, 4 e 5.

Tabela 3 – Quadro resumo dos ensaios a serem realizados com o arame ER70S-6.

ER70S-6					
Diâmetro (mm)	Variáveis	Abaixo	Referência	Acima	Planejamento Fatorial
1,0	Tensão (V)	22,5	25	27,5	$2^3$ 8 ensaios
	Corrente (A)	171	190	209	
	Velocidade de	31,9	46,5	62,3	

	Soldagem (cm/min)				
1,2	Tensão	23,85	26,5	29,15	2 <sup>3</sup> 8 ensaios
	Corrente	225	250	275	
	Velocidade de Soldagem	31,9	46,5	62,3	
Total de testes					16 ensaios

Tabela 4 – Quadro resumo dos ensaios a serem realizados com o arame E71T-1.

E71T-1					
Diâmetro (mm)	Variáveis	Abaixo	Referência	Acima	Planejamento Fatorial
1,0	Tensão (V)	26,1	29	31,9	2 <sup>3</sup> 8 ensaios
	Corrente (A)	207	230	253	
	Velocidade de Soldagem (cm/min)	31,9	46,5	62,3	
1,2	Tensão	31,05	34,5	37,95	2 <sup>3</sup> 8 ensaios
	Corrente	310,5	345	379,5	
	Velocidade de soldagem	31,9	46,5	62,3	
Total de testes					16 ensaios

Tabela 5 – Quadro resumo dos ensaios a serem realizados com o arame E70C-6M.

E70C-6M					
Diâmetro (mm)	Variáveis	Abaixo	Referência	Acima	Planejamento Fatorial
1,0	Tensão (V)	26,1	29	31,9	2 <sup>3</sup> 8 ensaios
	Corrente (A)	220,5	245	269,5	
	Velocidade de Soldagem (cm/min)	31,9	46,5	62,3	
1,2	Tensão	29,7	33	36,3	2 <sup>3</sup> 8 ensaios
	Corrente	292,5	325	357,5	
	Velocidade de soldagem	31,9	46,5	62,3	
Total de testes					16 ensaios

### 3.2.Soldas sobre chapas

A primeira etapa consistiu na separação das chapas para a realização dos cordões de solda sobre a chapa BOP (*bead on plate*) para verificar os parâmetros ótimos para a

soldabilidade do aço ASTM A-36 considerando as principais variáveis: tensão, corrente e velocidade de soldagem.

No caso da vazão dos gases de proteção serão utilizados os parâmetros determinados pelo fabricante inicialmente. Isto será uma análise preliminar que poderá sofrer modificações dependendo do resultado final do cordão de solda depositado na chapa.

Os parâmetros recomendados pelo fabricante dependem de cada tipo de arame utilizado. Isto facilita o entendimento, pois na avaliação da soldabilidade, da microestrutura, da geometria do cordão e das propriedades mecânicas, estes parâmetros serão verificados e computados para verificar qual a melhor solução para uma determinada situação.

Os parâmetros fixos utilizados na soldagem são mostrados na Tabela 6.

Tabela 6 – Parâmetros fixos de soldagem.

Gás de proteção: 95% Ar + 5% O <sub>2</sub>
Vazão do gás: 18 l/min
Distância bico/peça: 17 mm
Polaridade: CC <sup>+</sup>
Velocidade de Alimentação: 4,4 – 18 m/min

Os testes foram realizados no banco de ensaios do Laboratório de Soldagem da Unifei (LSO), como ilustra a Figura 14 utilizando uma fonte de soldagem multiprocessos Aristopower 460, com cabeçote Feed 3004, com refrigeração a óleo.



Figura 14 – Banco de ensaios. 1- fonte de soldagem. 2- gás de proteção. 3- tocha. 4- carro tartaruga. 5- corpo de prova.

As soldas sobre chapas foram realizadas conforme ilustra a Figura 15.

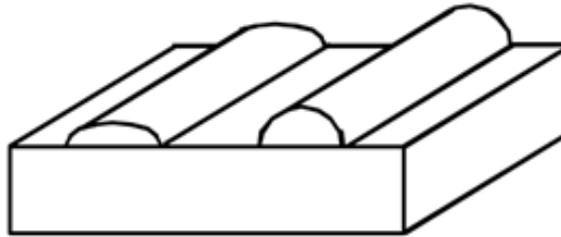


Figura 15 – Esquema de soldas sobre chapas (BOP).

Após a realização das soldas sobre chapas, os corpos de prova foram cortados transversalmente no centro do cordão onde há maior estabilidade por meio de um disco de corte. Em seguida, as amostras foram lixadas, polidas e atacadas com uma solução de Nital 4% por aproximadamente dez segundos.

Para a realização das ampliações dos cordões de solda em 10X, utilizou-se o Estereoscópio Olympus, modelo: SZ61, com zoom de 6,7x – 45X e o Software Analysis FIVE, digital Imaging Solutions Olympus, conforme a Figura 16. Através desse software também foram feitas as medidas de altura, largura e penetração dos cordões de solda.



Figura 16 – Estereomicroscópio utilizado para ampliação dos cordões de solda.

As propriedades geométricas dos cordões foram avaliadas de acordo com o mostrado na Figura 17.

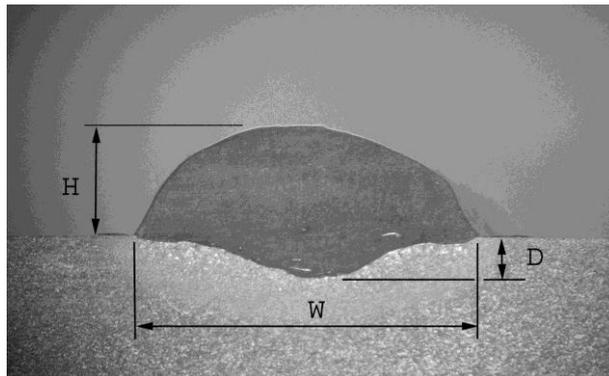


Figura 17 – Representação das características geométricas do cordão. W – largura, H – reforço e D – profundidade do cordão. (Barbedo, 2007)

### 3.3.Soldas em junta

Para a solda em junta, o esquema seguiu conforme a Figura 13 apresentada anteriormente. Nele constaram duas chapas com geometria e ângulo específicos. As soldas em junta foram realizadas a partir do momento em que se conheceram os melhores parâmetros para soldagem, ou seja, a partir das soldas obtidas sobre as chapas.

### 3.4.Preparação dos corpos de prova para ensaios mecânicos

Após a realização das soldas em chanfro, os corpos de prova foram preparados para os ensaios mecânicos. Os ensaios realizados foram: dureza, tração e análise metalográfica.

#### 3.4.1. Teste de Dureza

A avaliação da microdureza foi feita através do método Vickers com carga de 0,5 N, aplicado na seção transversal da solda em vários pontos espaçados igualmente, no metal base (MB), na zona termicamente afetada (ZTA) e no metal de adição (MA), possibilitando a obtenção de um perfil de microdureza ao longo desta seção transversal conforme o esquema da figura 18.

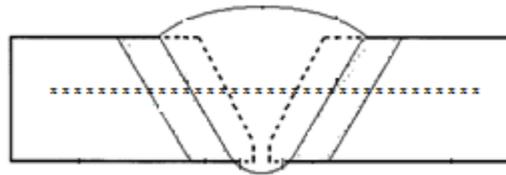


Figura 18 – Esquema da realização dos ensaios de microdureza.

Os ensaios foram realizados através do Microdurômetro Digimes, modelo Microhardness Tester HV – 1000. Foram marcados 48 pontos com distâncias de 0,11 mm entre eles.



Figura 18 – Microdurômetro utilizado para ensaios de microdureza Vickers.

### 3.4.2. Teste de Tração

O ensaio de tração foi realizado em corpos de prova de seção transversal, no qual o eixo longitudinal do corpo de prova é perpendicular ao eixo longitudinal da solda. Os corpos de prova foram retirados das chapas soldadas nos processos GMAW e FCAW. Para cada situação foram ensaiados três corpos de prova, ou seja, as amostras foram retiradas no início, no meio e no final da chapa soldada para que pudessem ser comparadas, totalizando dezoito corpos de prova. A Figura 19 ilustra um exemplo de corpo de prova para o ensaio de tração.

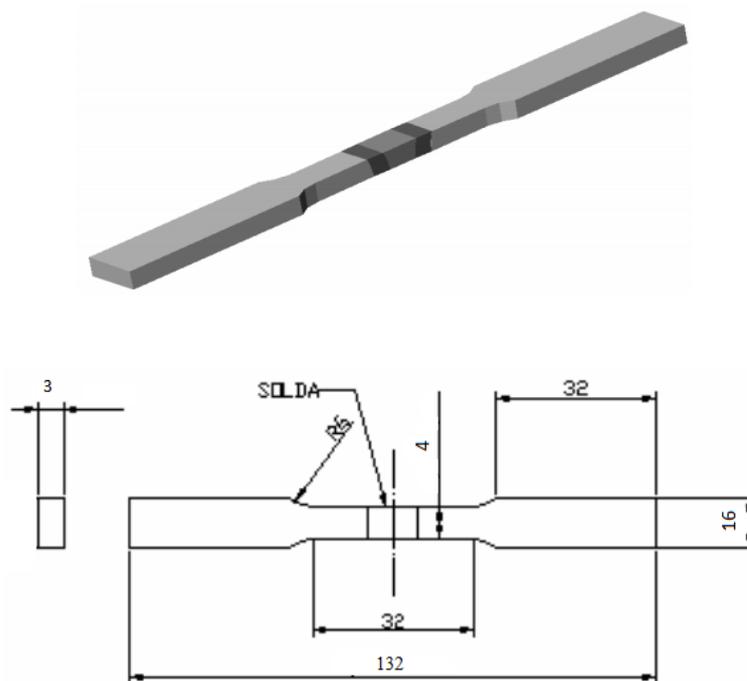


Figura 19 – Corpo de prova para ensaio de tração.

Os ensaios de tração foram realizados no Laboratório de Ensaios Destrutivos e Não Destrutivos da UNIFEI, utilizando a Máquina Universal de Ensaios, modelo DL3.000, com capacidade de até 3000 kgf (30 kN), marca EMIC, com o software Tesc, versão standard, como demonstra a figura 20.



Figura 20- Equipamento utilizado para os ensaios de tração.

Na Tabela 7 são mostrados os valores médios esperados para o ensaio de tração do aço ASTM A-36.

Tabela 7. Propriedades mecânicas para o aço ASTM A-36.

Limite de escoamento – $\sigma_{0,2}$ (MPa)	Limite de resistência à tração (MPa)	Deformação total (%)
250 – 270	400 – 550	23

### 2.4.3. Microestrutura

A caracterização microestrutural foi realizada preparando os corpos de prova cortando-os no sentido transversal da solda e atacando-os com o reagente Nital 4%. Em seguida, foram feitas as análises microestruturais. Os resultados obtidos para as situações aplicadas foram comparados entre si nas regiões: metal de metal base, ZTA e metal de adição. As microestruturas dos corpos de prova foram analisadas através do Microscópio ZEISS, modelo Genavert com aumento de 500 vezes, conforme ilustra a Figura 21.



Figura 21 – Microscópio utilizado para observar a microestrutura dos corpos de prova.

## CAPÍTULO 4

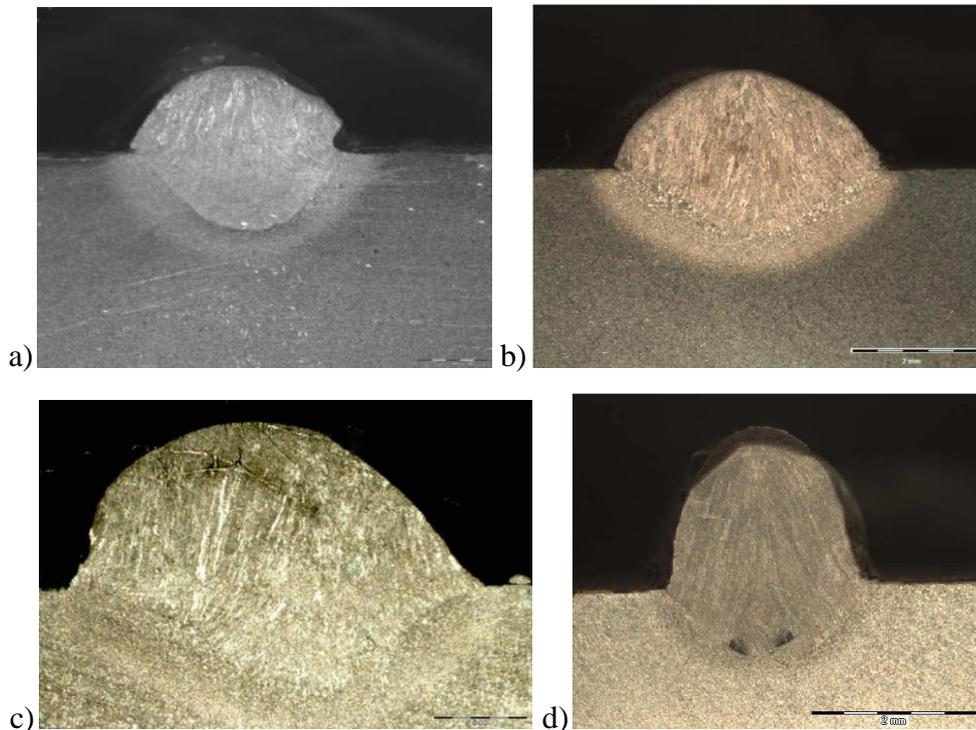
### RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 4.1. Delineamento dos Experimentos

O plano ilustrado nas Tabelas 3, 4 e 5 foram feitos utilizando o DOE e aplicados na soldagem. Porém, na prática, os valores não foram exatamente iguais aos teóricos, devido ao ajuste analógico da máquina de solda. Os resultados teóricos e práticos de todos os ensaios realizados estão anexados no apêndice A.

Após a soldagem, os corpos de prova foram cortados a frio, lixados, polidos e atacados com solução de nital 4%. Os corpos de prova que apresentaram maior penetração, ou seja, os parâmetros ótimos são mostrados na Tabela 8. Os demais parâmetros estão presentes no Anexo A.

Na Figura 22 é possível verificar a formação dos cordões feitos em BOP.



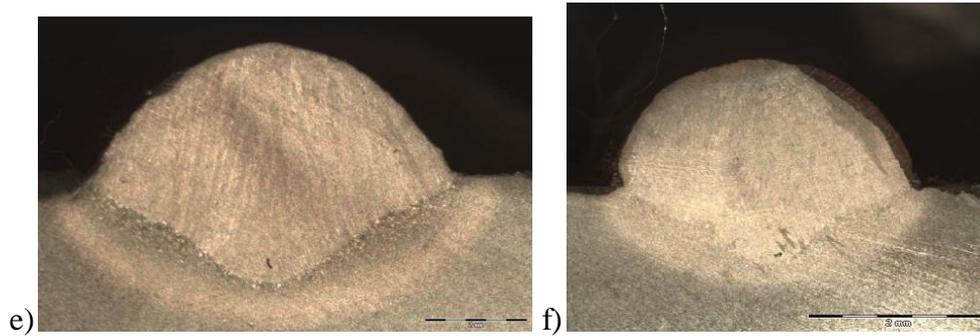
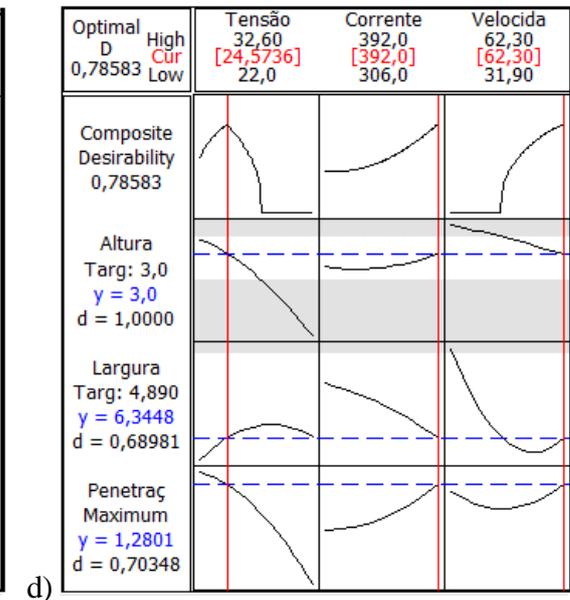
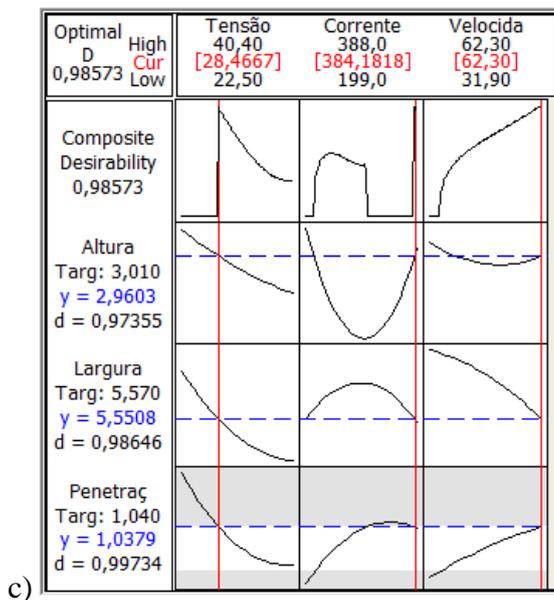
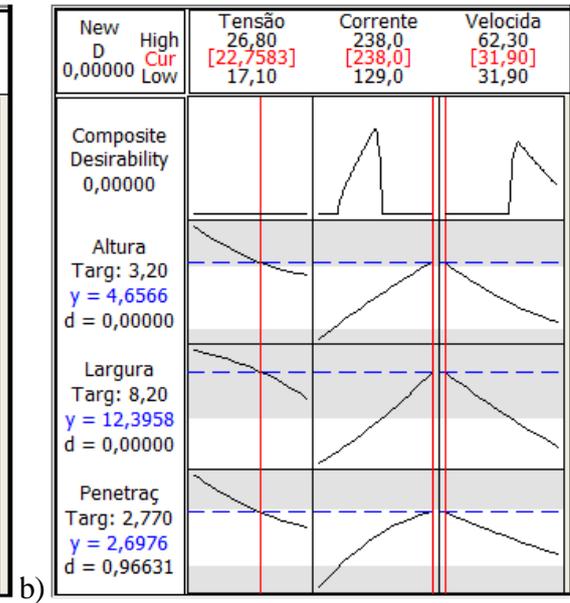
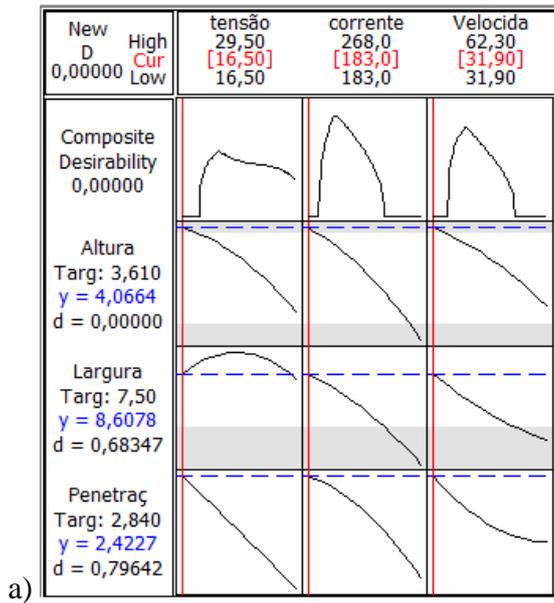
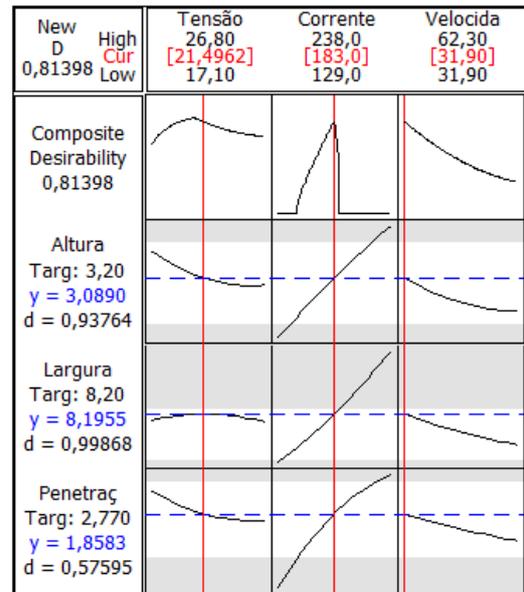
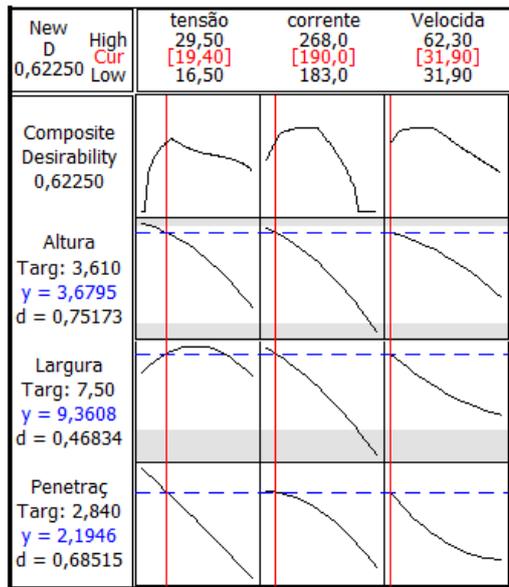


Figura 22 – Corpos de prova em seus parâmetros ótimos. a) ER70S-6 (1,2 mm). b) ER70S-6 (1,0 mm). c) E71T-1 (1,2 mm). d) E71T-1 (1,0 mm). e) E70C-6M (1,2 mm). f) E70C-6M (1,0 mm)

Tabela 8. Parâmetros ótimos das soldas sobre chapas.

Arame e diâmetro	Tensão (V)	Corrente (A)	Velocidade de soldagem (cm/min)	Altura (mm)	Largura (mm)	Penetração (mm)
ER70S-6 1,2 mm	19,4	190	31,9	3,84	9,1	2,38
ER70S-6 1,0 mm	21,5	183	31,9	3,2	8,2	2,77
E71T-1 1,2 mm	19	220,3	62,3	3,01	5,57	1,04
E71T-1 1,0 mm	17,1	223	62,3	3,00	4,89	1,63
E70C-6M 1,2 mm	17,2	240	46,5	2,76	7,38	2,02
E70C-6M 1,0 mm	22	225	46,5	4,06	9,18	2,44

Os dados da tabela 8 foram inseridos no *Response Optimizer* do *software Minitab* para verificar a influência dos parâmetros na geometria do cordão de solda.



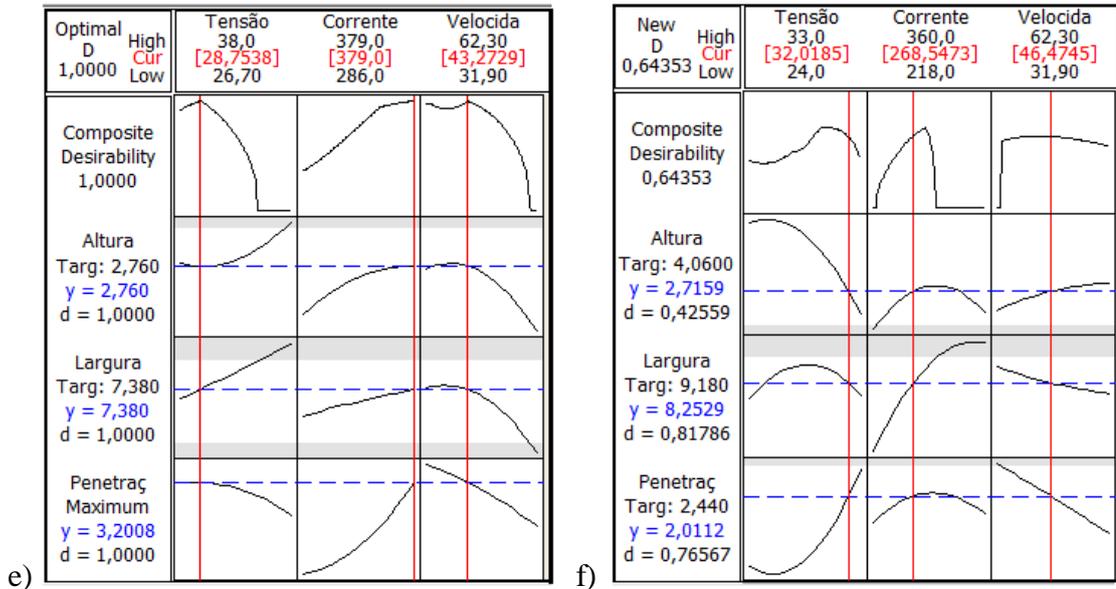


Figura 23 – Influência dos parâmetros de soldagem na geometria do cordão. a) ER70S-6 (1,2 mm). b) ER70S-6 (1,0 mm). c) E71T-1 (1,2 mm). d) E71T-1 (1,0 mm). e) E70C-6M (1,2 mm). f) E70C-6M (1,0 mm).

Na figura 23 *d* representa o que se deseja obter em cada resposta e *D* é o valor das desejabilidades combinadas de todas as respostas. Quanto mais próxima *d* estiver de 1, também *D* estará mais próxima de 1 e assim todas as respostas estarão próximas ao ótimo especificado nas faixas aceitáveis. Neste trabalho, onde se deseja penetração máxima, as desejabilidades individuais ficaram dentro das faixas aceitáveis, apenas a solda com arame E70C-6M com 1,2 mm de diâmetro obteve  $D=1$ .

A influência dos parâmetros de soldagem na geometria do cordão será discutida a seguir:

a) ER70S-6 (1,2 mm): A altura decresce à medida que a tensão, a corrente e a velocidade de soldagem crescem. A largura também diminui com o aumento dos parâmetros de soldagem. No entanto, sua relação com a variação de tensão é parabólica. A penetração diminui à medida que a tensão, corrente e velocidade de soldagem aumentam.

b) ER70S-6 (1,0 mm): A altura, a largura e a penetração diminuem quando a tensão e a velocidade aumenta quando a corrente aumenta.

c) E71T-1 (1,2 mm): A influência da corrente na geometria do cordão varia de forma parabólica. No entanto, as desejabilidades individuais são alcançadas, pois se consegue atingir  $d=1$  na geometria do cordão de solda. A penetração diminui à medida que a tensão aumenta e aumenta à medida que a corrente e a velocidade aumentam.

d) E71T-1 (1,0 mm): A altura atinge a desejabilidade ideal ( $d = 1$ ) para o parâmetro de máxima penetração. A largura do cordão fica fora da desejabilidade ideal. A penetração diminui com o aumento da tensão e aumenta com o aumento da corrente e da velocidade de soldagem, pois se aumenta o aporte.

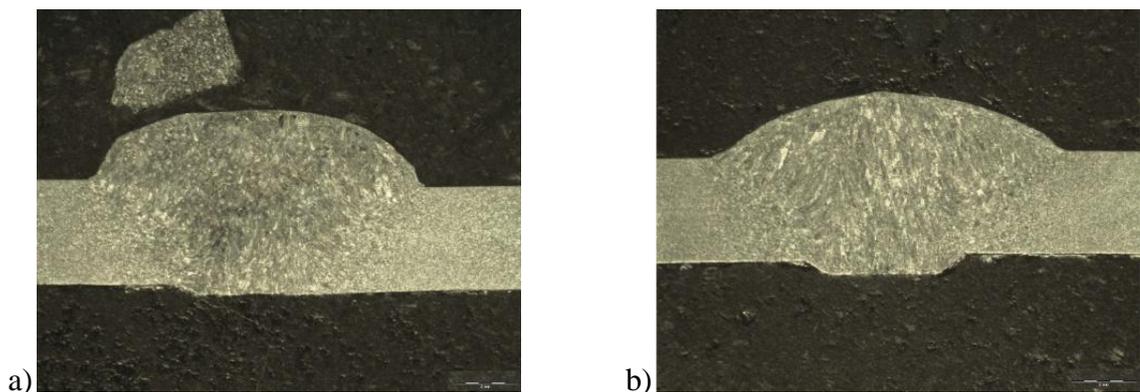
e) E70C-6M (1,2 mm): Todas as desejabilidades individuais atingem seu valor ideal. Isto faz com o cordão, para esses parâmetros, seja ideal. A variação da penetração diminui com o aumento da tensão e da velocidade de soldagem e aumenta com o aumento da corrente.

f) E70C-6M (1,0 mm): A variação de altura se encontra fora da faixa de desejabilidade, enquanto a largura e a penetração se encontram dentro da faixa. A penetração aumenta com o aumento da tensão e diminui com o aumento da corrente e da velocidade de soldagem.

Pode se observar que o arame sólido ER70S-6 foi o que obteve maior penetração, seguido pelo tubular metal cored E70C-6M e por ultimo, o tubular rutílico E71T-1.

## 4.2.Soldas em chanfro

Após obter os parâmetros ótimos na soldagem sobre chapa para garantir a melhor penetração dos cordões, foram realizadas soldas em chanfro, conforme mostra a Figura 24.



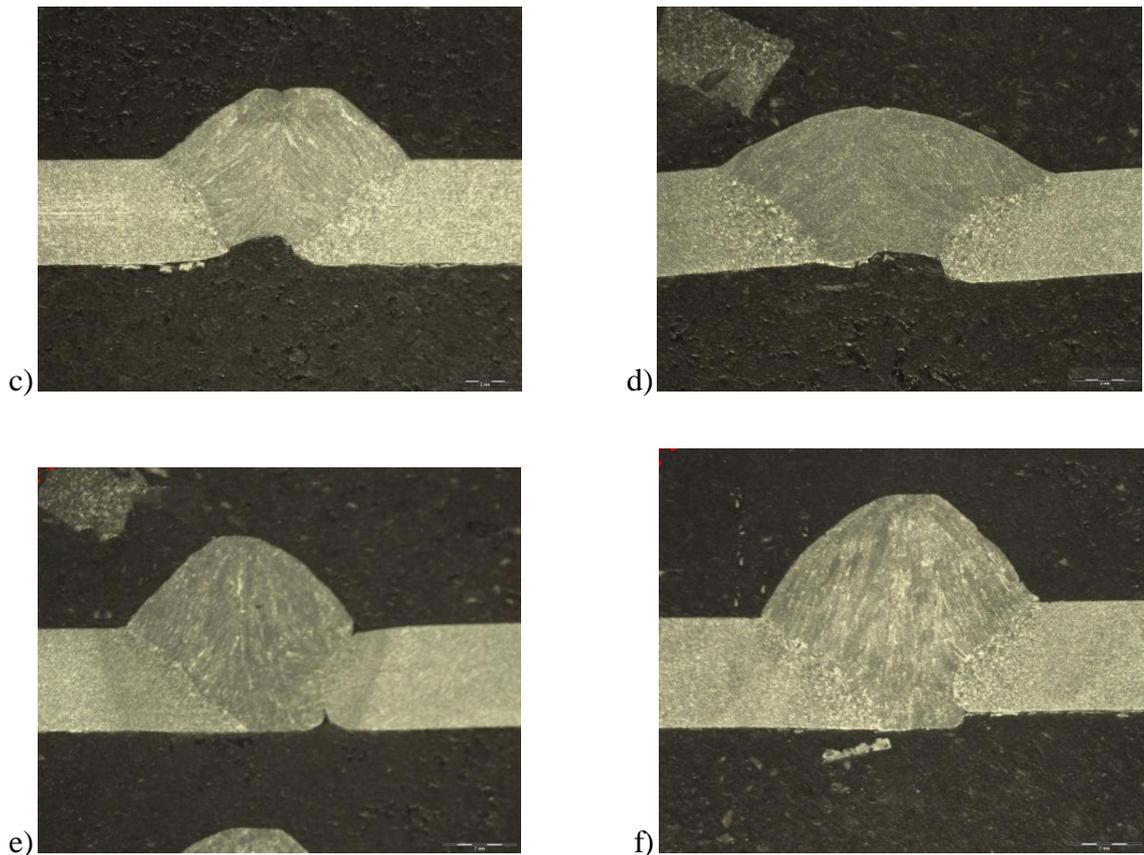


Figura 24 – Soldas em chanfro. a) ER70S-6 (1,2 mm). b) ER70S-6 (1,0 mm). c) E71T-1 (1,2 mm). d) E71T-1 (1,0 mm). e) E70C-6M (1,2 mm). f) E70C-6M (1,0 mm).

Nas soldas feitas com o arame sólido ER70S-6, observa-se total penetração, fusão e ausência de mordeduras. Isto demonstra a estabilidade do arco durante a soldagem. Além disso, o arame sólido não gera escória, portanto, o mata-junta não interfere na penetração do arame.

Nas soldas feitas com o arame E71T-1 do tipo rutílico, observa-se a falta de penetração. Isto ocorreu devido à formação de escória entre a raiz da solda e o mata junta, impedindo a fusão completa na raiz da solda. Portanto, o uso do mata-junta não é aconselhado para soldas realizadas com arame tubular rutílico. Entretanto, se for realmente necessário o uso do mata-junta, deve-se utilizar um com geometria específica para que a escória não fique presa a ele causando a falta de penetração.

Nas soldas realizadas com o arame E70C-6M observa-se falta de fusão no lado direito da amostra, na zona termicamente afetada pelo calor.

### 4.3. Teste de Microdureza

Os ensaios de microdureza Vickers foram realizados e os resultados foram analisados e comparados como ilustra a Figura 25.

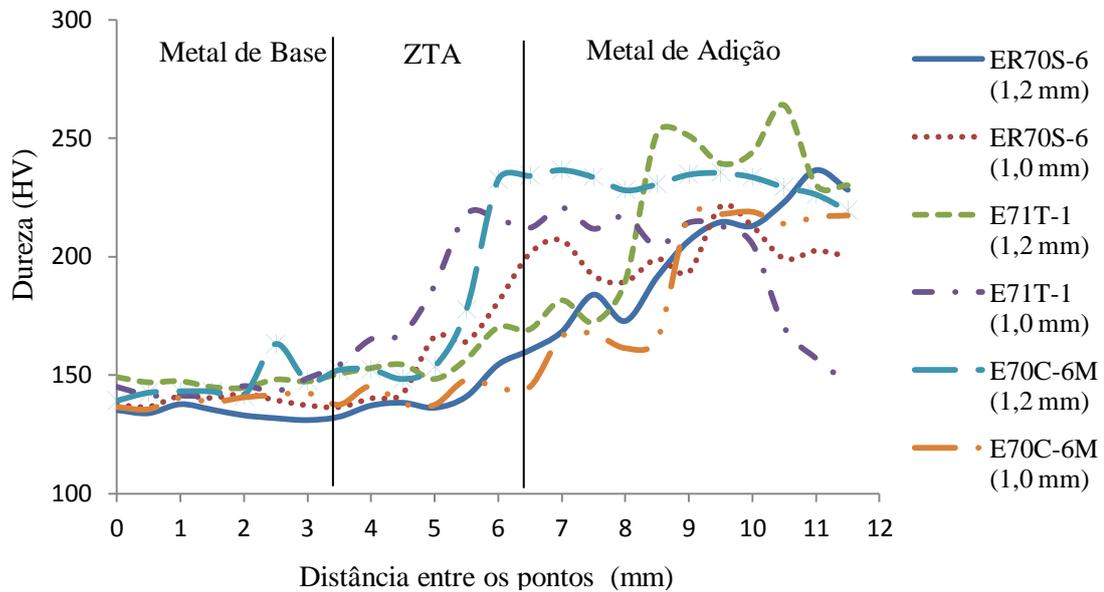


Figura 25 – Comparação entre os perfis de microdureza.

Através do gráfico pode-se observar que a microdureza é menor no metal base, aumenta na ZTA e tem seu valor máximo no metal de adição, pois a adição de materiais aumenta a dureza na zona fundida.

Os perfis de dureza mostram que o processo FCAW apresenta soldas com maiores níveis de dureza que o processo GMAW. Por esse motivo, o processo de soldagem com arame sólido é mais bem aplicado em situações onde se determina um limite máximo de dureza, como o caso da Norma-76 da Petrobrás (2001) que determina dureza máxima de 248 HV em soldas de tubulação (material A106 ou API 5L), que trabalham com H<sub>2</sub>S.

As soldas produzidas pelo processo arame tubulares têm maiores valores com os arames de 1,2 mm de diâmetro, tanto para o arame rutílico (E71T-1) como para o tipo metal cored (E70C-6M).

### 4.4. Teste de Tração

Os ensaios de tração realizados forneceram resultados que são mostrados na Tabela 9.

Tabela 9 – Média das forças, tensões e deformações máximas dos ensaios de tração.

Arame	Tensão – Força Máxima (MPa)	Tensão de Ruptura (MPa)	Deformação de Ruptura (mm)	Deformação – Força Máxima (mm)	Força Máxima (N)	Força de Ruptura (N)
ER70S-6 (1,2 mm)	465,3	301,1	5,2	3,5	5025	3252
ER70S-6 (1,0 mm)	485,0	310,6	6,4	4,4	5238	3354
E71T-1 (1,2 mm)	454,9	284,4	7,8	5,2	5459	3413
E71T-1 (1,0 mm)	455,8	288,6	7,0	4,6	5470	3463
E70C-6M (1,2 mm)	434,1	292,6	5,9	4,2	5209	3512
E70C-6M (1,0 mm)	480,4	289,0	7,4	4,6	5188	3121

Com base nos ensaios de tração, foi possível traçar os gráficos de tensão x deformação como ilustra a Figura 26.

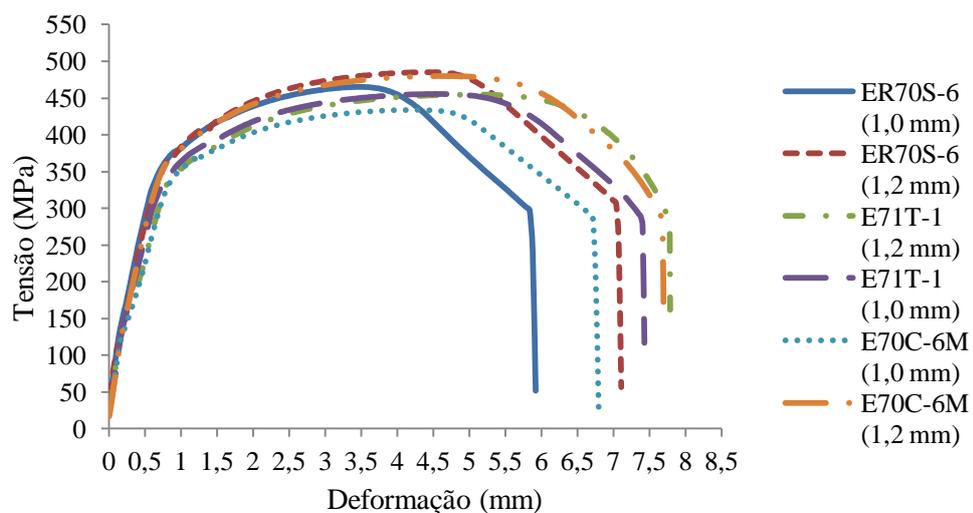


Figura 26 – Gráficos de tensão x deformação para cada junta soldada.

O ensaio de tração comprovou a integridade das juntas soldadas, pois todos os corpos de

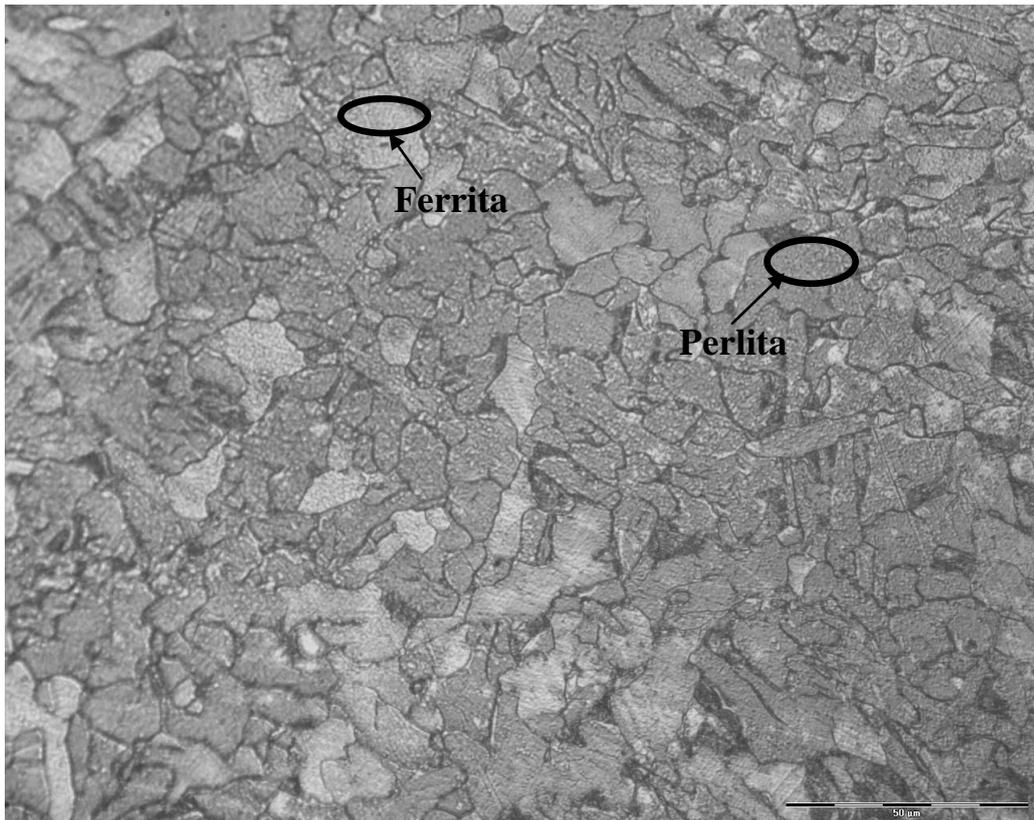
prova romperam no metal de base ou na ZTA, com tensão máxima de tração acima do valor mínimo de 400 MPa conforme requerido.

As tensões máximas foram maiores nas soldas realizadas com arames de 1,2 mm de diâmetro. No entanto, a junta soldada com arame tubular E71T-1 teve menor tensão máxima devido à falta de penetração ocorrida, se igualando a tensão máxima obtida com o mesmo arame de 1,0 mm de diâmetro.

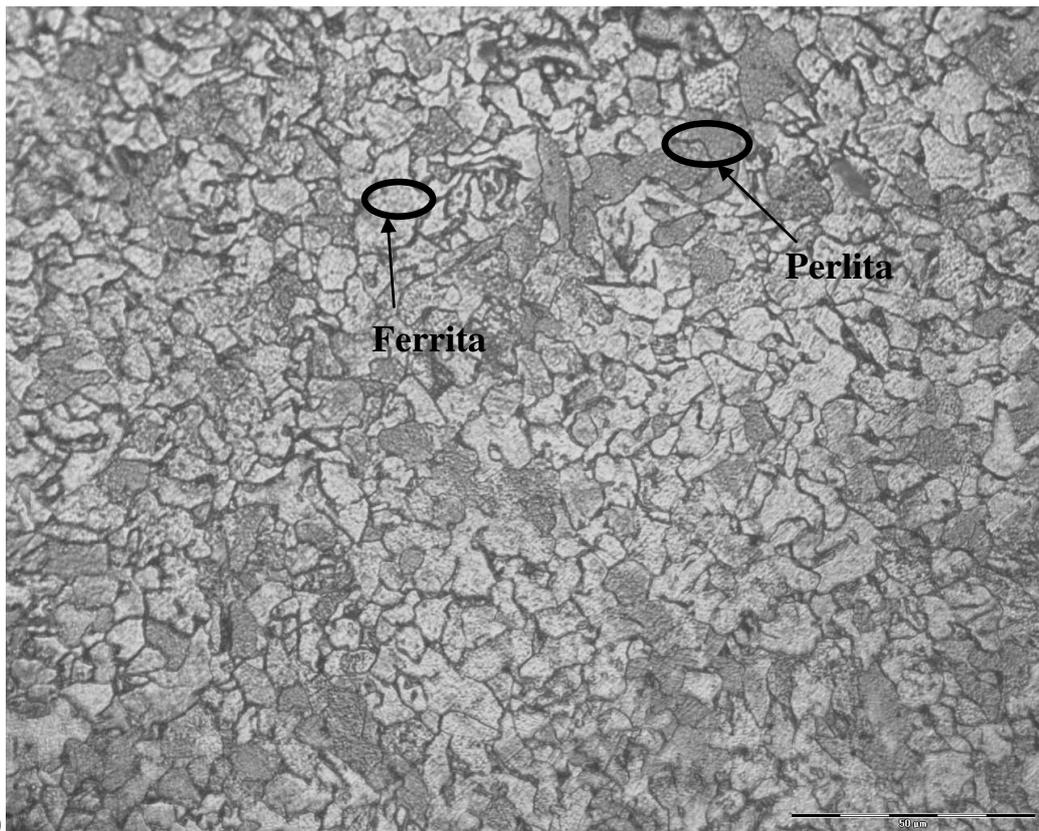
Os limites de resistência a tração ficaram dentro do valor esperado, ou seja, entre 400 e 550 MPa.

#### **4.5. Microestrutura**

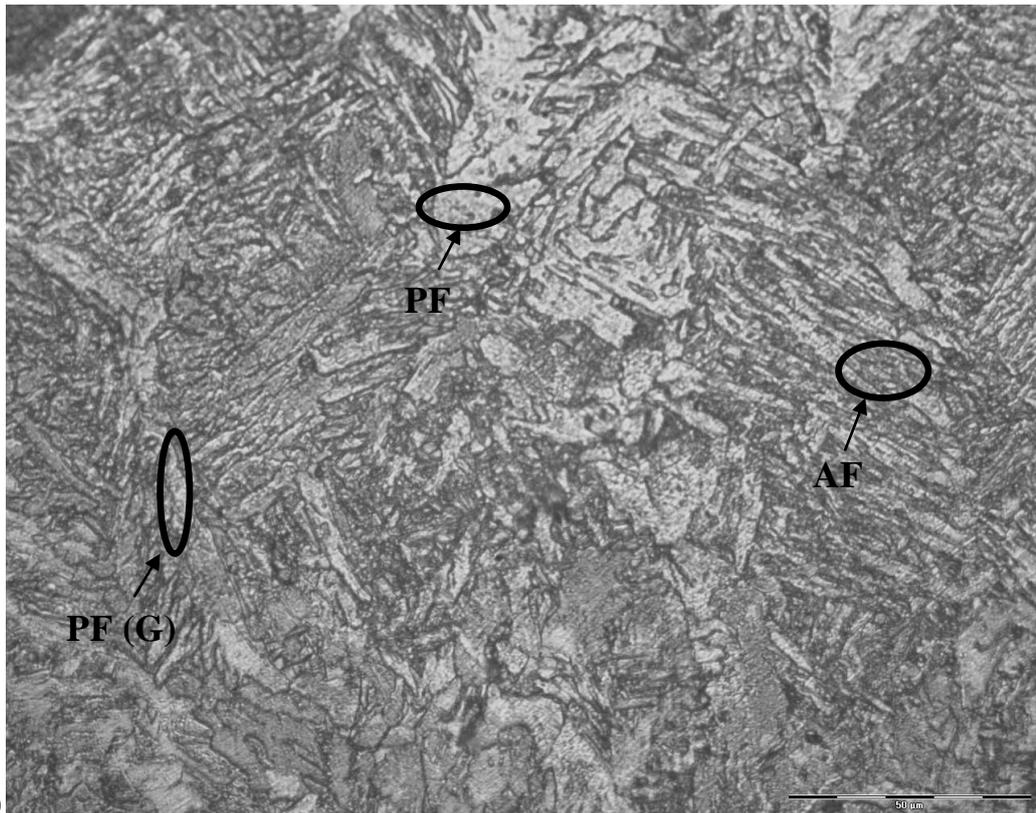
A análise microestrutural dos corpos de prova pode ser observada na figura 27.



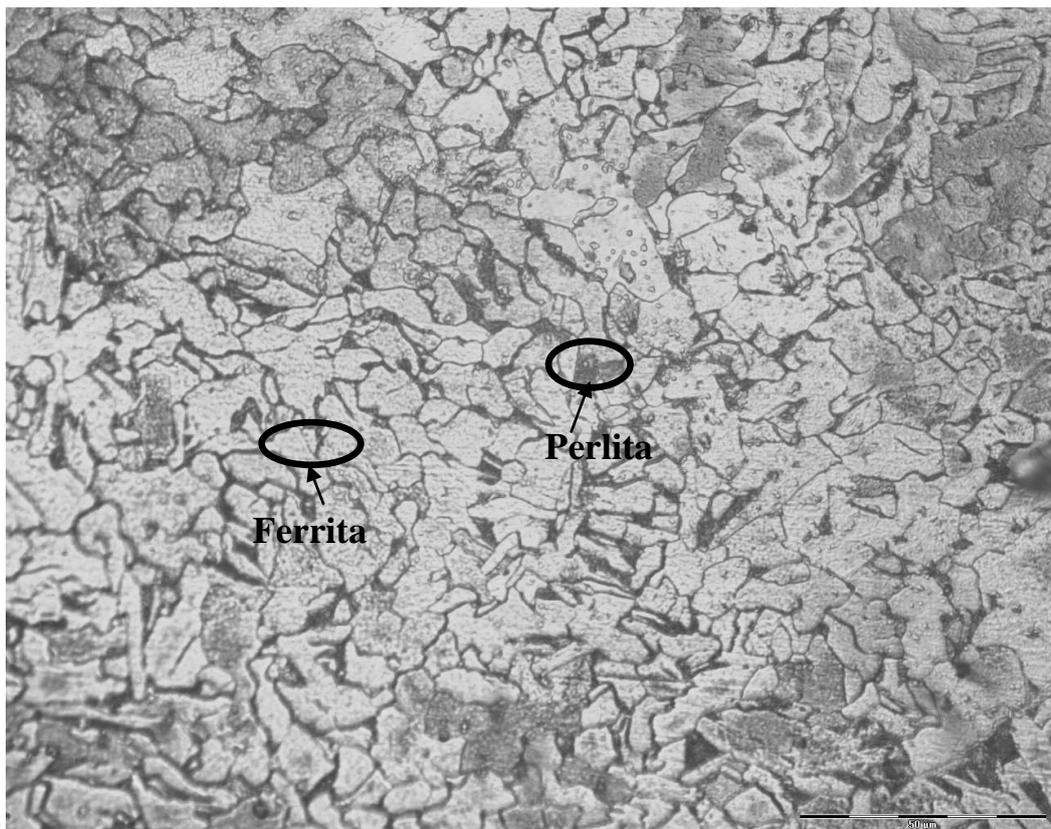
a.1)



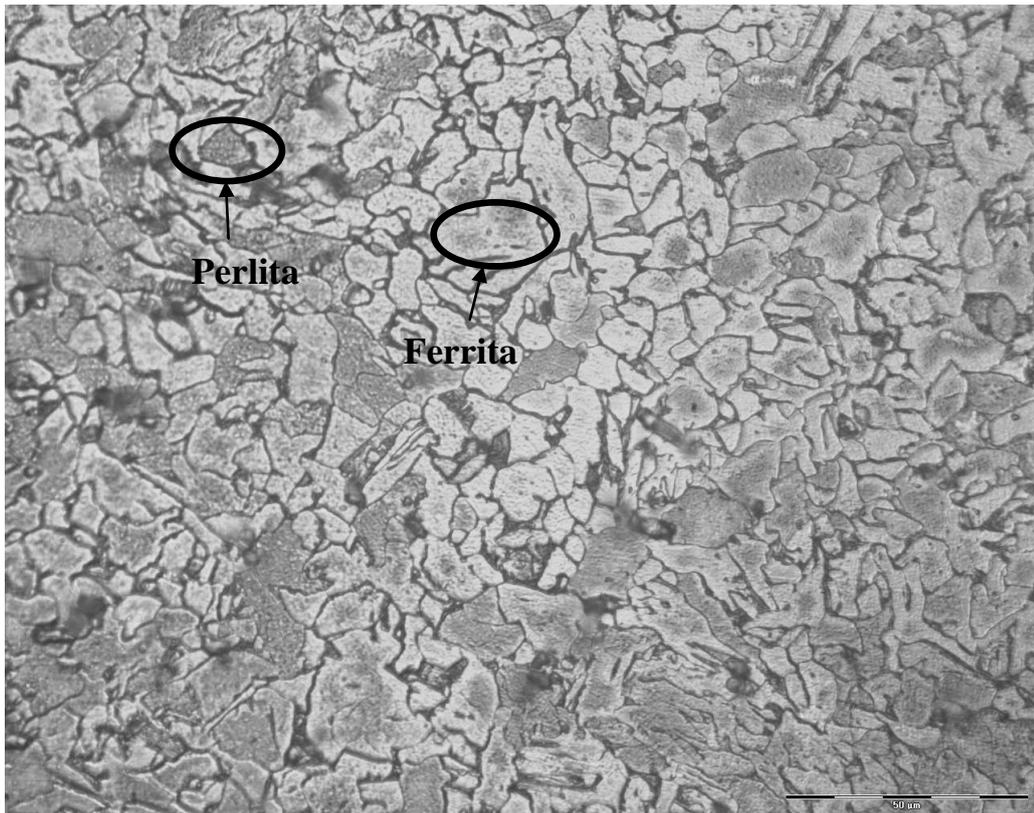
a.2)



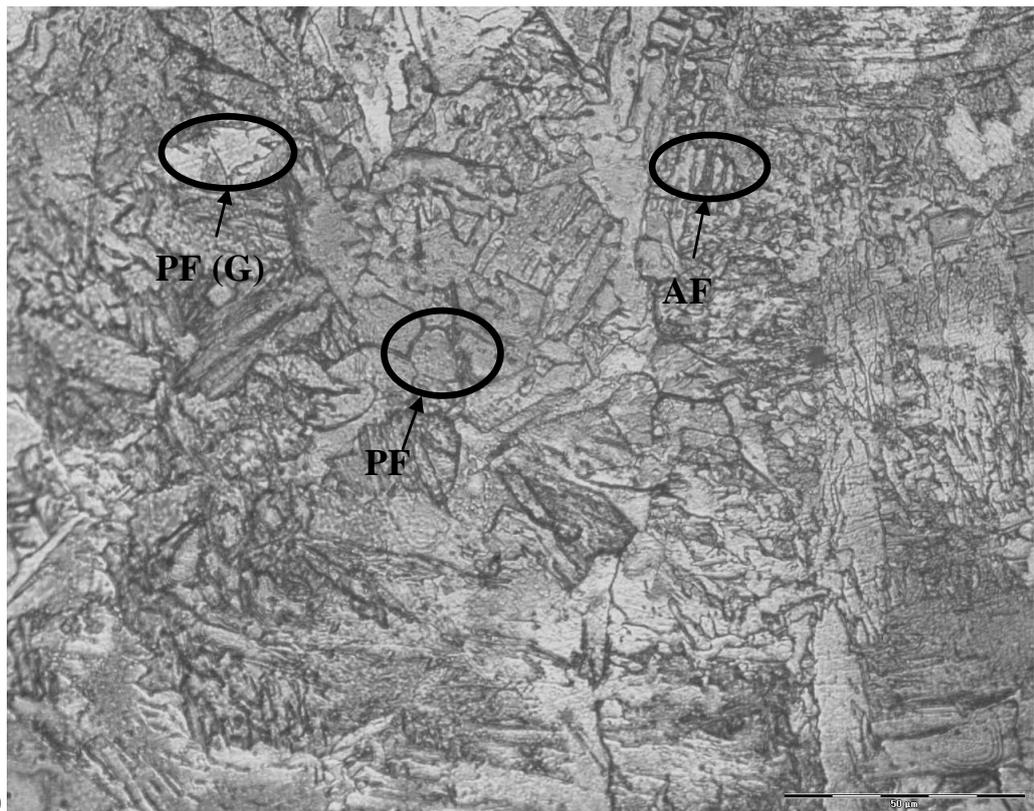
a.3)



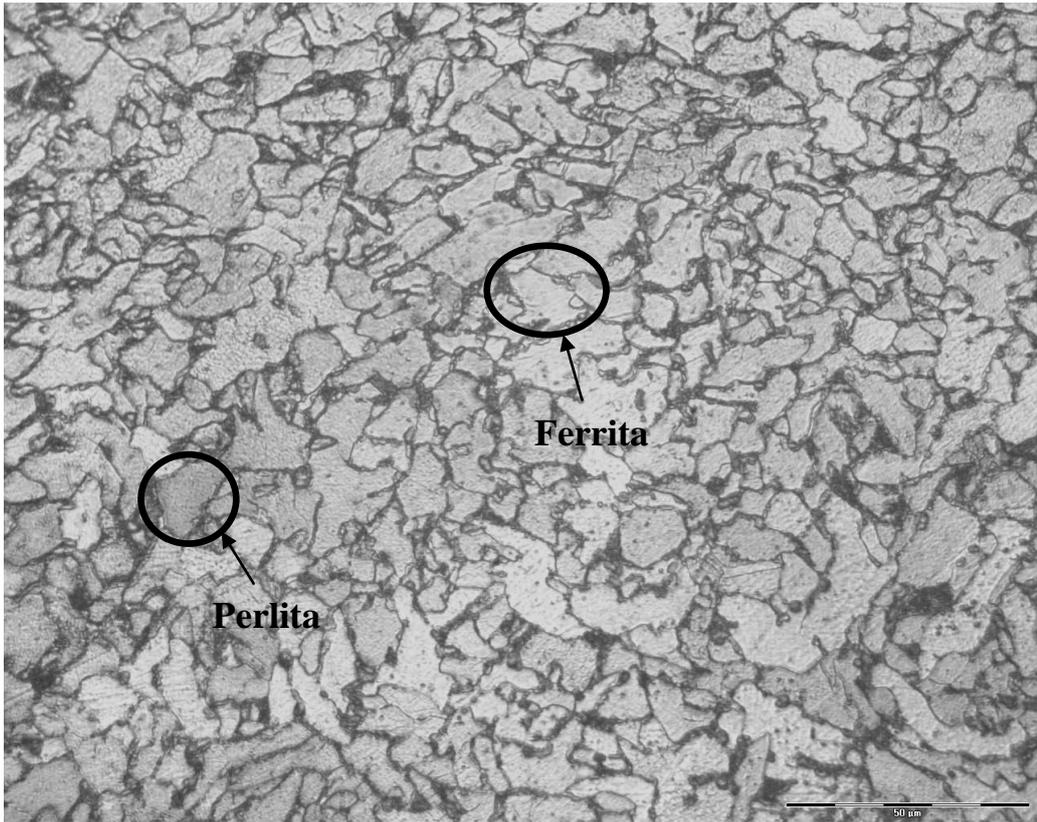
b.1)



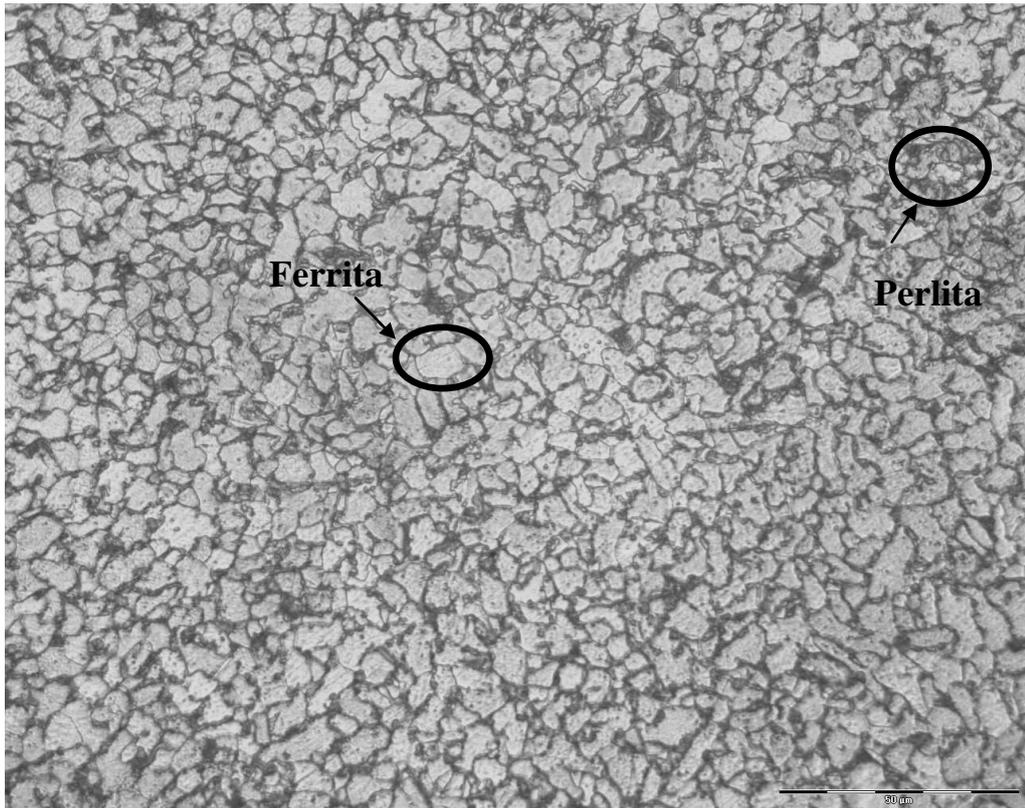
b.2)



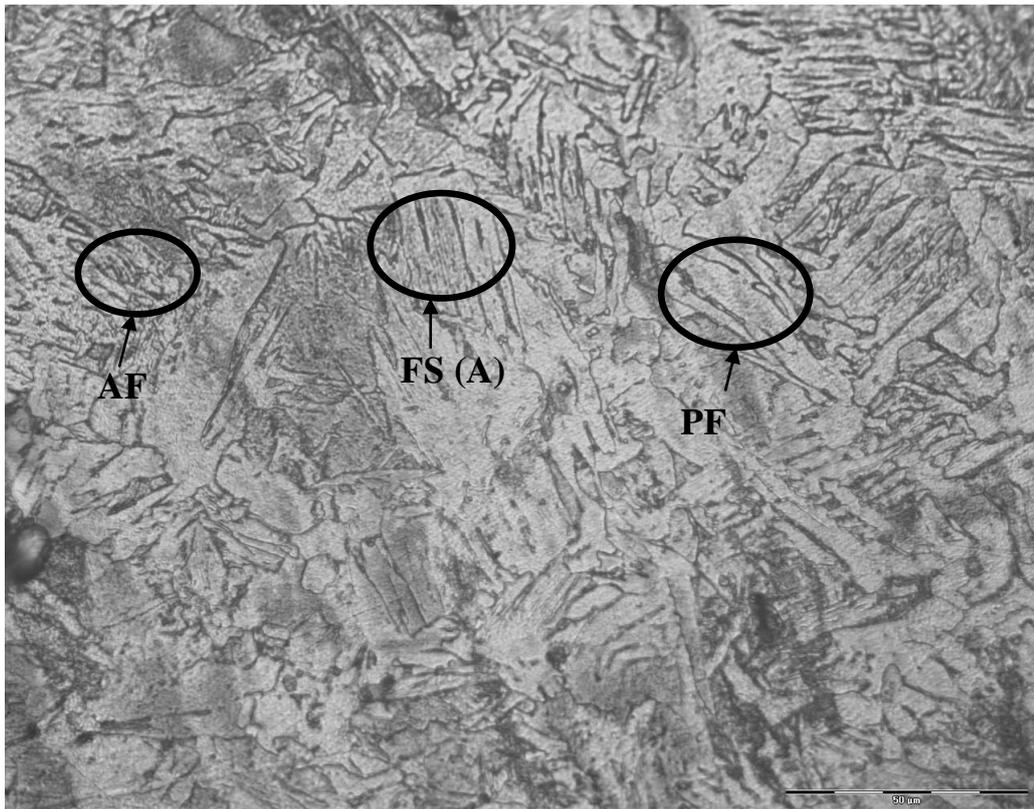
b.3)



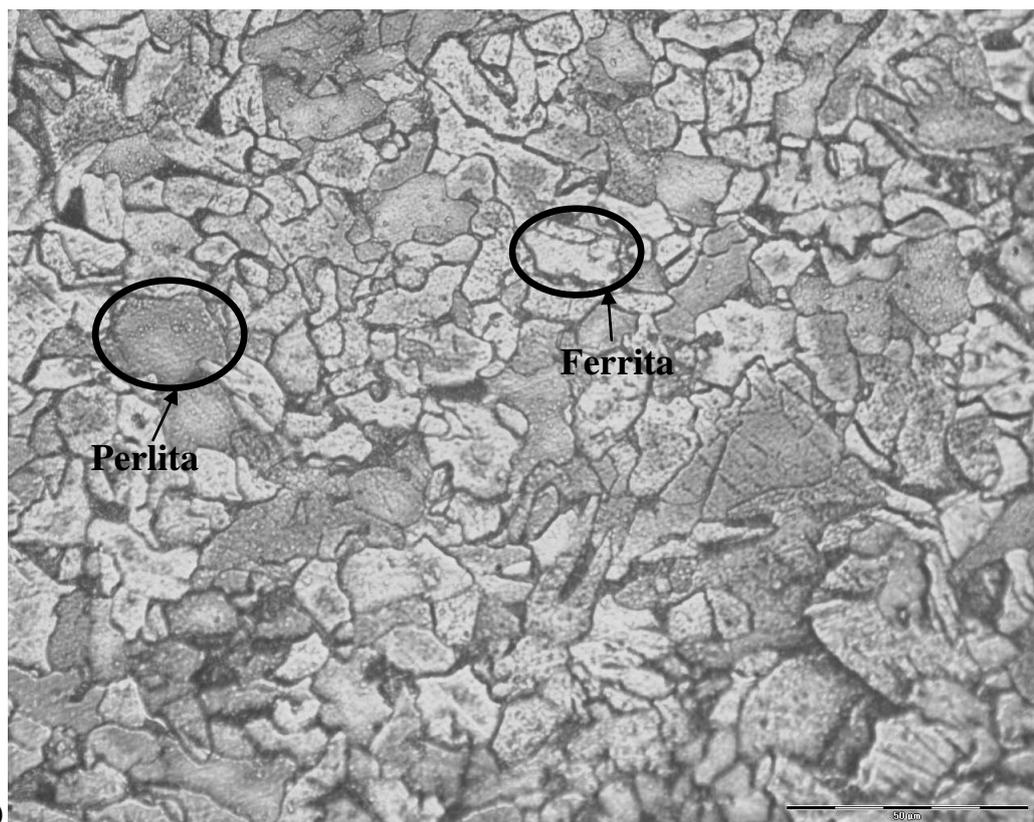
c.1)



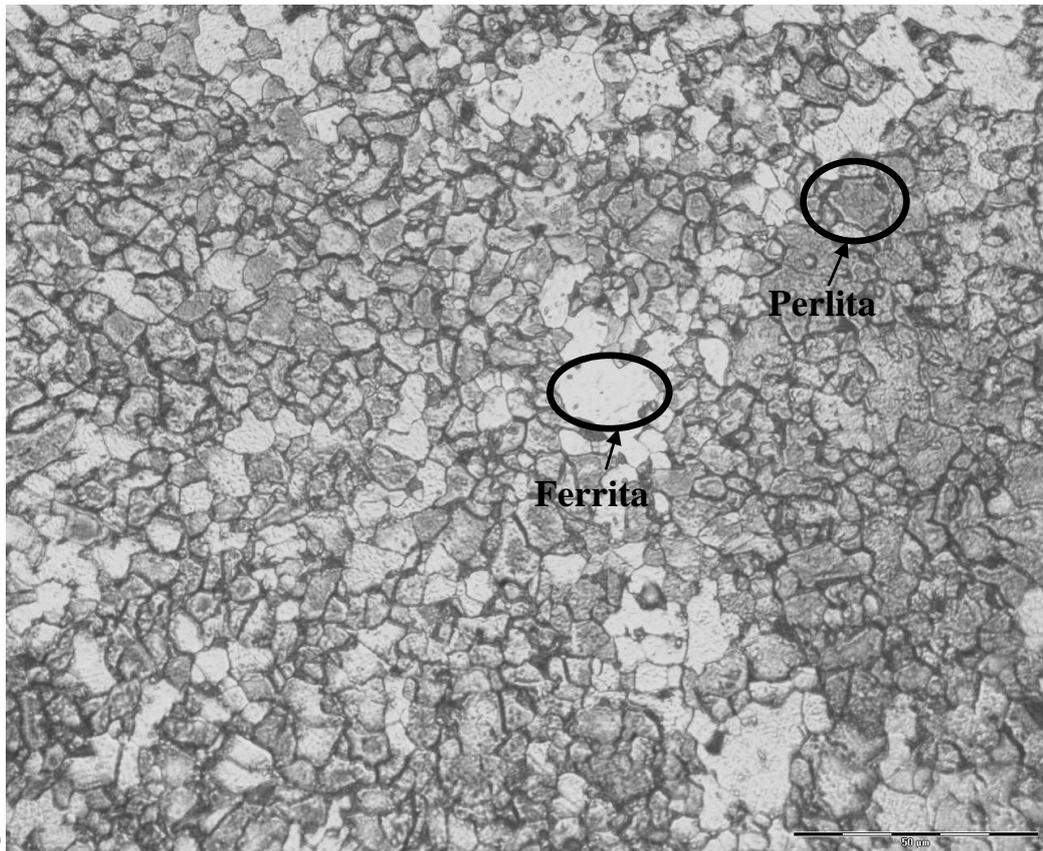
c.2)



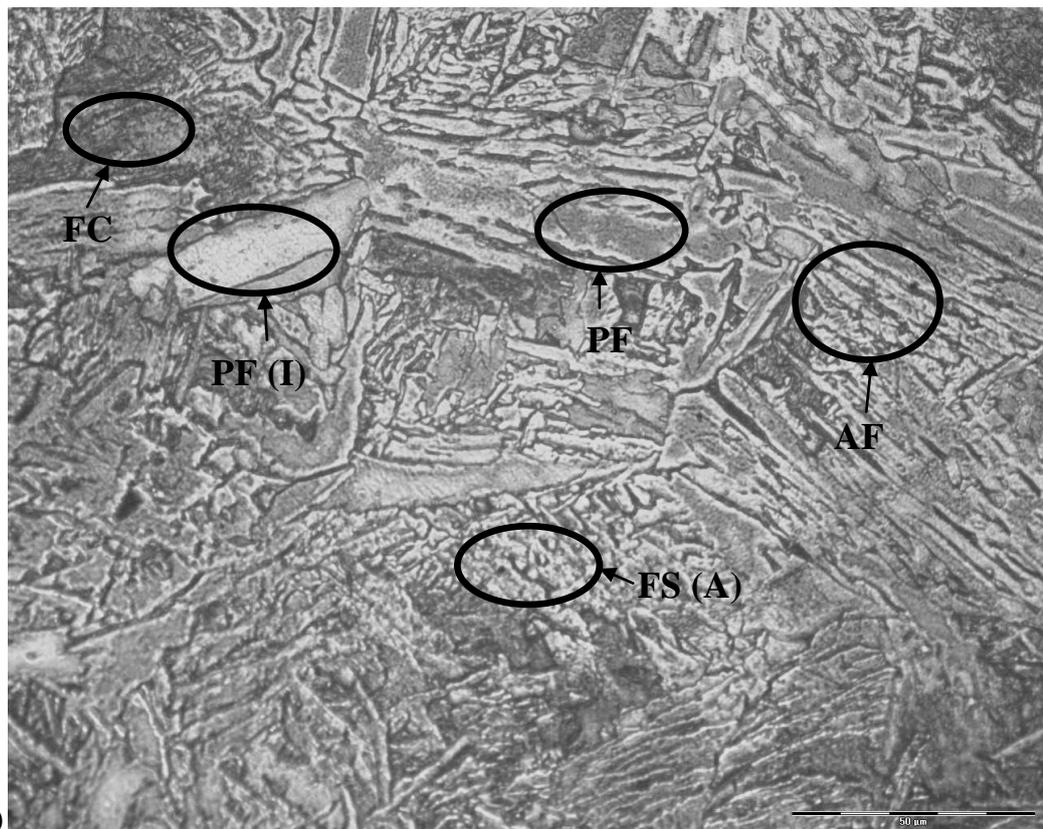
c.3)



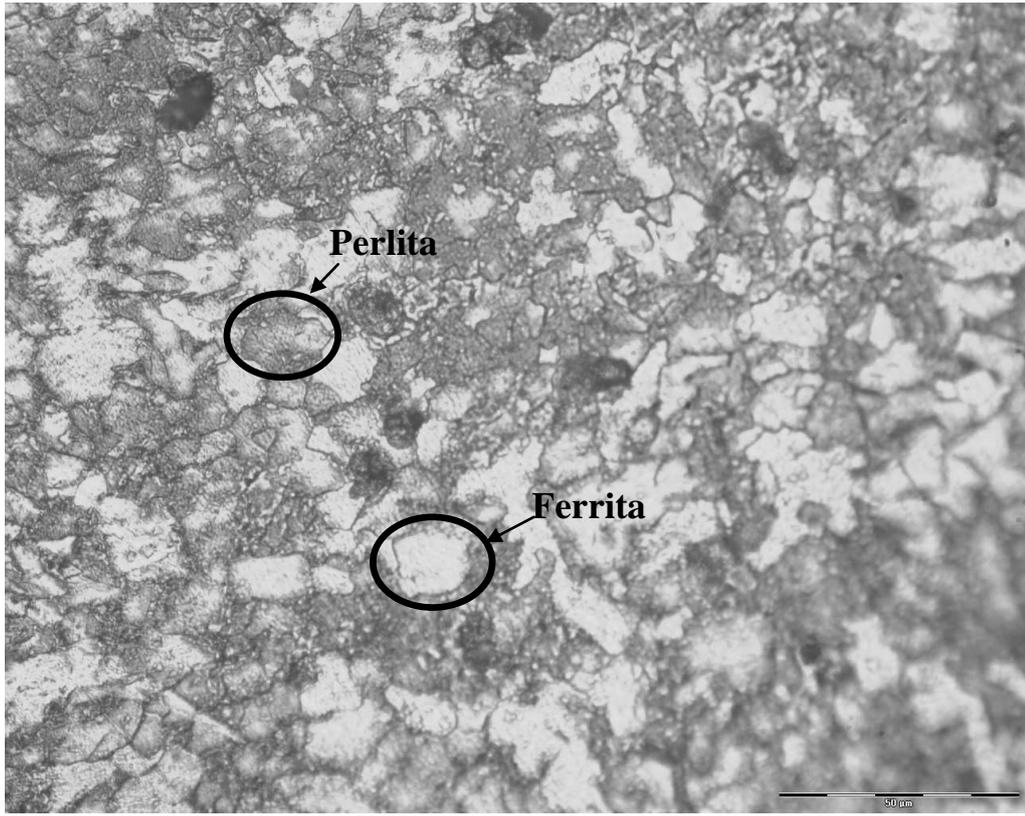
d.1)



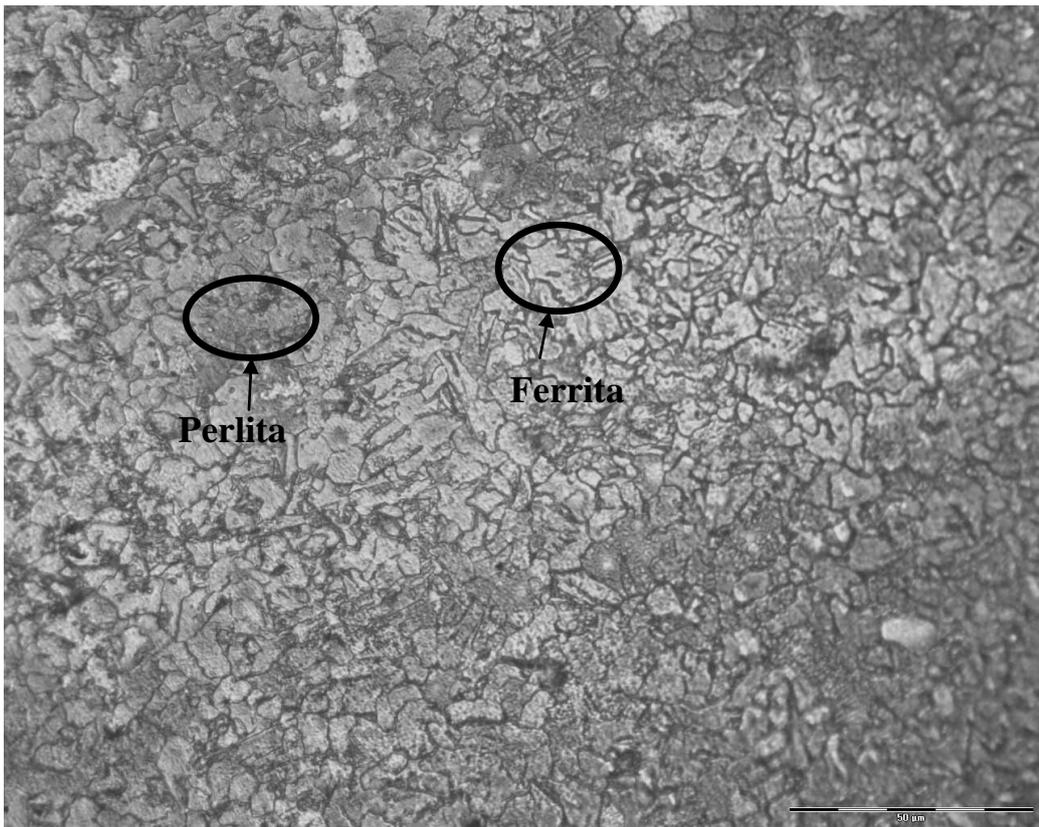
d.2)



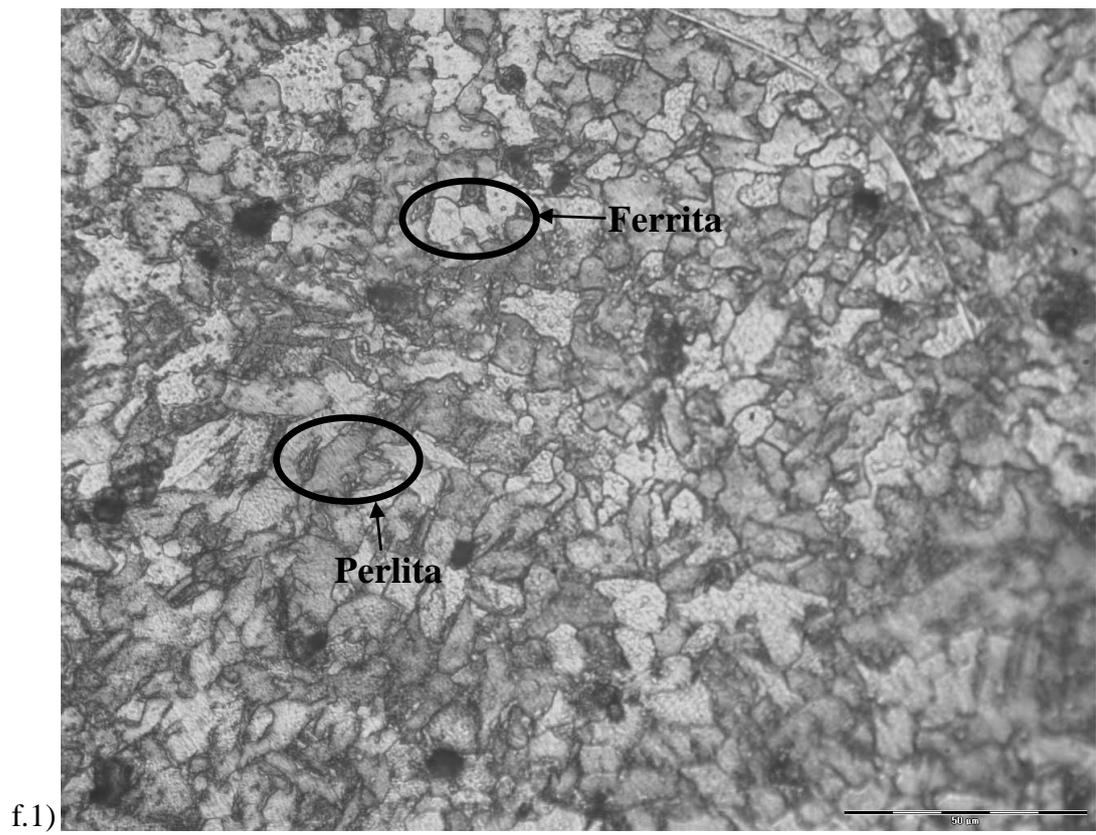
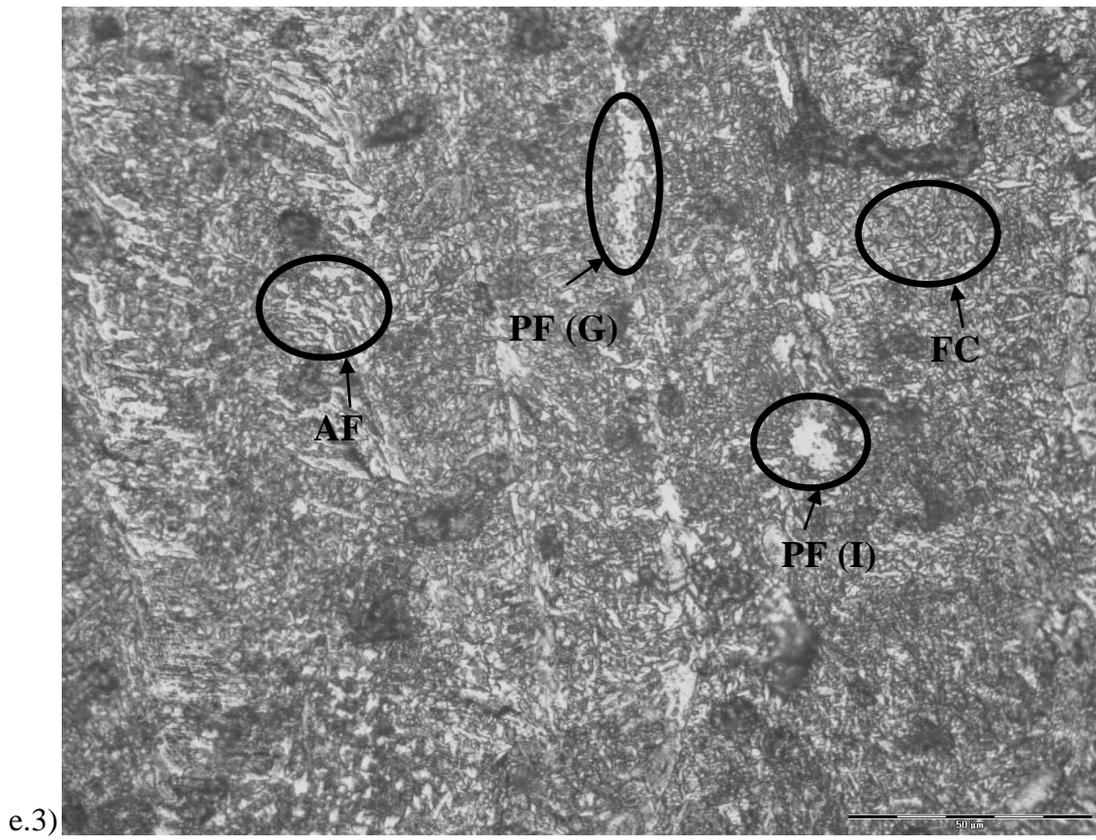
d.3)



e.1)



e.2)



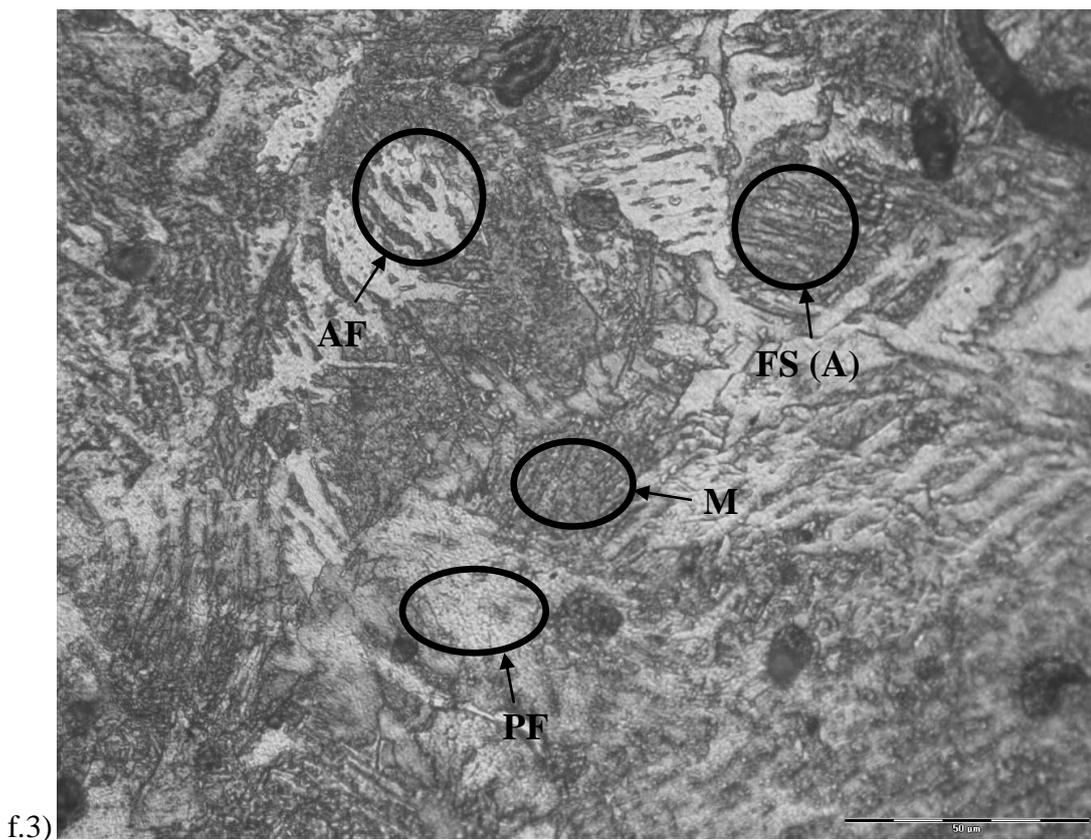
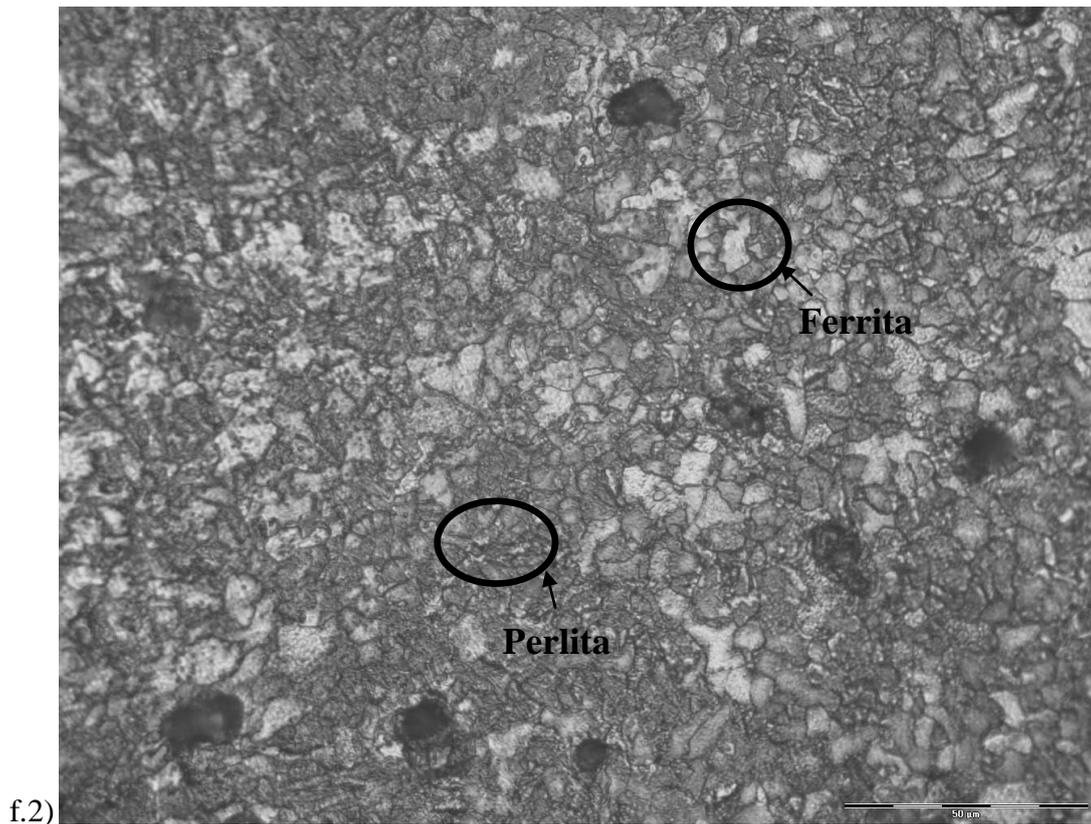


Figura 27 – Análise metalográfica das soldas para cada arame utilizado. As imagens estão organizadas em: metal de base, zta e metal de adição, respectivamente. a) ER70S-6 (1,2 mm de diâmetro). b) ER70S-6 (1,0 mm de diâmetro). c) E71T-1 (1,2 mm de diâmetro). d) E71T-1 (1,0 mm de diâmetro). e) E70C-6M (1,2 mm de diâmetro). f) E70C-6M (1,0 mm de

diâmetro). Onde: 1 – metal de base, 2 – ZTA e 3 – metal de adição.

Nas zonas fundidas foram encontradas as seguintes fases:

ER70S-6 (1,2 mm): Grãos de ferrita primária (PF), ferrita acicular (AF) e ferrita de contorno de grão (PF(G)).

ER70S-6 (1,0 mm): ferrita primária (PF), ferrita acicular (AF) e ferrita de contorno de grão (PF(G)).

E71T-1 (1,2 mm): ferrita acicular (AF), ferrita de segunda fase alinhada (FS(A)) e ferrita primária (PF).

E71T-1 (1,0 mm): ferrita acicular (AF), ferrita intergranular poligonal (PF(I)), ferrita primária (PF), e ferrita de segunda fase alinhada (FS(A)).

E70C-6M (1,2 mm): ferrita de contorno de grão (PF(G)), ferrita acicular (AF), ferrita intergranular poligonal (PF(I)) e ferrita com carboneto agregado (FC).

E70C-6M (1,0 mm): ferrita primária (PF), ferrita acicular (AF), ferrita de segunda fase alinhada (FS(A)) e martensita (M).

Em todos os casos, no metal base verifica-se a presença de grãos de perlita e ferrita. Na zona termicamente afetada (ZTA) também existem grãos de perlita e ferrita. No entanto, devido ao calor, estes grãos são menores que os encontrados no metal de base.

Nas soldas com arame ER70C-6M, percebe-se maior refinamento de grãos em relação aos outros arames.

## CAPÍTULO 5

### Conclusão

O uso do projeto de análise de experimentos (DOE) se mostrou eficiente, rápido e prático.

O processo de soldagem GMAW apresentou um comportamento mais estável, gerando soldas com ótimo acabamento superficial e penetração satisfatória. As soldas realizadas utilizando o processo FCAW apresentam formação de escória com o arame E71T-1. No entanto, as soldas realizadas com o arame E70C-6M não apresentaram formação de escória, apenas algumas ilhas de sílica.

O uso da mistura Ar + O<sub>2</sub> como gás de proteção apresentou bons resultados, mesmo não sendo o mais indicado para processos como os utilizados neste trabalho.

Para a penetração, as desejabilidades individuais foram satisfatórias, pois estavam acima de 0,7. O processo GMAW apresentou as maiores desejabilidades individuais, seguido pelo processo com arame tubular E70C-6M e E71T-1, respectivamente.

No processo com arame tubular E70C-6M o valor ótimo para a penetração se deu a correntes de soldagem mais elevadas que a obtida pelo processo com arame E71T-1 e ER70S-6, onde a penetração ótima se deu com menores valores de corrente.

O uso do mata-junta para o processo FCAW com arame E71T-1, causou a retenção de escória na raiz da solda, ocasionando falta de penetração, diminuindo a tensão máxima aplicada no ensaio de tração.

O processo arame maciço produz soldas com menor perfil de dureza. Seu uso é indicado para situações onde são fixados limites máximos de dureza.

O processo com arame tubular apresentou maior perfil de dureza, sendo isto atribuído a sua maior taxa de resfriamento e ao seu maior percentual de AF na zona fundida, cuja ocorrência se deu em função da sua menor energia de soldagem.

Em todos os processos, houve refinamento na microestrutura do metal de solda.

## Referências Bibliográficas

ALMEIDA, H. A. L. *Otimização e comparação de modelos matemáticos para as características geométricas de soldas GMAW e FCAW*. Monografia. Centro Federal de Educação tecnológica do Pará, Coordenação de Mecânica.

ALORAIER, A., ALMAZROUEE, A., SHEHATA, T, PRINCE, J. W. H. *Role of welding parameters using the flux cored arc welding process of low alloy steels on bead geometry and mechanical properties*. Journal of Materials Engineering and Performance, dez. 2010. Disponível em < [www.springerlink.com/index/TW753T3072P78563.pdf](http://www.springerlink.com/index/TW753T3072P78563.pdf)> Acesso em 01 jul. 2011.

ALVES, L. F. R. *Estudo comparativo da soldagem do aço inoxidável austenítico AISI-316L utilizando os processos de soldagem TIG, FCAW e MIG/MAG*. 2008. Monografia, Centro Universitário de Itajubá, Itajubá.

ANTONY, J.; KAYE, M.; FRANGOU, A. *A strategic methodology to the use of advanced statistical quality improvement techniques*. The TQM Magazine, v.10, n.3, p.169-176, 1998.

ARAUJO, W. R. *Comparação entre soldagem robotizada com eletrodo sólido e metal cored – A ocorrência do finger*. 2004. 91 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola de, Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

AWS, *Welding Handbook*, Miami, v. 4, p. 233-332, 1998.

BALASUBRAMANIAN, V.; LAKSHMINARAYANAN, A. K.; VARAHAMOORTHY, R. e BABU, S. *Application of response surface methodology to prediction of dilution in plasma transferred arc hardfacing of stainless steel on carbon steel*. International Journal of Iron and Steel Research, v. 16, n. 1, p. 44-53, 2009a.

BARHORST, S., *Metal Cored Electrode Basics*, The American Welder, p 13-15 nov 2000.

BARRA, S. R. *Influência do processo MIG/MAG térmico sobre a microestrutura e a geometria da zona fundida*. 2003. 248 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

BAUNÈ, E.; BONNET, C.; LIU, S., *Reconsidering the Basicity of a FCAW Consumable-Part 1 – Solidified Slag Composition of a FCAW Consumable as Basicity* *Indicato*, Welding Journal, March, pp. 57s-64s, mar 2000.

BRACARENSE, A. Q., MODONESI, P. J., MARQUES, P. V. *Soldagem – Fundamentos e tecnologia*. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2009. 362 p.

BUSSOLOTI, E. S.; NETO, J. S. S.; CESARETTI, M. A.; MORAIS, Z. S. *Dimensionamento do cordão de solda sob o ponto de vista estatístico*. Soldagem & Qualidade. Disponível em < [www.infosolda.com.br/new\\_site/getFile.php?t=p&i=112](http://www.infosolda.com.br/new_site/getFile.php?t=p&i=112)>. Acesso em 05 ago 2010.

CAMPOS, P. T. *Caracterização mecânica e microestrutural de juntas soldadas pelos processos MIG/MAG (GMAW) e arame tubular (FCAW)*. 2005. 75 p. Dissertação (Mestrado

em Engenharia Mecânica) – Departamento de Ciências Exatas e de Tecnologia, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba.

CORREIA, D. S.; GONÇALVES, C. V.; CUNHA JUNIOR, S. S. e FERRARESI, V. A. *Comparison between genetic algorithms and response surface methodology in GMAW welding optimization*. Journal of Materials Processing Technology, v. 160, n. 1, p. 70-76, 2005.

FELIZARDO, I., *Soldagem MIG/MAG e com arame tubular (Coletânea de informações retiradas de diversas bibliografias)*. 2005. Disponível em <[www.ivanilzafe.dominiotemporario.com/doc/GMAW-FCAW\\_Ivanilza.pdf](http://www.ivanilzafe.dominiotemporario.com/doc/GMAW-FCAW_Ivanilza.pdf)>. Acesso em 05 set 2011.

FERRAZ, J. C.; LEÃO, I. SANTOS, R. L. C.; PORTELA, I. M. *Estudo da competitividade de cadeias produtivas integradas no Brasil: Impacto das zonas de livre comércio – Cadeia: Industria Naval*, 2002 p, 1-48, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

FIRKA, D. *Statistical, technical and sociological dimensions of design of experiments*. The TQM Journal. Vol.23, n. 4, 2011, p. 435-445.

FORTES, C. *Apostila Arames Tubulares*, ESAB BR, 2004. 103p

FORTES, C. *Apostila MIG/MAG*, ESAB BR, 2005. 135p.

GIL, M. G. B. *Método da superfície de resposta. DOE*. 2003 Disponível em <[www.web.ist.utl.pt/ist11061/de/ACETATOS/RSM-ACE.pdf](http://www.web.ist.utl.pt/ist11061/de/ACETATOS/RSM-ACE.pdf)> Acesso em 30 ago 2011.

GIRALDO, J. MUÑOZ, D., ARISTIZÁBAL, S., SUÁREZ, J., ARBELÁREZ, A., URIBE, D. *Construcción de curvas de corriente de soldadura contra velocidad de alimentación de alambre para El procesoGMAW*. Dyna, vol. 76, n. 157, p. 205-212. mar. 2009.

GOMES, E. B. *Análise do comportamento da soldagem por curto circuito aplicado ao processo eletrodo tubular através da metodologia Taguchi*. 2006. 119 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá.

GUANARAJ, V. & MURUGAN, N. *Prediction and comparison of the area the heat-affected zone for the bead-on-plate and bead-on-joint in submerged arc welding of pipes*. Journal of Materials Processing Technology, n. 95, p. 246-294, 1999.

GUANARAJ, V. & MURUGAN, N. *Prediction and optimization of weld bead volume for the submerged arc process – Part I*. Welding Research Supplement, p. 289-294, 2000.

HASS, A. R. *Análise da influência dos parâmetros de operação sobre a geometria do cordão de solda obtido pelo processo de soldagem por eletrodo tubular*. 2010. 26p. Monografia. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

HERMANS, M. J. M.; DEN OUDEN, G. *Process behavior and stability in short circuiting gas metal arc welding*. Welding Journal. p.137-141, abr. 1999.

IRVIN, B. *Shielding gases are the key to innovations in welding*. Welding Journal. p. 37-41, jan. 1999.

JEFFUS, L. *Welding: Principles and Applications*. Austrália. Thonson, 2004. 944p.

JUNIOR, L. P. N. *Otimização de um processo de solda MIG/MAG para aplicação na indústria automobilística através da utilização da técnica do projeto de análise de experimentos*. 2003. 111 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Instituto de Engenharia de Produção e Gestão, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá.

KAÇAR, R.; KOKEMLI, K. *Effect of controlled atmosphere on MIG/MAG arc weldment properties*. Material & Design. Surrey, n. 26, p. 508-516, 2005.

KONDA, R.; RAJURKAR, K. P.; BISHOP, R. R.; GUHA, A.; PARSON, M. *Design of experiments to study and optimize process performance*. International Journal of Quality & Reability Management, v16, n.1, p. 56-71, 1999.

KOU, S. *Welding metallurgy*. New York: Wiley-Interscience, 1992, 480 p.

LAKSHMINARAYANAN, A. K. e BALASUBRAMANIAN, V. *Comparison of RSM with ANN in predicting tensile strength of friction stir welded AA7039 aluminium alloy joints*. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, v. 19, n. 1, p. 9-18, 2009.

LANCASTER, J. F. *Metallurgy of welding* Abington. William Andrew, 1999. 446 p.

LUCAS, W. *Choosing shielding gas – Part 2*. Welding & Metals Fabrication. n°7, p. 269-276, 1999.

MIRANDA, H. C., MOTA, C. A. M., FARIAS, J. P. *Efeito indutivo na soldagem com arame tubular auto protegido*. In: Encontro Nacional de Tecnologia da Soldagem, 24, 1998, Fortaleza, p. 1-11.

MIRANDA, H. C. *Influência da indutância na soldagem MIG/MAG na posição sobre-cabeça*. 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

MODONESI, P. J., NIXON, J. H. *Arc instability phenomena in GMAW*. Welding Journal. v. 73, p. 219-224, 1994.

MODONESI, P. J. *Soldabilidade dos aços transformáveis*. 2004. 75 p. Apostila. - Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte

MONT'ALVÃO, C. A. *Determinação dos fatores significativos do processo de corte por plasma a ar comprimido através da utilização do projeto e análise de experimentos*. 1998. 69 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá.

MONTGOMERY, D. C. *Design and analysis of experiments*. New York: John Wiley & Sons, 1991. 680 p.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. *Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros*. Rio de Janeiro: LTC, 2003, 514 p.

MOREIRA, A. F., GALLEGO, J., TOKIMATSU, R., YAMAKAKI, W. *A caracterização de revestimentos soldados com arame tubular*. In: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 17., 2006, Foz do Iguaçu, p. 5330-5340.

MOREIRA, A. F. *Influência da atmosfera protetora no cordão de solda obtido através dos processos de soldagem GMAW e FCAW*. 2008. 147 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira.

MOSTAFA, N. B., KHAJAVI, M. N. *Optimization of welding parameters for weld penetration in FCAW*. Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, v.16, p. 132-138, jun. 2006.

MOYER, N. *The evolution of shielding gas*. Welding Journal, p. 51-52, 2002.

N-76, *Materiais de tubulação*. Norma Petrobrás, 2001, 136 p. Disponível em < [www.scribd.com/doc/16641832/n0076-materiais-de-tubulacao](http://www.scribd.com/doc/16641832/n0076-materiais-de-tubulacao) > Acesso em 15 ago 2011.

NETO, B. B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. *Planejamento e otimização de experimentos*. Campinas: Editora Unicamp, 1996, 131 p.

NETO, J. C. P. A. & GUIMARÃES, A. S. *Efeito dos parâmetros de pulso sobre a geometria do cordão de solda em soldagem de chapa fina de aço inox AISI 304 pelo processo TIG pulsado*. Soldagem & Inspeção, Suplemento Técnico, ano 4, n. 6, p. 9–16, 2000.

NILO JÚNIOR, L. P. *Otimização de um processo de solda MIG/MAG para aplicação na indústria automobilística através da utilização da técnica do projeto e análise de experimentos*. 2003. 111 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Instituto de Engenharia de Produção e Gestão, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá. 2003.

NIST *What is design of experiments (aka DEX or DOE)?* Engineering Statistics Handbook. National Institute of Standards and Technology, US Departamento of Commerce, Gaithersburg, MD.

ORDÓÑEZ, R. E. C. *Soldagem e caracterização das propriedades mecânicas de dutos de aço API 5L-X80 com diferentes arames tubulares*. 2004. 130 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

PALANI, P. K. e MURUGAN, N. *Optimization of weld bead geometry for stainless steel claddings deposited by FCAW*. Journal of Materials Processing Technology, v. 190, n. 1-3, p. 291-299, 2007.

QUITES, A. M. *Introdução a soldagem a arco voltaico*. Florianópolis: Soldasoft, 2002, 352 p.

RODRIGUES, L. O. *Análise e otimização de parâmetros na soldagem com arame tubular*. 2005. 97 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá.

RODRIGUES, L. O., PAIVA, A. P. e COSTA, S. C. *Otimização do processo de soldagem com eletrodo tubular através da análise da geometria do cordão de solda*. Soldagem & Inspeção, v. 13, n. 2, p. 118-127, 2008

ROWLANDS, H. & ANTONY, J. *Application of design of experiments to a spot welding process*. Assembly Automation, vol. 23, n. 3, p. 273-279, 2003.

SALES et al. *Estudo da geometria do cordão de solda usando CO<sub>2</sub> e mistura de Ar e CO<sub>2</sub> na soldagem com arame tubular AWS E71T-1*. Anais do Congresso Internacional de Engenharia Mecânica, 2001, Uberlândia, v.1, p. 543-551.

SILVA, J. H. F., ALMEIDA, H. A. L. MOTA, C. A. M., BRAGA, E. M. *Otimização e comparação de modelos matemáticos para as características geométricas de soldas GMAW e FCAW*. In: Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 4., 2007, Estância São Pedro. Anais eletrônicos Disponível em <[www. www.grima.ufsc.br/cobef4/files/021013114.pdf](http://www.grima.ufsc.br/cobef4/files/021013114.pdf)>

SMAT, Z. *Automatic pulsed MIG welding*. Metal Constrution. p.38-44, jan. 1986.

SOLANA, P. & OCAÑA, J. L. *A mathematical model for penetration laser welding as a free-boundary problem*. J Phys. D: Appl. Phys 30. p. 1300-1313. 1997.

SUBAN, M. & TUSEK, J. *Dependence of melting rate in MIG/MAG welding on de type of shielding gas used*. Journal of Materials Processing Technology, p. 185-192, 2001.

SUBRAMANIAM, S. et al. *Droplet transfer in pulsed gas metal arc welding of aluminum*. Welding Journal, v. 77, n. 7, p. 458-464, 1998.

TANCO, E. et al. *How is experimentation carried out by companies? A survey of three European regions*. Quality and Reliability Engineering International, vol. 24, n8, p 973-981.

VENTRELLA, V. A.; GALLEGO, J.; MOREIRA, A. F. *The Effect of CO<sub>2</sub> addition on the weld Metal for flux Cored arc welding with AWS E309LT-1*. 2006.

VIEIRA, L. A. *Avaliação da tenacidade pós tratamento térmico de alívio de tensões em soldas produzidas com arames tubulares rútilicos que contenham níquel*. 2006. 79 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

VILLANI, P.; MODONESI, P. BRACARENSE, A. Q. *Fundamentos da soldagem*. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2006. 362 p

WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELLO, F. D. H. *Soldagem – Processos e metalurgia*. São Paulo: Edgard Blucher, 1992, 494 p.

WU, P., ZHANG, W. & BAY, N. *Characterization of dynamic mechanical properties of resistance welding machines*. Welding Journal, p. 17-21. 2005.

ZEEMANN, A.; LIMA, A. A.; EMYGDIO, P. R. O. *Influência do aporte de calor na microestrutura da zona termicamente afetada do aço inoxidável do tipo HK40*. Soldagem & Materiais, v.4, n.3, p.40-46, 1992.

## ANEXOS

ANEXO A – Tabelas com os resultados da soldagem BOP.

ER70S-6 (1,2 mm)

<b>Tensão (V)</b>	<b>Corrente (A)</b>	<b>Velocidade (cm/min)</b>	<b>Altura (mm)</b>	<b>Largura (mm)</b>	<b>Penetração (mm)</b>
19,8	200	46,5	2,8	6,9	1,99
19,4	190	31,9	3,84	9,1	2,38
20	191	62,3	2,1	6,1	2,3
16,5	183	46,5	2,94	6,2	1,88
18	200	31,9	3,61	7,5	2,84
19	230	62,3	2,32	6,16	1,73
22	210	46,5	2,57	7,47	1,46
21,5	184	31,9	4,1	11	1,93
21	185	62,3	1,83	7,03	1,42
20,5	200	46,5	2,11	6,16	1,46
27,4	218	46,5	1,9	5,71	1,41
29,5	198	46,5	1,76	7,11	1,32
18,5	200	46,5	3,89	6,92	1,17
25,3	237	46,5	3,74	6,33	1,95
21	222	46,5	3,11	8,09	2,17
19,5	222	31,9	2,77	8	1,96
19	230	31,9	2,76	7,11	1,9
22,5	215	31,9	2,16	7,75	1,49
21	268	62,3	1,55	4,99	1,53
19	197	62,3	2,05	4,99	1,33
28,7	190	62,3	1,35	6,11	0,79
19,3	220	62,3	2,55	6,37	1,78
20,1	265	62,3	2,63	5,92	1,68
28,1	250	62,3	2,44	7,15	1,47

## ANEXO A – Tabelas com os resultados da soldagem BOP (cont.).

## ER70S-6 (1,0 mm)

<b>Tensão (V)</b>	<b>Corrente (A)</b>	<b>Velocidade (cm/min)</b>	<b>Altura (mm)</b>	<b>Largura (mm)</b>	<b>Penetração (mm)</b>
19	185	46,5	2,52	6,9	2,03
19,4	186	31,9	3,11	8,6	1,62
19,4	188	62,3	2,15	5,55	1,26
24,5	185	46,5	2,72	6,2	1,61
18	180	31,9	4,4	6,9	2,28
18,1	175	62,3	2,25	5,18	0,93
21,7	178	46,5	2,41	6,8	1,3
21,5	183	31,9	3,2	8,2	2,77
21,5	185	62,3	2,03	6,37	1,16
20,5	169	46,5	1,97	5,8	0,68
18,5	171	46,5	2,18	5,2	1,24
26,8	129	46,5	1,74	6,5	0,89
19,5	197	46,5	2,3	8,6	1,78
25,3	238	46,5	3,02	7,1	1,56
26,2	223	46,5	2,18	8,18	1,76
20,3	173	31,9	2,81	6,6	1,31
18,7	167	31,9	2,67	7,7	1,91
22,5	168	31,9	2,34	7,2	0,95
20,6	170	62,3	2,3	7,2	1,03
19	172	62,3	1,42	5,36	0,62
22,8	180	62,3	1,47	4,77	0,83
18,9	210	62,3	2,53	6,31	1,22
17,1	215	62,3	2,37	6,71	1,15
21	222	62,3	1,89	6,86	1,51

## ANEXO A – Tabelas com os resultados da soldagem BOP (cont.).

E71T-1 (1,2 mm)

<b>Tensão (V)</b>	<b>Corrente (A)</b>	<b>Velocidade (cm/min)</b>	<b>Altura (mm)</b>	<b>Largura (mm)</b>	<b>Penetração (mm)</b>
29	387	46,5	3,35	6,45	0,43
30	286	31,9	2,25	7,38	0,78
30,5	343	62,3	2,34	6,92	0,9
38	295,5	46,5	5,24	4,71	0,66
39	350,3	31,9	4,48	6,5	0,49
38,1	342,1	62,3	2,6	4,59	0,31
32,5	298	46,5	2,61	8,56	0,81
31	333	31,9	2,12	8,75	0,54
32	300	62,3	2,66	5,89	0,69
35,5	335,4	46,5	2,06	6,19	0,69
39,2	336	46,5	2,42	5,45	0,34
31	331	46,5	2,15	6,59	0,59
30	199	46,5	4,12	6,82	0,29
37,2	340	46,5	4,01	4,15	0,73
40,4	321,3	46,5	4,69	8,19	0,57
33,6	345	31,9	2,89	7,82	0,46
35,8	340	31,9	3,16	5,38	0,08
22,5	388	31,9	3,4	7,99	0,77
30	335	62,3	1,13	4,77	0,76
40,3	383	62,3	2,32	4,41	0,5
33,1	375	62,3	1,4	5,22	0,75
29	383	62,3	3,01	5,57	1,04
36,6	366	62,3	3,72	5,73	0,24
31,2	323	62,3	2,59	5,24	0,93

## ANEXO A – Tabelas com os resultados da soldagem BOP (cont.).

## E71T-1 (1,0 mm)

<b>Tensão (V)</b>	<b>Corrente (A)</b>	<b>Velocidade (cm/min)</b>	<b>Altura (mm)</b>	<b>Largura (mm)</b>	<b>Penetração (mm)</b>
26	350	46,5	2,43	7,33	0,9
25	348	31,9	2,5	8,5	0,91
22,2	356	62,3	2,52	7,53	1,03
27,8	361	46,5	2,3	6,56	0,89
25,4	340	31,9	2,47	8,14	0,91
28,1	330	62,3	2,21	5,99	0,62
26,3	360	46,5	2,1	6,62	0,92
24,3	339	31,9	2,61	9,13	0,88
25	368	62,3	2,14	7,45	0,78
29,3	372	46,5	1,98	6,13	0,67
31,2	310	46,5	1,86	6,16	0,65
22	308	46,5	1,56	4,66	0,45
27,1	370	46,5	2,48	7,71	0,94
24,7	382	46,5	3,93	4,18	0,74
26,8	389	46,5	2,62	9,58	0,85
28,6	307	31,9	2,22	7,21	0,74
26,2	311	31,9	2,28	7,45	0,75
22,5	315	31,9	0,63	7,33	0,63
30	306	62,3	2,07	7,49	0,91
32,6	307	62,3	1,92	4,85	0,54
31	306	62,3	1,91	6,25	0,57
26	378	62,3	2,12	8,85	1,03
25,1	392	62,3	3	4,89	1,63
23	322	62,3	1,95	8,46	1,09

## ANEXO A – Tabelas com os resultados da soldagem BOP (cont.).

E70C-6M (1,2 mm)

<b>Tensão (V)</b>	<b>Corrente (A)</b>	<b>Velocidade (cm/min)</b>	<b>Altura (mm)</b>	<b>Largura (mm)</b>	<b>Penetração (mm)</b>
19	187	46,5	3,35	6,45	0,43
19,5	184	31,9	2,02	4,36	1,19
20	188	62,3	1,68	2,96	0,42
17	186	46,5	2,44	6,93	1,59
18,5	180	31,9	2,09	4,35	1,25
19	177	62,3	1,51	3,06	0,74
23	175	46,5	1,93	5,14	0,93
21	180	31,9	2,23	4,96	1,51
22	186	62,3	1,61	3,21	0,71
21	135	46,5	1,36	4,07	0,55
18,5	135	46,5	1,47	4,46	0,75
22	131	46,5	1,39	4,26	0,76
19,5	195	46,5	2,15	7,33	1,68
17,2	240	46,5	2,76	7,38	2,02
21,4	220	46,5	3,13	9,78	1,73
21	145	31,9	1,81	4,27	0,85
18	140	31,9	1,94	4,88	0,95
22,5	138	31,9	1,79	5,06	1,07
19,6	135	62,3	1,28	2,88	0,54
19	134	62,3	1,05	3,1	0,72
23,3	137	62,3	1,77	4,88	1,1
19,4	221	62,3	1,78	3,32	1,14
16,8	223	62,3	1,81	3,42	1,07
21	221	62,3	2,15	3,47	1,02

## ANEXO A – Tabelas com os resultados da soldagem BOP (cont.).

## E70C-6M (1,0 mm)

<b>Tensão (V)</b>	<b>Corrente (A)</b>	<b>Velocidade (cm/min)</b>	<b>Altura (mm)</b>	<b>Largura (mm)</b>	<b>Penetração (mm)</b>
21	184	46,5	2,81	6,61	1,66
22	182	31,9	2,31	7,56	2
22	185	62,3	2,92	6,54	0,9
20	185	46,5	3,14	7,34	1,24
20	183	31,9	2,65	6,43	2,07
20	172	62,3	3,68	9,21	1,15
22	176	46,5	2,17	6,52	1,54
23	185	31,9	2,28	8,3	1,92
23	187	62,3	2,99	8,73	0,8
18	128	46,5	2,07	5,15	1,41
18	136	46,5	1,87	5,55	1,46
20,5	132	46,5	1,96	5,44	1,31
22	200	46,5	2,06	8,38	1,81
18	240	46,5	5,41	9,7	0,73
22	225	46,5	4,06	9,18	2,44
19	145	31,9	2,73	6,74	1,78
17	140	31,9	2,73	6,36	1,49
20	136	31,9	2,63	5,94	1,61
22	135	62,3	1,72	5,08	0,61
20	133	62,3	1,86	5,38	0,72
23	136	62,3	2,03	4,09	0,74
20	222	62,3	3,02	6,43	1,37
18	222	62,3	2,53	5,6	1,79
23	223	62,3	2,61	7,38	1,86