## UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

## ANÁLISE MICROESTRUTURAL DOS PROCESSOS DE SOLDAGEM MAG CONVENCIONAL, PULSADO E PULSADO TÉRMICO E SUA RELAÇÃO COM OS NÍVEIS DE ENERGIA

**Carlos Andrés Arango Hincapié** 

Itajubá, Agosto de 2015

## UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**Carlos Andrés Arango Hincapié** 

## ANÁLISE MICROESTRUTURAL DOS PROCESSOS DE SOLDAGEM MAG CONVENCIONAL, PULSADO E PULSADO TÉRMICO E SUA RELAÇÃO COM OS NÍVEIS DE ENERGIA

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

Área de Concentração: Projeto e fabricação

**Orientador: Prof. Dr. Edmilson Otoni Corrêa Co-Orientador: Prof. Dr. Sebastião Carlos Da Costa** 

> Agosto de 2015 Itajubá

### UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**Carlos Andrés Arango Hincapié** 

## ANÁLISE MICROESTRUTURAL DOS PROCESSOS DE SOLDAGEM MAG CONVENCIONAL, PULSADO E PULSADO TÉRMICO E SUA RELAÇÃO COM OS NÍVEIS DE ENERGIA

Dissertação aprovada por banca examinadora em 10 de Agosto de 2015, conferindo o titulo de **Mestre em Ciências em Engenharia Mecânica.** 

**Banca Examinadora:** 

Prof. Dr. Edmilson Otoni Corrêa - UNIFEI Prof. Dr. Sebastião Carlos Da Costa - UNIFEI Prof. Dr. Rosinei Batista Ribeiro - FATEA Prof. Dr. Gilbert Silva - UNIFEI

Itajubá 2015

## DEDICATÓRIA

A mis padres, por su ejemplo, amor y apoyo incondicional.

A Yohanna, por su amor, compañía y alegría.

## Agradecimentos

Aos meus orientadores professor Dr. Edmilson Otoni Corrêa e o professor Sebastião Carlos da Costa, pelo conhecimento e experiência brindados.

Ao meu amigo Alan Martins, pela confiança, apoio e valiosa amizade.

Ao professor Antonio Carlos Ancelotti Junior e o Centro de tecnologia em Compósitos da UNIFEI pelo apoio nesta pesquisa.

Aos professores e funcionários do Instituto de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Itajubá, pela assistência no meu tempo de estudo.

A mamãe Yuleimis e o Dimas, por receber-me no seu lar como parte de sua família.

À CAPES pelo apoio financeiro que permitiu a realização deste trabalho.

Aos meus amigos Alexandre e Sandra Lanza pelos momentos de lazer e ajuda no desenvolvimento da pesquisa.

"El primer paso para la solución de los problemas es el optimismo. Basta creer que se puede hacer algo para tener ya medio camino hecho y la victoria muy cercana" John Baines

### Resumo

ARANGO, C. A. H. (2015), Análise microestrutural dos processos de soldagem Mag convencional, pulsado e pulsado térmico e sua relação com os níveis de energia, Itajubá, 83 p. Dissertação, Mestrado em Projeto e Fabricação – Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá.

O processo de soldagem por arco elétrico com gás de proteção inerte (MIG) ou ativo (MAG) possui uma grande variedade de aplicação no setor industrial pela versatilidade e facilidade de automatização. Esta dissertação pretende contribuir para melhor entendimento dos efeitos metalúrgicos do processo MIG/MAG quando trabalhado sob a forma Convencional, Pulsado e Pulsado Térmico, para uma escolha mais adequada entre eles no âmbito industrial. O uso de uma fonte de soldagem multiprocessos que permite combinar os modos de soldagem Convencional (curto-circuito) e Corrente Pulsada, possibilitou estabelecer uma quarta variante adotada no desenvolvimento da pesquisa. A energia de soldagem no processo foi tomada como ponto de comparação entre os quatro processos, e numa primeira etapa foram procurados os parâmetros do equipamento para dois níveis de energia, visando sempre uma boa estabilidade e acabamento dos cordões de solda em cada um deles. Numa segunda etapa foram avaliadas as características geométricas dos cordões de cada processo frente aos níveis de energia adotados. Na terceira etapa da pesquisa foram mensuradas as áreas dos grãos e Ferrítico e Perlítico de origem Austenítico na Zona Termicamente Afetada (ZTA), além de fazer uma identificação geral das fases presentes na Zona Fundida (ZF), e sua relação com o perfil de dureza do cordão de solda. Os resultados mostram que existe uma relação direta entre os processos de soldagem e o aporte térmico, com o tamanho de grão, e uma relação inversa com o perfil de dureza do cordão, sendo o modo pulsado a melhor das opções estudadas.

Palavras-chave: MIG/MAG, Corrente Pulsada, Pulsação Térmica, Processos de Soldagem.

### Abstract

ARANGO, C. A. H. (2015), Microstructural analysis of the MAG welding, pulsed and thermal pulsed process and its energy level relationship, Itajubá, 83 p. Dissertation, Master in Mechanical Engineering - Institute of Mechanical Engineering, Federal University of Itajubá.

The gas metal arc welding (GMAW) or MIG/MAG (*Metal Inert Gas/Metal Active Gas*) has a wide variety of application in industry due to its versatility and ease of automation. This work aims to contribute to a better understanding of the metallurgical effects in order to choose them according the workplace, for conventional, pulsed and thermal pulsed welding process. The use of a multiprocess welding source that mixes the conventional welding and pulsed current, established a fourth variable adopted in this research. The energy transferred in the process was compared among the four process and firstly were found the equipment parameters to energy levels in order to achieve a good stability and weld bead finishing in each one. In a second step we evaluated the geometric characteristics of the beads in each process and adopted energy level. In the third stage of the research grain areas of Ferritic and Perlitic of Austenitic origin were measured at Heat Affected Zone, as well as the identification of the phases present in the merged zone and its relationship with the hardness and Weld Bead. The results show that there is a direct relationship between the welding processes and the energy transferred with grain size, and an inverse relationship with the bead hardness profile, being the pulsed mode the best of the options studied.

Key words: GMAW, Pulsed Current, Thermal Pulsation, Welding Processes.

## Sumario

LIST	A DE FIGURASiv	1
LIST	A DE QUADROSv	i
LIST	A DE TABELASvi	i
LIST	A DE ABREVIATURAS E SIGLASvii	i
Capítul	<b>o 1</b>	L
INTRO	DUÇÃO1	
1.1.	Justificativa	2
1.2.	Objetivos	3
1.3.	Limitações	3
1.4.	Desenvolvimento do trabalho	ŀ
Capítul	o 2	5
- FUNDA	MENTACÃO TEÓRICA	5
2.1	A soldagem MIG/MAG convencional	5
2.1.1	Parâmetros de soldagem	3
2.1.2	Energia de soldagem	2
2.2	Modos de Transferência Metálica	3
2.2.1	Transferência por curto-circuito14	ł
2.2.2	Transferência globular	5
2.2.3	Transferência globular repelida16	5
2.2.4	Transferência goticular projetada (Spray)17	7
2.2.5	Transferência goticular com elongamento17	7
2.2.6	Transferência goticular rotacional18	3
2.3	A soldagem MIG/MAG com corrente pulsada18	3
2.3.1	Energia de soldagem	

2.4	A soldagem MIG/MAG pulsado com pulsação térmica	21
2.4.1	Energia de soldagem	24
2.5	Metalurgia da soldagem	25
2.5.1	Regiões da junta soldada	25
2.5.2	Zona termicamente afetada	26
2.5.3	Zona fundida	29
2.5.4	Zona de ligação	
Capítul	0 3	33
METOI	DOLOGIA EXPERIMENTAL	
3.1	Materiais e equipamentos	
3.1.1	Equipamentos	
3.1.2	Metal de base e consumíveis	
3.1.3	Definição dos modos de soldagem	
3.1.4	Parâmetros de soldagem fixos	
3.1.5	Testes preliminares	
3.1.6	Deposição dos cordões	40
3.2	Análises Metalográficas	41
3.2.1	Extração dos corpos de prova	41
3.2.2	Preparação de amostras	42
3.2.3	Microestrutura	43
3.2.4	Geometria do cordão	45
3.2.5	Determinação da área média dos grãos na ZTA e no metal base	46
3.2.6	Ensaio de Microdureza	48
Capítul	9 4	49
RESUL	TADOS E DISCUSSÃO	49
4.1	Testes preliminares	49
4.2	Características geométricas do cordão	
4.3	Os modos pulsados.	
4.4	Tamanho de grão na ZTA	54
4.5	A microdureza na solda	57
4.6	A Zona Fundida	60
Capítul	o 5	63
CONCI	JUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	63

5.1	Conclusões
5.2	Sugestões para trabalhos futuros
APÊNI	DICES
APÊ aport	NDICE A: Planilhas de <i>Excel</i> com os parâmetros do equipamento para o cálculo do e térmico em cada modo de soldagem65
APÊ	NDICE B: Imagens macrográficas dos cordões de solda67
APÊ perlít	NDICE C: Tabelas com as durezas e áreas médias de tamanho de grão ferrítico e ico tomadas nos pontos de análises
APÊ	NDICE D: Imagens micrográficas dos pontos de análises72
REFER	RÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS81

# LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Desenho esquemático do processo MIG/MAG (MODENESI & MARQUES, 2006)
Figura 2.2: Ângulos de deslocamento da tocha (MODENESI, 2007)9
Figura 2.3: Efeito esquemático do ângulo de deslocamento no formato do cordão (MODENESI, 2007)10
Figura 2.4: Representação da distância contato peça e do stickout. Adaptado de Barra et al. (1998)
Figura 2.5: Modos de transferência metálica que acontecem no processo MIG/MAG (SCOTTI & PONOMAREV, 2008)
Figura 2.6: Condições de corrente e tensão para as diferentes formas de transferência (MODENESI, 2007)
Figura 2.7: Ciclo transferência metálica por curto-circuito (SOUZA, 2010)15
Figura 2.8:Transferência metálica globular (SCOTTI & PONOMAREV, 2008)16
Figura 2.9: Transferência metálica globular repelida (SCOTTI & PONOMAREV, 2008)16
Figura 2.10: Transferência metálica por Spray (SCOTTI & PONOMAREV, 2008)17
Figura 2.11: Transferência metálica goticular com elongamento (SCOTTI & PONOMAREV, 2008)
Figura 2.12: Transferência metálica goticular rotacional (SCOTTI & PONOMAREV, 2008).
Figura 2.13: Representação esquemática da pulsação de corrente. $I_p$ – corrente de pulso, $I_b$ - corrente de base, $t_p$ – tempo de pulso, $t_b$ – tempo base, $I_m$ – corrente media
Figura 2.14: Representação do modo de soldagem MIG/MAG Térmico (BARRA, 2003)23
Figura 2.15: Pulsado térmico combinado Pulsado/Convencional
Figura 2.16: Desenho esquemático das regiões de uma junta soldada25
Figura 2.17: Influência do pré-aquecimento na largura e na dureza da ZTA. Caso 1 sem pré- aquecimento onde B-A corresponde à largura da ZTA. Caso 2 com pré-aquecimento onde C- A corresponde à largura da ZTA (AWS, 1995)

Figura 2.18: Microestrutura da ZTA de um aço 1018 soldado com TIG com ampliação de 200x. Adaptado de Kou (2002)
Figura 2.19: Mecanismo refinação parcial nos aço carbono. Adaptado de Kou (2002)28
Figura 2.20: Refinação de grão em solda multipasse: A- Passe único, B-Microestrutura solda multipasse. Adaptado de Kou (2002)
Figura 2.21: Crescimento competitivo de grãos na zona fundida. Adaptado de Kou (2002)29
Figura 2.22: Constituintes da zona fundida em aços ferríticos, conforme Quadro 2.1. Adaptado de Modenesi (2004)
Figura 2.23: Crescimento epitaxial e solidificação da zona fundida. (FBTS, 2000)32
Figura 3.1: Sistema de deslocação: A - Tocha de soldagem, B - Carro deslocador, C - Mesa de trabalho
Figura 3.2: Fonte de soldagem AristoPower 460 completa
Figura 3.3: Bancada experimental completa
Figura 3.4: Magrografia a 10x do cordão de solda com porosidade no modo convencional com vazão de gás de 16 l/min
Figura 3.5: Modos de soldagem utilizados no trabalho: A - Convencional, B - Pulsado, C – Pulsado térmico combinado Pulsado/Convencional, D – Pulsado térmico
Figura 3.6: Planilha de <i>Excel</i> para calculo do aporte térmico em cada modo de soldagem40
Figura 3.7: Características do cordão de solda e do detalhe da região de medição das respostas de interesse. Adaptado de Barra (2003)42
Figura 3.8: Detalhe dos corpos de prova extraidos do cordao de soldas42
Figura 3.9: Equipamentos para aquisição das macrografias44
Figura 3.10: Definição da nomenclatura das macrografias44
Figura 3.11: Equipamentos para aquisição de micrografias45
Figura 3.12: Definição da nomenclatura das micrografias45
Figura 3.13: Características da geometria do cordão de solda45
Figura 3.14: Microestrutura de uma chapa de aço ASTM A36 de 9.5 mm (3/8'') de espessura (ASM, 1992)
Figura 3.15: Medição da área do grão com o software <i>Image J</i> 47
Figura 3.16: Microdurômetro utilizado nos testes48
Figura 3.17: Representação esquemática das durezas tomadas em cada ponto de interesse48
Figura 4.1: Perfis dos cordões de solda através dos processos de soldagem e seus respectivos níveis de energia: (1) 800 J/mm, (2) 1050 J/mm, (3) 600 J/mm e (4) 1300 J/mm50

Figura 4.2: Gráficos resultados dados geométricos do cordão vs. modo de soldagem: A – Área transversal total, B – Índice de penetração e C – Diluição do cordão de solda51
Figura 4.3: Gráficos das áreas de grão de cada modo de soldagem a 600J/mm e 1300 J/mm: A – Grão perlítico, B – Grão ferrítico
Figura 4.4: Evolução do tamanho do grão no perfil de solda do modo duplamente pulsado a 600 J/mm. Micrografia com ampliação de 200x
Figura 4.5: Evolução do tamanho do grão no perfil de solda do modo duplamente pulsado a 1300 J/mm. Micrografia com ampliação de 200x
Figura 4.6: Perfil de dureza na seção longitudinal da solda para cada modo de soldagem a 600 J/mm e 1300 J/mm
Figura 4.7: Comparação esquemática das ondas de corrente dos modos de soldagem Pulsado (PP) e duplamente pulsado (P) a 1300 J/mm
Figura 4.8: Imagem (100x) da inclusão de placas laterais de ferrita e ferrita acicular nos grãos de perlita de origem austenítico no modo Pulsado: A – 600 J/mm e B – 1300 J/mm de energia de soldagem
Figura 4.9: Metalografias a 100x da área central na zona fundida á 600J/mm de energia de soldagem para os modos: A-Convencional, B - Pulsado, C – Pulsado térmico combinado Pulsado/Convencional, D – Pulsado térmico
Figura 4.10: Metalografias a 100x da área central na zona fundida á 1300J/mm de energia de soldagem para os modos: A-Convencional, B - Pulsado, C – Pulsado térmico combinado Pulsado/Convencional, D – Pulsado térmico
Figura A.1: Planilha de <i>Excel</i> para 600 J/mm de aporte térmico em cada modo de soldagem
Figura A.2: Planilha de <i>Excel</i> para 800 J/mm de aporte térmico em cada modo de soldagem. 
Figura A.3: Planilha de <i>Excel</i> para 1050 J/mm de aporte térmico em cada modo de soldagem
Figura A.4: Planilha de <i>Excel</i> para 1300 J/mm de aporte térmico em cada modo de soldagem.

# LISTA DE QUADROS

Quadro	2.1:	Constituintes	da	zona	fundida	em	aços	Ferríticos,	segundo	Pargeter	&	Dolby
(1985).					•••••							31

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Características técnicas apresentadas pela fonte de soldagem	35
Tabela 3.2: Composição química do aço ATSM A36	36
Tabela 3.3: Propriedades mecânicas do aço ASTM A36	36
Tabela 3.4: Composição química do arame AWS ER 70S-6	36
Tabela 3.5: Propiedades mecânicas do arame AWS ER 70S-6	36
Tabela 3.6: Parâmetros de soldagem fixos durante o desenvolvimento dos experimentos	39
Tabela 3.7: Preparação das superfícies para análise metalográfica dos corpos de prova	43
Tabela 4.1: Resultados obtidos e calculados das macrografias dos cordoes de solda de ca modo nos niveis de energia de soldagem de 600J/mm e 1300 J/mm	da 51
Tabela 4.2: Identificação dos pontos a serem comparados entre as fases	52
Tabela 4.3: Dureza em Vickers nos pontos A-L do modo de soldagem CP a 600 J/mm	53
Tabela 4.4: Área média em μm <sup>2</sup> nos pontos D-F e J-L do modo de soldagem pulsado a 60 J/mm.	00 53
Tabela 4.5: Dureza em Vickers nos pontos A-L do processo PP a 600 J/mm e 1300 J/mm	54
Tabela 4.6: Comparação dos parâmetros de soldagem das ondas de corrente dos modos P e I a 1300 J/mm.	PP 59
Tabela C.1: Durezas média em Vickers e desvio padrão dos dados tomados nos pontos n pontos de análises A-L para 600 J/mm de aporte térmico em cada modo de soldagem	os 68
Tabela C.2: Durezas média em Vickers e desvio padrão dos dados tomados nos pontos análises A-L para 1300 J/mm de aporte térmico em cada modo de soldagem	de 69
Tabela C.3: Durezas média e desvio padrão dos dados tomados no metal base usado n experimentos	os 69
Tabela C.4: Área média em µm <sup>2</sup> e desvio padrão dos dados tomados nos pontos de análises l F e J-L para 600 J/mm de aporte térmico em cada modo de soldagem	D- 70
Tabela C.5: Área média em μm <sup>2</sup> e desvio padrão dos dados tomados nos pontos de anális D-F e J-L para 1300 J/mm de aporte térmico em cada modo de soldagem	es 71
Tabela C.6: Área média em $\mu m^2$ e desvio padrão dos dados tomados no metal base usado n experimentos.	os 71

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

α	Ângulo do plano de deslocamento da tocha de soldagem
θ	Ângulo de trabalho da tocha de soldagem
А	Amperes.
AF	Ferrita acicular
AISI	American Iron and Steel Institute
A <sub>p</sub>	Área de penetração da solda
A <sub>r</sub>	Área de reforço da solda
ASTM	American Society for Testing and Materials
A <sub>t</sub>	Área transversal total da solda
AWS	American Welding Society
bt	Base térmica
С	Carbono
С	Modo de soldagem Convencional (curto-circuito)
CC	Corrente constante
$CO_2$	Dióxido de carbono
СР	Modo de soldagem combinado Pulsado/Convencional
Cr	Cromo
Cu	Cobre
CV	Tensão constante
D	Diluição da solda
DBCP	Distância Bico Contato Peça
DP	Desvio Padrão
dV	Diagonal identação Vickers
ER	Eletrodo revestido
f	Eficiência térmica.
FC	Agregado Ferrita Carboneto
FCAW	Flux Cored Arc Welding

FS (A)	Ferrita com segunda fase alinhada
FS (NA)	Ferrita com segunda fase não alinhada
GMAW	Gas Metal Arc Welding
GTAW	Gas Tungsten Arc Welding
Н	Energia de soldagem
$H_2$	Hidrogênio
Не	Hélio
HV	Dureza Vickers
Ι	Corrente de soldagem
I <sub>b</sub>	Corrente de base
$I_{bb}$	Corrente de base na base térmica
$I_{bp}$	Corrente de base no pulso térmico
IIW	International Institute of Welding
Im	Corrente média.
I <sub>mbt</sub>	Corrente média no pulso térmico
I <sub>mt</sub>	Corrente média total
Ip	Corrente de pulso
IND <sub>p</sub>	Índice de penetração da solda
$I_{pb}$	Corrente de pulso na base térmica
$I_{pp}$	Corrente de pulso no pulso térmico
I <sub>t</sub>	Corrente de transição
$l ou l_0$	Comprimento livre do arame
l	Largura do cordão de solda
М	Martensita
MAG	Metal Active Gas
MIG	Metal Inert Gas
Mn	Manganês
Mo	Molibdênio
Ni	Níquel
O <sub>2</sub>	Oxigênio
Р	Fósforo
pen	Penetração do cordão de solda
Р	Modo de soldagem Pulsado
PF (G)	Ferrita primária de contorno de grão

PF (I)	Ferrita primária intragranular
PP	Modo de soldagem Pulsado térmico
pt	Pulso térmico
r	Reforço do cordão de solda
S	Enxofre
Si	Silício
SiC	Carboneto de Silício
SMAW	Shielded Metal Arc Welding
t	Espessura da chapa.
t <sub>b</sub>	Tempo base
t <sub>bb</sub>	Tempo de base na base térmica
$t_{bp}$	Tempo de base no pulso térmico
$t_{bt}$	Tempo da base térmica.
TIG	Tungstênio Inerte Gás
t <sub>p</sub>	Tempo de pulso
$t_{pb}$	Tempo de pulso na base térmica
$t_{pp}$	Tempo de pulso no pulso térmico
$t_{pt}$	Tempo do pulso térmico
T <sub>t</sub>	Período térmico
V	Tensão de soldagem
V	Vanádio
va <sub>pt</sub>	Velocidade de alimentação do arame no pulso térmico
va <sub>bt</sub>	Velocidade de alimentação do arame na base térmica
$V_{bt}$	Tensão na base térmica
$V_m$	Tensão media
$V_{pt}$	Tensão no pulso térmico
VS	Velocidade de soldagem
ZF	Zona Fundida
ZTA	Zona Termicamente Afetada

## Capítulo 1

## **INTRODUÇÃO**

No âmbito da indústria metal mecânica, a soldagem aparece como o principal processo usado para a união permanente de peças metálicas, permitindo fabricação desde produtos ou estruturas simples, até componentes necessários para aplicações com alto grau de responsabilidade com rapidez, segurança e economia de material.

O processo de soldagem MIG/MAG (ou GMAW do inglês *Gas Metal Arc Welding*) ou soldadagem por arco com proteção gasosa é utilizado amplamente pela qualidade da solda, ampla faixa de aplicação em termos de espessuras e materiais utilizados, além da sua alta produtividade quando comparado com outros processos alternativos como o processo com eletrodos revestidos e o processo TIG (do inglês *Tungsten Inert Gas*). O eletrodo em forma de arame consumível é fornecido continuamente a partir de uma bobina facilitando sua automatização e adaptação em linhas de produção (WAINER et al., 1992).

As grandes vantagens do processo de soldagem MIG/MAG convencional e os avanços tecnológicos no campo da eletrônica levou ao desenvolvimento de novas variantes do processo, baseados na alteração da forma da onda de corrente usada. Dentre estes modos de soldagem destacam-se a soldagem com corrente pulsada, a soldagem com pulsação térmica e o modo denominado superpulso (patente ESAB) que consiste na combinação de modos diferentes de soldagem em duas fases distintas denominadas: primária e secundária. Tais variantes do processo MIG/MAG permitem, entre outras vantagens, melhorias nas propriedades físicas do cordão de solda em comparação ao modo convencional (BARRA,

2003). Porém, estes desenvolvimentos implicam em uma maior complexidade com o aumento do número das variáveis do processo de soldagem, além da exigência de uma mão de obra mais especializada e aumento no custo dos equipamentos. Adicionalmente se percebe poucos estudos comparativos entre os diferentes modos de soldagem.

O aço ASTM A36 foi escolhido nesta pesquisa como material base ao ser amplamente utilizado na indústria, de fácil aceso e pela amplia disponibilidade no mercado nacional.

Neste contexto, objetivando o aprimoramento dos processos e a busca por condições de soldagem otimizadas para aumentar a rentabilidade das empresas, deve-se partir da total compreensão de cada processo de soldagem, ademais das vantagens e desvantagens de cada um deles.

Pelo exposto anteriormente, esta dissertação de mestrado pretende contribuir com o estudo dos efeitos do aporte térmico na geometria do cordão e metalurgia da soldagem ao realizar uma comparação dos diferentes modos de soldagem (MIG/MAG convencional, corrente pulsada, pulsação térmica e superpulso), ao entregar o mesmo nível de energia em cada modo. Numa primeira etapa foi contemplada a influencia de cada processo e da energia de soldagem na geometria do cordão de solda, seguido da identificação da microestrutura apresentada na Zona fundida (ZF) e a medição do refinamento dos grãos de ferrítita e perlíta de origem austenítico na Zona Termicamente Afetada (ZTA). Na etapa final da pesquisa foi analisado o efeito das mudanças microestruturais, das ZF e da ZTA de cada condição de processo e nível de energia soldagem, na microdureza do cordão de solda.

### 1.1. Justificativa

A soldagem MIG-MAG e suas variantes são um tema atual de interesse para fabricantes de equipamentos, consumíveis e usuários, ao contrário de outros processos de soldagem como o TIG com corrente pulsada ou com pulsado térmico em que já se desenvolveram muitas pesquisas com resultados interessantes. O modo de soldagem MIG/MAG com pulsação térmica tem pouca documentação científica, ainda menos o modo Superpulso, que ao ser uma variante inovadora, as referencias na literatura são quase inexistentes e limitadas aos dados fornecidos pela *ESAB*<sup>®</sup>. Desta forma, o interesse de fazer uma contribuição para a compreensão desses modos ao ser comparado com outros mais conhecidos se torna oportuno.

## 1.2. Objetivos

Este trabalho tem como objetivo geral comparar os modos de soldagem MIG/MAG convencional, pulsado, pulsado térmico e superpulso na geometria do cordão da solda e efeitos microestruturais na Zona Fundida e na Zona Termicamente Afetada, entregando em cada um deles a mesma energia em dois níveis diferentes utilizando o aço A36 como metal base.

Também neste trabalho pretende-se cumprir os seguintes objetivos específicos com o fim de alcançar o objetivo geral proposto:

- Ajustar os parâmetros da fonte de soldagem para dois níveis diferentes de aporte térmico em cada modo de soldagem, tendo como objetivo principal uma boa estabilidade, visando sempre a menor quantidade de respingos e o melhor acabamento da superfície do cordão.
- Avaliar a possível relação do aporte térmico em cada modo de soldagem adotado com as características da geometria do cordão de solda.
- Identificar se existe diferença no tamanho de grão e microdureza entre as fases dos modos de soldagem pulsados.
- 4. Identificar os componentes da microestrutura da zona fundida e relacionar os mesmos com a microdureza.
- Avaliar a possível relação do aporte térmico em cada processo de soldagem com o tamanho do grão na ZTA da solda.

## 1.3. Limitações

Tornam-se fatores limitantes na execução deste projeto de pesquisa:

 Os experimentos foram exclusivamente voltados ao aço carbono; qualquer reprodução dos parâmetros utilizados neste trabalho para soldagem em outro material pode não corresponder às expectativas mencionadas;

- Em virtude da análise da largura, reforço e penetração dos cordões de solda, foram realizadas soldas de simples deposição. Sendo assim, ensaios que analisam a resistência a deformações não foram analisados;
- Como mencionado anteriormente, as soldas foram realizadas em simples deposição; restringe-se neste contexto, apenas a posição plana de soldagem em todos os experimentos;
- 4. Devido ao grande número de parâmetros reguláveis no processo, foi necessário manter fixas algumas variáveis do processo, tais como: material e diâmetro do arame eletrodo, gás de proteção, vazão de gás, distância bico contato peça (DBCP) e o ângulo de deslocamento da tocha.

### 1.4. Desenvolvimento do trabalho

Esta dissertação está estruturada, além deste primeiro capítulo introdutório, em outros quatro capítulos, que são descritos a seguir:

O Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica dos modos de soldagem MIG/MAG convencional, pulsado e pulsado térmico, parâmetros de soldagem e o aporte térmico em cada modo, assim como uma base de metalurgia da soldagem.

O Capítulo 3 mostra o processo experimental para os processos de soldagem MAG adotados, procedimento de preparação das amostras e os equipamentos utilizados no estudo.

O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos e as análises da influência do aporte térmico em cada processo na geometria e na microestrutura do cordão de solda.

No Capitulo 5 são apresentadas as conclusões deste trabalho e as sugestões para os trabalhos futuros no tema.

## Capítulo 2

# FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A revisão bibliográfica que será apresentada, neste capítulo, tem como finalidade reunir informações a respeito do processo de soldagem por arco elétrico com gás de proteção (GMAW do inglês *Gas Metal Arc Welding*) ou MIG/MAG, nos modos: convencional, pulsado e pulsação térmica; além dos tipos de transferência metálica, as quais servirão de base no conhecimento técnico e científico para a realização e discussão dos resultados adquiridos nesta pesquisa. Esta revisão terá ênfase no aporte térmico em cada um dos modos de soldagem.

### 2.1 A soldagem MIG/MAG convencional

Na década de 1920, a soldadura por arco eléctrico com eletrodo sem proteção começou a ser usada na soldagem das carcaças de eixo para automóveis. A introdução da soldadura por arco elétrico com proteção gasosa GMAW, foi comercialmente viável após 1948. Inicialmente foi empregado com um gás de proteção inerte na soldagem do alumínio. Consequentemente, o termo soldagem MIG foi inicialmente aplicado e ainda é uma referência ao processo (JEFFUS, 2004).

Na soldagem GMAW, um arco elétrico é estabelecido entre a peça e um consumível na forma de arame. Pode ser descrito mais detalhadamente como um processo de soldagem a arco que utiliza um eletrodo consumível nu, o qual é fornecido continuamente a partir de uma bobina. A proteção é realizada por um gás externo, que pode ser totalmente inerte (MIG, do inglês *Metal Inert Gas*) usando Argônio ou Hélio, ou parcialmente ativo (MAG, do inglês *Metal Active Gas*), usando  $CO_2$  puro ou misturas de Argônio com  $CO_2$  ou  $O_2$ , é responsável por criar o ambiente em que se forma o arco e por evitar a oxidação a poça de fusão e as gotas metálicas em transferência. O eletrodo é constituído de um arame com diâmetro entre 0,8 e 1,6 mm (JEFFUS, 2004), que é bobinado em carretéis apropriados e conduzidos até o arco através de pequenos rolos impulsionadores acionados por um motor. O arame-eletrodo se funde no calor do arco e o metal liquefeito é impelido em direção ao material de base, em que formará a poça de fusão. O arco voltaico fica inteiramente dentro do gás de proteção que ioniza e protege a poça líquida e o cordão solidificado. Na Figura 2.1 é mostrado esquematicamente o processo.



Figura 2.1: Desenho esquemático do processo MIG/MAG (MODENESI & MARQUES, 2006).

Em virtude de o eletrodo ser nu e seu comprimento útil muito pequeno, podem-se usar elevadas densidades de corrente, cerca de dez vezes maior do que é possível na soldagem a arco com eletrodos revestidos (DE SOUZA, 2011). Isso possibilita obter uma elevada velocidade de soldagem e menor tempo de enchimento da junta. No entanto, isto implica em algumas limitações: o cordão de solda, devido à alta velocidade de soldagem, sofre uma velocidade de resfriamento relativamente alta, o que é grave quando o material for susceptível a trincas por hidrogênio (PIZA, 2000; WAINER et al., 1992).

De um modo geral, pode-se dizer que as principais vantagens da soldagem MIG/MAG são (BARRA 2003):

- A soldagem pode ser executada em todas as posições;
- O metal de solda depositado possui baixo potencial de hidrogênio difusível;
- Inexistência de troca frequente de eletrodos porque o eletrodo é alimentado continuamente a partir de um carretel;
- Altas velocidades de soldagem o que acarreta menos distorções da peça;
- Não há necessidade de operações de remoção de escória;
- Menor exigência de habilidade do soldador, comparado a soldagem com eletrodos revestidos;
- Facilidade de operação;
- Conveniências para automatização e robotização.

As principais desvantagens da soldagem MIG/MAG são:

- O equipamento de soldagem é mais complexo, mais caro e menos portátil do que o de eletrodos revestidos;
- Soldagem em locais de difícil acesso devido à pistola de soldagem ser maior que o
  porta-eletrodo para soldagem manual (ER) e porque o bocal deve estar muito próximo
  da junta (10 a 20 mm) para garantir uma adequada proteção gasosa;
- Maior velocidade de resfriamento por não haver escória; o que aumenta a ocorrência de trincas, principalmente no caso de aços temperáveis;
- A soldagem deve estar protegida de correntes de ar.

Um dos mais importantes fatores a considerar na soldagem MIG é a seleção correta do arame de solda. Esse arame, em combinação com o gás de proteção, produzirá uma poça com composição química que determina as propriedades físicas e mecânicas da solda. Basicamente existem cinco fatores principais que influenciam a escolha do arame para a soldagem MIG/MAG:

- A composição química do metal de base;
- As propriedades mecânicas do metal de base;
- O gás de proteção empregado;
- O tipo de serviço ou os requisitos da especificação aplicável;
- O tipo de projeto de junta.

Entretanto, a grande experiência na soldagem industrial levou a Sociedade Americana de Soldagem (AWS, do inglês *American Welding Society*) a simplificar a seleção. Foram

desenvolvidos e fabricados arames que produzem os melhores resultados com materiais de base específicos. Embora não exista uma especificação aplicável à indústria em geral, a maioria dos arames está em conformidade com os padrões da AWS.

### 2.1.1 Parâmetros de soldagem

Segundo Barra (2003), a correta utilização do processo MIG/MAG dependerá do perfeito entendimento de como as diversas variáveis envolvidas na operação de soldagem podem influenciar na estabilidade do arco e na qualidade final do depósito. Neste ponto do capítulo é feita uma breve explanação dos principais parâmetros de soldagem e tópicos afins presentes na soldagem MIG/MAG, deixando-se uma análise mais profunda para um tópico mais à frente, quando da abordagem do modo de soldagem em corrente pulsada.

As principais influências dos parâmetros envolvidos na soldagem MIG/MAG serão colocadas de maneira simples, conforme abaixo relacionadas (DENNIS et al., 1997; JEFFUS, 2004; MACHADO, 1996).

### a) Tensão de soldagem (V)

- A tensão de soldagem influencia no insumo de calor e apresenta uma relação direta com o comprimento do arco e a largura do arco.
- Qualitativamente, para uma mesma corrente, uma tensão baixa provocará cordões mais estreitos e maior penetração, o oposto acontecendo para tensões mais altas, além da ocorrência de salpicos grosseiros.
- Valores elevados de tensão podem propiciar o aparecimento de porosidades, salpicos e mordeduras. Para valores baixos poderão surgir porosidades e sobreposições de metal na margem do cordão.
- De uma maneira geral, tensões baixas favorecem a transferência por curto-circuito e em tensões mais altas haverá tendência à transferência no modo goticular (*Spray*), conceitos que serão explicados na secção 2.2.

### b) Corrente de soldagem (I)

• Quando alta irá influenciar diretamente na geometria do cordão, no volume da poça fundida, no incremento da taxa de fusão (DE SOUZA 2010), na largura da zona

termicamente afetada (ZTA) e na microestrutura do depósito (efeito sobre o aporte térmico);

- Pode alterar o modo de transferência metálica;
- Uma elevação na corrente de soldagem irá ocasionar um aumento na rigidez do arco e reduzir o nível de salpicos minúsculos (mudança no modo de transferência).

### c) Velocidade de soldagem (vs)

- Um aumento na velocidade de soldagem ocasiona estreitamento do cordão e uma elevação na penetração, num primeiro instante, e diminuição desta em valores maiores;
- Em velocidade muito alta poderá ocorrer o surgimento de mordeduras (geometria irregular do cordão) e de trincas de solidificação;
- O incremento na velocidade de soldagem, mantendo-se os outros parâmetros fixos, acarretará ainda uma redução no nível de distorção, tamanho da ZTA e modificação na microestrutura do metal depositado;
- Velocidade alta de soldagem, pelo efeito na taxa de resfriamento, também acarretará aumento no limite de ruptura, escoamento e redução da elongação.

### d) Ângulo de posicionamento da tocha de soldagem

O plano de deslocamento é o plano que contém o eixo da solda e a normal à face desta. O ângulo formado entre essa normal e a projeção do eletrodo no plano de deslocamento é o ângulo de deslocamento. De acordo com esse ângulo, processo será feito "puxando" ( $\theta < 0$ ) ou "empurrando" ( $\theta > 0$ ) a poça de fusão (Fig. 2.2).



Figura 2.2: Ângulos de deslocamento da tocha (MODENESI, 2007).

 O emprego do ângulo de deslocamento positivo (Fig. 2.3a) produz cordões com maior penetração e reforço convexo, embora o controle da operação de soldagem se torne mais difícil e o efeito da proteção do gás tende a diminuir, podendo gerar porosidade (BARRA, 2003);

 A utilização de um ângulo de deslocamento negativo (Fig. 2.3b) provoca baixa penetração, acompanhada de um cordão largo, chato e com reduzida incidência de salpicos (BRACARENSE 2003).



Figura 2.3: Efeito esquemático do ângulo de deslocamento no formato do cordão (MODENESI, 2007).

#### e) Distância entre o bico de contato e o metal de base (DBCP)

- A posição do bico de contato (Fig. 2.4) depende do modo de transferência com o qual se deseja soldar. De uma maneira simples para a soldagem no modo goticular (*Spray*), o bico de contato deve permanecer recuado em relação ao bocal e, para a soldagem em curto-circuito, o bico de contato deve permanecer projetado do bocal;
- Valores excessivos de DBCP podem prejudicar a blindagem gasosa, facilitar a oscilação do arame projetado, aumentar a incidência de salpicos e porosidades e tornar o cordão irregular;
- Valores baixos de DBCP podem ocasionar penetração profunda, reforços altos e cordões estreitos (pela redução no valor da tensão) e aderência de salpicos no bocal;
- Dois parâmetros estão implicitamente relacionados com o valor de DBCP, ou seja, o comprimento do arco (l<sub>0</sub>) e a projeção do arame em relação ao bico de contato (l). Para materiais resistivos (como a aço, por exemplo), um aumento em l provoca um acréscimo sobre a taxa de fusão, em decorrência da parcela de calor originada por efeito Joule (AICHELE, 2002). O valor real da projeção do arame dependerá do ponto de tomada de energia no bico-arame e das condições de operação destes.





#### f) Gases de Proteção

O gás ou mistura gasosa de proteção se caracteriza como uma variável crítica na operação de soldagem ao arco elétrico com proteção gasosa, afetando as características de ionização e formação do arco elétrico, além de proteger o metal fundido de reações de oxidação, da absorção de  $H_2$  e da formação de nitretos. O tipo de mistura empregada influencia diretamente no modo de transferência metálica (flutuação da corrente de transição  $I_t$ ), na penetração da solda (calor e forças geradas no arco), na geometria e na aparência superficial do cordão, nas características metalúrgicas do metal aportado, na velocidade de soldagem (*vs*), na tendência à formação de mordeduras e na ação de limpeza.

No processo MIG/MAG a utilização de diferentes gases ou misturas caracteriza o nível de atividade, reações metalúrgicas com a gota e com a poça de fusão, a ser imposto na região do arco.

O valor de  $I_t$ , mantendo-se constantes as demais variáveis envolvidas, é diretamente afetado pelo volume de dióxido de carbono empregado na mistura gasosa (como o Argônio, por exemplo). De maneira geral, um aumento na participação de dióxido de carbono na mistura, eleva o valor de  $I_t$ , podendo atingir um patamar deste parâmetro fora da faixa de utilização prática.

Na prática é verificado que misturas de Argônio com 5 a 10% de dióxido de carbono são aplicáveis na soldagem em corrente pulsada, tanto do aço carbono como do aço inoxidável. Contudo, teores de dióxido de carbono acima deste patamar poderão provocar instabilidade no processo de pulsação, queima de elementos de liga ou carbonatação da poça

de fusão e a possibilidade de decréscimo na resistência à corrosão de ligas inoxidáveis, sendo este decréscimo na resistência à corrosão conhecida como sensitização (BARBOSA, 2006).

Com base no que foi colocado nos dois últimos parágrafos, verifica-se certa incoerência no que se refere à exata definição (ou fronteira) entre o que seria o processo MIG ou o MAG, levando em consideração o grau de atividade do gás de proteção. Por um lado, existe uma linha de pensamento focando no efeito da mistura sobre a estabilidade do arco, a aparência superficial final do depósito e o custo de operação e, por outro lado, existe uma vertente de pensamento em que preocupação recai no efeito metalúrgico da mistura sobre o metal aportado. Assim, o mais coerente seria utilizar o nível de atividade, a partir do qual a mistura gasosa começa a interferir na estrutura da liga selecionada, para definir se o processo será MIG ou MAG.

O principal motivo da adição de gás ativo ( $O_2$ ,  $CO_2$  ou ambos) em ligas ferrosas está atrelado ao fato deste promover um grande número de pontos catódicos sobre a poça de fusão, um aumento na fluidez da poça, uma variação na tensão superficial e intensificar o processo de ionização (AWS, 1991; LITTLE e STAPON, 1990; MACHADO, 1996).

Segundo Little e Stapon (1990), a adição de  $O_2$  até valores de 5% ao Argônio melhora a estabilidade do arco, reduz a altura do reforço e aumenta a faixa de operação no modo goticular (Spray), mas valores excessivos de  $O_2$  poderão aumentar a perda de elemento de liga e gerar alguma deterioração nas propriedades mecânicas do depósito.

A vazão de gás a ser empregada em uma determinada operação de soldagem dependerá, inicialmente, da faixa de corrente a ser implementada. Valores elevados de vazão podem significar aumento no custo final da obra pela perdida de gás em excesso e, da perda de calor do arco e da possibilidade de contaminação da atmosfera do arco pela da elevação no efeito convectivo. Em contrapartida, para reduzidas vazões pode ocorrer o surgimento de porosidades, a redução nas propriedades mecânica.

### 2.1.2 Energia de soldagem

As temperaturas nas quais a junta soldada é submetida durante a soldagem dependem basicamente da energia de soldagem e da temperatura de pré-aquecimento.

A energia de soldagem ou aporte térmico do processo é calculada pela equação 2.1:

$$H = f \frac{V.I}{vs} \tag{2.1}$$

Onde:

- *H*: Energia de soldagem. (Joules) *vs*: Velocidade de soldager
- *V*: Tensão do arco (Volts).
- *I*: Intensidade de corrente (A).
- *vs*: Velocidade de soldagem (mm/min)
- f : Eficiência térmica.

#### **Observação:**

A eficiência térmica f é função do processo: SMAW, GMAW ou GTAW (AWS, 1991). Todos os modos de soldagem considerados em este estudo pertencem ao processo GMAW tornando esta função em uma constante, e como o objetivo deste trabalho é avaliar o efeito metalúrgico da energia de soldagem na zona fundida (ZF) e na ZTA, considerou-se f=1. Os conceitos de ZTA e ZF serao explicados para um tópico mais à frente, quando da abordagem da metalurgia da soldagem.

Os valores velocidade de soldagem (vs) e tensão do arco (V) são dados de entrada do processo, e o valor de intensidade da Corrente (I) é dado pelo equipamento de soldagem.

## 2.2 Modos de Transferência Metálica

A maneira pela qual o metal de adição é transferido do eletrodo para a poça fundida determina a estabilidade do processo, a possibilidade de soldar fora da posição plana, o molhamento do metal de base pela poça fundida, à quantidade de respingos, a aparência do cordão de solda e sua qualidade (em termos de ausência de defeitos como poros, falta de fusão, falta de penetração).

O metal se transfere, entre todas as forcas atuantes no processo, pelas forças eletromagnéticas e gravitacionais (TOKAR, 2011). Segundo Wainer et al. (1992), basicamente existem dois grupos principais: transferência por curto circuito e transferência por voo livre. Na transferência por voo livre sempre existe espaço entre o eletrodo e a peça, de forma que as gotas viajam através do arco. Ela inclui vários subgrupos que são: globular, globular repulsiva, goticular projetada (Spray) e goticular rotacional. A Figura 2.5 mostra os diferentes tipos de transferência metálica.



Figura 2.5: Modos de transferência metálica que acontecem no processo MIG/MAG (SCOTTI & PONOMAREV, 2008).

Os diferentes modos de transferência originam-se nas diferentes condições de soldagem. Assim, podem-se localizar alguns desses modos no sistema de coordenadas tensão x corrente, como mostrado na Fig. 2.6. Entretanto, há outros fatores, como tipo de gás de proteção e a polaridade (na soldagem com corrente contínua), que influenciam também o modo de transferência.



Figura 2.6: Condições de corrente e tensão para as diferentes formas de transferência (MODENESI, 2007).

### 2.2.1 Transferência por curto-circuito

Para ocorrer à transferência por curto-circuito deve haver um equilíbrio entre velocidade de alimentação e taxa de fusão. Uma gota de metal liquida, em crescimento, forma-se na ponta do eletrodo e atinge, periodicamente, a poça de fusão ocasionado um curto elétrico e a

extinção momentânea do arco. A transferência por curto-circuito ocorre geralmente em correntes e tensões de soldagem relativamente baixas, as quais permitem formar baixa força eletromagnética, maior diâmetro crítico da gota e arcos curtos o suficiente para que a gota toque a poça antes de se destacar (SCOTTI & PONOMAREV, 2008). Também para esses autores, as frequências de transferência de curtos-circuitos variam classicamente de 20 a 200 Hz. Para Machado (1996) no processo GMAW a transferência pelo modo curto-circuito e realizada em baixas correntes e tensões, geralmente 30 a 200 A e 15 a 22 *V*, respectivamente, sendo por isso também denominado "arco curto" e utilizando arames de pequena bitola. A Figura 2.7 ilustra um ciclo completo de curto-circuito.



Figura 2.7: Ciclo transferência metálica por curto-circuito (SOUZA, 2010).

### 2.2.2 Transferência globular

A transferência globular ocorre tipicamente com correntes baixas e tensão do arco suficientemente elevadas. Para Modenesi (2007), em uma primeira aproximação, a transferência globular típica é semelhante ao gotejamento de água. Segundo Scotti & Ponomarev (2008), caracteriza-se principalmente pela transferência irregular de gotas grandes, maiores que o diâmetro do eletrodo em baixas frequências (1 a 10 gotas por segundo). Durante a formação da gota, esta permanece no eletrodo devido à ação combinada das forcas de tensão superficial e de vaporização. Com o aumento do tamanho da gota, o seu

peso aumenta e acaba ocasionando a sua separação do arame e a gota de metal líquido se transfere para a poça de fusão por ação da gravidade.

Segundo Souza (2010), este tipo de transferência é limitado à posição plana de soldagem e esta limitação, somada à instabilidade e à geração excessiva de respingos, faz com que a transferência tipo globular seja pouco desejada na soldagem. A Figura 2.8 mostra a gotas de metal durante uma transferência do tipo globular.



Figura 2.8: Transferência metálica globular (SCOTTI & PONOMAREV, 2008).

### 2.2.3 Transferência globular repelida

A transferência globular repelida ocorre com as mesmas caraterísticas intensidade de corrente e comprimento do arco do modo globular, mas pode sofrer alteração quando o eletrodo muda de polaridade positivo para polaridade negativa, ou na mesma polaridade positiva, mas utilizando gases (hélio ou dióxido de carbono puro) que favoreçam o aparecimento de forças de reação. Segundo Scotti & Ponomarev (2008) Nestas situações, a gota passa a sofrer uma pressão elevada sobre uma pequena área, na sua parte inferior, podendo ser empurrada para cima e desviando a sua trajetória normal e, por consequência, dificultando a sua transferência para a poça de fusão.

Este modo de transferência prejudica a estabilidade do arco e causa respingos. A Figura 2.9 mostra a gotas de metal durante uma transferência do tipo globular repelida.



Figura 2.9: Transferência metálica globular repelida (SCOTTI & PONOMAREV, 2008).

### 2.2.4 Transferência goticular projetada (Spray)

A transferência goticular projetada (Spray) é caraterizada pela transferência de pequenas gotas, aproximadamente do tamanho do eletrodo, em forma sequencial y em alta frequência, maior do que 200 gotas por segundo (SCOTTI & PONOMAREV, 2008), quase formando um jato contínuo. Ocorre normalmente com tensões e correntes elevadas e polaridade positiva.

Segundo Souza (2010) Um fator importante para transferência goticular é a chamada corrente de transição. Na realidade, a dita corrente de transição é uma faixa de corrente onde, acima desta, a transferência torna-se goticular e abaixo dela a transferência não ocorre desta forma. Ela é influenciado por diversos fatores como: o gás de proteção, extensão energizada, diâmetro, composição química do arame.

A transferência por Spray (Fig. 2.10) possui uma alta taxa de deposição, mas está limitada a posição plana e de chapas grossas pela alta energia transferida a peça (CAMPOS, 2005).



Figura 2.10: Transferência metálica por Spray (SCOTTI & PONOMAREV, 2008).

### 2.2.5 Transferência goticular com elongamento

O modo de transferência goticular com elongamento e uma variante da transferência por Spray. Esse modo é caracterizado principalmente pelo elongamento da ponta do eletrodo, e para correntes maiores do que as da transferência por Spray, o arco começa a escalar a superfície do eletrodo, acarretando o aquecimento do eletrodo e levando-o a uma condição pastosa (SCOTTI & PONOMAREV, 2008).

Segundo Souza (2010), quando comparado à transferência goticular, as gotas são menores e transferidas a altíssimas taxas. Também apresenta alto aporte térmico e taxa de

fusão, sendo utilizado para soldagem de chapas grossas na posição plana. A Figura 2.11 mostra a gotas de metal durante a transferência goticular com elongamento.



Figura 2.11: Transferência metálica goticular com elongamento (SCOTTI & PONOMAREV, 2008).

### 2.2.6 Transferência goticular rotacional

Segundo Souza (2010), o modo de transferência caracterizado principalmente pelo uso de altas densidades de corrente que provocam um grande elongamento do eletrodo que começa rotacionar como mostra a Fig. 2.12. Também é caracterizada pela formação de respingos e gotas pequenas sendo arremessadas a uma alta taxa. Devido à instabilidade ocasionada pela rotação, não é um tipo de transferência desejável para soldagem.



Figura 2.12: Transferência metálica goticular rotacional (SCOTTI & PONOMAREV, 2008).

## 2.3 A soldagem MIG/MAG com corrente pulsada

A soldagem com corrente pulsada ou modo pulsado tem por objetivo à redução da energia média do arco o processo é indicado para soldagem de chapas mais finas e, ainda, para soldagens fora da posição plana.
No modo Pulsado o arco é mantido com uma corrente de base baixa, enquanto uma corrente de pulso provoca o destacamento da gota. Com isso é obtida a transferência por *Spray* com níveis de corrente médias mais baixas e menor energia no arco (CAMPOS, et al., 2012).

Segundo Barra (2003) e Campos et al. (2012), as principais vantagens e desvantagens do modo pulsado são:

Vantagens:

- Obtenção da transferência por Spray em corrente média inferior a corrente de transição.
- Redução ou eliminação na incidência de respingos e na geração de fumaça.
- Possibilidade de soldagem de espessuras menores quando comparado com o modo convencional (menor aporte térmico).
- Possibilidade de soldagem em todas as posições.
- Melhora da qualidade e aparência do cordão de solda.

Desvantagens:

- Necessidade de mão de obra mais qualificada, devido à complexidade na escolha dos parâmetros.
- Exige fontes de soldagem mais caras do que no modo convencional.
- Maior emissão de raios ultravioleta pelo arco.

O modo pulsado tem dois níveis de corrente de soldagens diferenciados, denominados corrente de base e corrente de pulso, cada qual com seu respectivo tempo de duração (Fig. 2.13).



Figura 2.13: Representação esquemática da pulsação de corrente. I<sub>p</sub> – corrente de pulso, I<sub>b</sub> - corrente de base, t<sub>p</sub> – tempo de pulso, t<sub>b</sub> – tempo base, I<sub>m</sub> – corrente media.

Neste modo, as funções das variáveis de soldagem são:

- <u>Corrente de pulso (I<sub>p</sub>)</u>: Esta deve ter um valor acima de um nível mínimo (corrente de transição), de forma que ocorra o destacamento de uma gota. Esse valor de corrente depende basicamente do material e diâmetro do eletrodo e do gás de proteção.
- <u>Tempo de pulso (t<sub>p</sub>)</u>: Depende do material e diâmetro do eletrodo e do gás de proteção, e deve ser ajustado juntamente com a corrente de pico para produzir uma gota por pulso.
- <u>Corrente de base (I<sub>b</sub>)</u>: A mesma é ajustada para que se obtenha uma corrente média que equilibre a velocidade de fusão do arame com sua velocidade de alimentação. O valor da corrente de base é limitado em dois patamares, um mínimo, abaixo do qual a manutenção do arco fica comprometida, ou seja, pode ocorrer a extinção do arco, e um máximo, acima do qual a transferência deixa de ser por spray.
- <u>Tempo de base (t<sub>b</sub>)</u>: Este deve ser ajustado conforme o diâmetro de gota pretendido de maneira que a soma do mesmo com o tempo de pulso, garanta a fusão de uma quantidade suficiente de arame para formá-la.

A corrente de pulso e o tempo de pulso são denominados parâmetros de destacamento da gota. A combinação adequada dessas duas variáveis gera um conjunto de forças que ocasiona o destacamento da gota. Deve-se observar que as mesmas permanecem inalteradas para uma dada situação de soldagem, pois estão atreladas às características do eletrodo e gás de proteção.

Mesmo que contornados estes problemas, a aplicação em campo do modo pulsado é outro ponto de dificuldade, principalmente devido a grande quantidade de variáveis as serem ajustadas e a falta de informações que relacionem estas variáveis em vasta gama de aplicações (vários tipos de eletrodo, material de base, gases, posições de soldagem, etc.), aliada ainda a falta de preparo da grande maioria dos soldadores, que por não conhecerem este modo, acabam criando vários obstáculos quanto a sua utilização.

Com o objetivo de diminuir o grau de complexidade no ajuste das variáveis de soldagem, pode-se utilizar o conceito do MIG/MAG pulsado sinérgico. Este termo foi usado pela primeira vez pelo Instituto Internacional de Soldadura (IIW, do inglês *International Institute of Welding*) no final da década de 70 para descrever um método particular de controle do modo MIG/MAG pulsado.

Resumidamente, pode-se dizer que o controle sinérgico tem como finalidade o ajuste automático das variáveis de soldagem de forma predeterminada, a partir de um conjunto mínimo de informações de entrada.

Dutra (1990) apresenta algumas formas de se obter o controle sinérgico e descreve uma metodologia para determinação da constante de destacamento de gota  $(I_p^2 x t_p)$ , bem como, do equacionamento que relaciona a corrente com a velocidade do arame.

### 2.3.1 Energia de soldagem.

O aporte térmico no processo ou energia de soldagem é calculada pela equação 2.1 como na seção 2.1.1, o valor de intensidade da corrente, que para este processo é corrente media ( $I_m$ ), calculado com os dados de entrada no processo com a equação 2.2:

$$I_m = \frac{I_p \times t_p + I_b \times t_b}{t_p + t_b}$$
(2.2)

# 2.4 A soldagem MIG/MAG pulsado com pulsação térmica

No Brasil, o início das pesquisas sobre o MIG/MAG pulsado com pulsação térmica teve início na década de 90. O pulsado térmico une as características do MIG/MAG pulsado com as vantagens do TIG pulsado, (CAMPOS et al., 2012).

O principal objetivo na utilização da soldagem MIG duplamente Pulsado é obter benefícios similares aos encontrados na soldagem TIG pulsada com baixa frequência, entre os quais se destacam: a redução da zona afetada pelo calor, o controle no gotejamento na raiz da solda e, principalmente, o refinamento dos grãos através de nucleação heterogênea devido à agitação da poça de fusão, causada por variações nos níveis da potência térmica na soldagem (DA SYLVA et al., 1995; HENKE, 2010; JANAKI et al., 1999).

Segundo Barra (2003) e Campos et al. (2012), as principais vantagens e desvantagens do modo pulsado são:

Vantagens:

- Maior controle do aporte térmico, devido ao resfriamento da poça na fase de menor corrente média.
- Refino de grãos da Zona Fundida (ZF).
- Controle sobre o tamanho da poça de fusão, melhoria nas condições de viscosidade e de tensão superficial e no aspecto do perfil do cordão de solda.
- Boa penetração e redução da espessura mínima para soldar.
- Nível de frequência adequado para ter efeito na poça de fusão (frequência térmica na faixa de 0,5 a 10 Hz).
- Curto espaço de tempo em temperaturas elevadas.
- Redução de porosidades e mordeduras.

Desvantagens:

- Formação de pontos de concentração de tensão para valores baixos de frequência térmica, devido à formação de escamas na superfície do cordão.
- Diferentes níveis de diluição entre as fases de pulso e base térmica.

A forma de onda de saída que caracteriza o processo MIG/MAG com pulsação térmica é ilustrada na Fig. 2.14, observa-se que o processo de pulsação se dá em duas fases distintas (pt e bt) e que esta variação dará como resposta diferentes níveis de calor aportado (valores diferentes para  $I_m$ ) e frequência de destacamento das gotas metálicas.

Aliando-se a vantagem dos dois processos, MAG pulsada e TIG pulsado, foi possível obter uma combinação na qual é obtida com a imposição conjunta da modulação nos sinais de corrente media e da velocidade de alimentação do arame em duas fases distintas. A primeira fase, denominada pulso térmico (pt), é caracterizada pela presença de valores altos de corrente média (corrente média no pulso térmico –  $I_{mpt}$ ) e da velocidade de alimentação do arame (velocidade de alimentação do arame no pulso térmico –  $va_{pt}$ ). Complementando o período térmico ( $T_t$ ) vem a fase de base térmica (bt), que se distingue pela injunção de valores baixos de corrente média (corrente média na base térmica –  $I_{mbt}$ ) e da velocidade de alimentação do arame no pulso térmico –  $va_{pt}$ ).



Figura 2.14: Representação do modo de soldagem MIG/MAG Térmico (BARRA, 2003).

Uma variante da soldagem com pulsação térmica é o Superpulso desenvolvido e patenteado pela *ESAB*®. Este modo de soldagem permite escolher entre as combinações Pulsado/Curto-circuito e Pulsado/Spray, obtendo como resultado transferências de calor e penetrações mais uniformes minimizando as variações na preparação do passe raiz (RADICI, 2011).

Para efeitos de estandardização dos nomes dos modos de soldagem nesta pesquisa, o Superpulso será definido como o modo Pulsado térmico combinado, onde os modos convencional e pulsado são combinados numa onda de corrente com duas fases diferentes: *primaria* e *secundaria*. A *fase primária* adota a onda de corrente do modo pulsado e a *fase secundária* adota a onda de corrente do modo convencional (curto-circuito) como apresenta a Fig: 2.15.



Figura 2.15: Pulsado térmico combinado Pulsado/Convencional

### 2.4.1 Energia de soldagem.

A energia de soldagem, da mesma forma que na seção 2.1.1, é calculada pela equação 2.1, o valor de intensidade da corrente, que para o modo pulsado térmico e pulsado térmico combinado é corrente media total ( $I_{mt}$ ), calculado com os dados de entrada com as equações 2.3 e 2.4 respetivamente:

$$I_{mt} = \frac{\left(\frac{I_{pp} \times t_{pp} + I_{bp} \times t_{bp}}{t_{pp} + t_{bp}}\right) \times t_{pt} + \left(\frac{I_{pb} \times t_{pb} + I_{bb} \times t_{bb}}{t_{pb} + t_{bb}}\right) \times t_{bt}}{t_{pt} + t_{bt}}$$
(2.3)

$$I_{mt} = \frac{\left(\frac{I_{pp} \times t_{pp} + I_{bp} \times t_{bp}}{t_{pp} + t_{bp}}\right) \times t_{pt} + (I_b) \times t_{bt}}{t_{pt} + t_{bt}}$$
(2.4)

Onde:

- *I<sub>pp</sub>*: Corrente de pulso no pulso térmico
- *I<sub>bp</sub>*: Corrente de base no pulso térmico
- *t<sub>pp</sub>*: Tempo de pulso no pulso térmico
- *t<sub>bp</sub>*: Tempo de base no pulso térmico
- *t<sub>pt</sub>*: Tempo do pulso térmico
- *I<sub>pb</sub>*: Corrente de pulso na base térmica

- *I*<sub>bb</sub>: Corrente de base na base térmica
- *t<sub>pb</sub>*: Tempo de pulso na base térmica
- *t*<sub>bb</sub>: Tempo de base na base térmica
- *t<sub>bt</sub>*: Tempo da base térmica
- *I<sub>b</sub>*: Corrente na base térmica

O valor da tensão é calculada de igual maneira para os dois modos de soldagem como tensão media ( $V_m$ ), com os dados de entrada na equação 2.5:

$$V_m = \frac{V_{pt} \times t_{pt} + V_{bt} \times t_{bt}}{t_{pt} + t_{bt}}$$
(2.5)

Onde:

 $V_{pt}$ : Tensão no pulso térmico •  $V_{bt}$ : Tensão na base térmica

# 2.5 Metalurgia da soldagem

Nesta parte do capítulo pretende-se explicar as diferentes regiões da junta soldada e a composição microestrutural, comumente encontrada em cada uma delas depois do processo de soldagem MIG/MAG.

#### 2.5.1 Regiões da junta soldada

Em juntas soldadas, as principais regiões analisadas, em termos de microestrutura, são: Zona Fundida ou metal de solda (ZF), Zona Termicamente Afetada (ZTA) e zona de ligação. Estas regiões podem ser observadas na Fig. 2.16.



Figura 2.16: Desenho esquemático das regiões de uma 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.

### 2.5.2 Zona termicamente afetada

A ZTA é a região da junta soldada localizada ao lado da zona fundida, a qual sofre alterações microestruturais devido ao ciclo térmico sofrido por esta região durante a soldagem.

A largura da ZTA é influenciada pelo aporte térmico. A Figura 2.17 mostra a influência do pré-aquecimento na largura da ZTA e na dureza desta região. O pré-aquecimento aumenta a energia final de soldagem, aumentando assim a largura da ZTA, mas este pré-aquecimento diminui significativamente a taxa de resfriamento, promovendo uma redução da dureza nesta região.



Figura 2.17: Influência do pré-aquecimento na largura e na dureza da ZTA. Caso 1 sem pré-aquecimento onde B-A corresponde à largura da ZTA. Caso 2 com pré-aquecimento onde C-A corresponde à largura da ZTA (AWS, 1995).

Para mostrar o efeito da temperatura nas mudanças microestruturais ao percorrer a ZTA, toma-se como exemplo o aço AISI 1018 depois do processo de soldar com TIG apresentado na Fig. 2.18.



Figura 2.18: Microestrutura da ZTA de um aço 1018 soldado com TIG com ampliação de 200x. Adaptado de Kou (2002).

Segundo Kou (2002), o metal base é constituído de ferrita (fases claras) e perlita (fases escuras) como mostrado na Fig. 2.18A. De uma forma geral, a microestrutura da ZTA pode ser dividida em três regiões: grão parcialmente refinado, grão refinado e grão grosseiro (Pontos B-D na Fig. 2.18). A região do grão de refinação parcial (posição B na Fig. 2.18) é aquecida a uma temperatura onde a perlita (P) transforma-se em austenita ( $\gamma$ ) (austenitização). No resfriamento a austenita transforma-se em ferrita pro-eutetóide e grãos extremamente finos

de perlita como mostrado na Fig. 2.19. As regiões de ferrita iniciais são essencialmente inalteradas.



Figura 2.19: Mecanismo refinação parcial nos aço carbono. Adaptado de Kou (2002).

A região do grão refinado (posição C na Fig. 2.18) é submetida a uma temperatura maior que permite a nucleação da austenita. Tais grãos de austenita decompõem em ferrita e em pequenos grãos de perlita durante o subsequente resfriamento. A distribuição de perlita e ferrita não é exatamente uniforme porque o tempo de difusão para o carbono é limitado devido a alta taxa de aquecimento durante a soldagem e a austenita resultante não é homogênea.

A região do grão grosseiro (posição D na Fig. 2.18) é submetida ao maior grau de temperatura da ZTA, permitindo assim que os grãos de austenita possam crescer. A alta taxa de resfriamento e grãos de austenita maiores, propiciam à ferrita a formar placas laterais nos contornos do grão, chamada Ferrita de Widmanstätten (CHADWICK, 1972).

Na região de grão grosseiro perto do limite da zona de ligação, resulta em grãos colunares maiores comparados com a média do tamanho do grão na ZTA. Como apresenta a Fig. 2.20, com a soldagem multipasses de juntas, a zona fundida de um primeiro passe pode ser substituída pela ZTA dos passes subsequentes. Este refinamento de grão perto da zona de ligação, melhora a tenacidade da solda neste tipo de juntas (EVANS, 1980).





Figura 2.20: Refinação de grão em solda multipasse: A- Passe único, B-Microestrutura solda multipasse. Adaptado de Kou (2002).

## 2.5.3 Zona fundida

A Zona fundida é a região na qual, durante a soldagem, ocorre a fusão do metal de solda e também a diluição entre metal de base e metal de solda.

Um fenômeno que ocorre nesta região é o crescimento competitivo de grãos (Fig. 2.21). Durante a solidificação, os grãos tendem a crescer na direção perpendicular a interface líquido/sólido, desde que esta seja a direção do gradiente máximo de temperatura e, portanto, a direção da força máxima para solidificação. Apesar disto, os grãos também tem sua própria direção preferencial de crescimento, chamada de direção de crescimento fácil, por exemplo, as células colunares ou dendritas dentro de cada grão tendem a crescer nessa direcção (KOU, 2002).



Figura 2.21: Crescimento competitivo de grãos na zona fundida. Adaptado de Kou (2002).

As principais fases da Zona Fundida em aços de baixo carbono são (ASM, 1997):

- 1. Ferrita primária:
  - a. Ferrita no contorno de grão: Ferrita pro-eutetóide que cresce ao longo da Austenita primária nos contornos de grão. É equiaxial ou poligonal, e pode ocorrer em veios.
  - b. Ferrita poligonal intragranular: ferrita poligonal que não é associada à austenita primária nos contornos de grão. É muito maior que a largura média das ripas de ferrita acicular.
- 2. Ferrita com segunda fase:
  - a. Com alinhamento da segunda fase: ripas de ferrita paralelas classificadas como Ferrita de Widmanstätten e Bainita (superior/inferior)
  - b. Com a segunda fase não alinhada: Ferrita randomicamente distribuída, ou ripas isoladas de ferrita.
  - c. Agregado de ferrita com carboneto: uma estrutura fina de ferrita com carboneto incluindo Perlita.
- Ferrita acicular: pequenos grãos de ferrita não alinhada encontradas dentro de grãos da austenita primária.
- 4. Martensita: colônia de Martensita maior que as ripas de Ferrita adjacentes.

Em soldas de aço baixo carbono uma grande quantidade de ferrita está associada com baixos níveis de dureza e resistência mecânica (aço dúctil), enquanto que microestruturas como martensita e bainita estão associadas a altas durezas e altos níveis de resistência mecânica, porém aumentando também sua fragilidade.

Martensita e Bainita são também associadas a altas taxas de resfriamento, assim diminuindo a quantidade de manganês, ou reduzindo a taxa de resfriamento com o aumento do aporte térmico ou pré-aquecimento, a quantidade de ferrita acicular aumenta, melhorando assim a resistência mecânica da solda.

A caracterização microestrutural das soldas tem dois propósitos básicos: avaliar a microestrutura com as respectivas propriedades, e relacionar a microestrutura com o processo de soldagem utilizado.

O objetivo é aperfeiçoar o processo de soldagem para produzir a microestrutura desejada.

Em geral, os efeitos do modo dos parâmetros de soldagem na microestrutura são devido aos efeitos térmicos e de composição química. Os efeitos da composição química estão ligados na zona de fusão, enquanto os efeitos térmicos afetam a zona de fusão e a ZTA.

Os constituintes da zona fundida de aços ferríticos-perlíticos são identificados segundo codificação do IIW, conforme descrito no Quadro 2.1 e ilustrado na Fig. 2.22, (MODENESI, 2004).

Quadro 2.1: Constituintes da zona fundida em aços Ferríticos, segundo Pargeter & Dolby (1985).

CC	CÓDIGO	
FERRITA	FERRITA DE CONTORNO DE GRÃO	PF(G)
PRIMÁRIA	FERRITA POLIGONAL INTRAGRANULAR	PF(I)
FERRITA ACICULAR	AF	
FERRITA CO FASE AL	M SEGUNDA INHADA	FS(A)
FERRITA CO FASE NÃO	M SEGUNDA ALINHADA	FS(NA)
AGREGADO CARBO	FC	
MARTE	м	



Figura 2.22: Constituintes da zona fundida em aços ferríticos, conforme Quadro 2.1. Adaptado de Modenesi (2004).

# 2.5.4 Zona de ligação

É a região limite entre a poça de fusão (líquida) e o metal de base (sólido). A partir desta linha é iniciada a solidificação e o crescimento dos grãos em direção à linha central da solda formando o metal de solda. Este processo é chamado de epitaxia ou crescimento epitaxial, (KOU, 2002). O crescimento do grão inicia-se pelo agrupamento dos átomos da fase líquida no substrato sólido existente, estendendo este, sem alterar a orientação cristalográfica do substrato, conforme ilustrado na Fig. 2.23.



Figura 2.23: Crescimento epitaxial e solidificação da zona fundida. (FBTS, 2000).

# Capítulo 3

# METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Este capítulo apresenta uma descrição de todos os materiais e procedimentos experimentais empregados para a realização das soldas e posterior caracterização microestrutural e determinação da sua microdureza.

# 3.1 Materiais e equipamentos

# 3.1.1 Equipamentos

O sistema utilizado para realização dos ensaios de soldagem consiste das seguintes partes: Carro deslocador, mesa de trabalho, fonte de soldagem com alimentador de arame, tocha de soldagem e unidade refrigerante.

O carro deslocador ou tartaruga de um eixo possui um sistema para variação da velocidade de deslocação em mm/min. Na Figura 3.1 pode-se observar o sistema de deslocação da bancada experimental.



Figura 3.1: Sistema de deslocação: A - Tocha de soldagem, B - Carro deslocador, C - Mesa de trabalho

A fonte utilizada foi o equipamento **AristoPower 460** (Fig. 3.2), sendo esta uma fonte corrente constante (CC) e tensão constante (CV), trifásica, projetada com tecnologia chopper dc no secundário sem contator e circuito de controle eletrônico. É considerada uma fonte multiprocesso projetada para fornecer a característica volts/amperes para a soldagem MIG convencional (GMAW) e arames tubulares (FCAW) no modo tensão constante (CV), MIG Pulsado (GMAW-P), eletrodos revestidos (SMAW).



Figura 3.2: Fonte de soldagem AristoPower 460 completa.

Esta fonte fornece uma corrente nominal de 450 amperes a 100% do ciclo de trabalho; o alimentador **AristoFeed 3004W** junto com o controle digital de segunda geração **Aristo U82** e tocha **PMC 501 RW** refrigerada por água, fornece arame com velocidades entre 0,8 m/min e 25 m/min. Na Tabela 3.1 são descritas outras características técnicas do equipamento.

Item	Característica			
Faixa de Corrente (A)	10 -	500		
Tensão em vazio máxima (V)	8	0		
Corrente Nominal (A)	45	50		
Cargas Autoriz	zadas			
Fator de Trabalho (%)	100	60		
Corrente	450	500		
Tensão em carga (V)	38	40		
Alimentação Elétrica (V-Hz)	220 / 380 / 6	′ 440 - 50 / 0		
Potência Aparente Nominal (KVA)	25			
Classe Térmica (°C)	H (180 °C)			
Dimensões (L x C x A - mm)	700 x 1250 x 840			
Peso (Kg)	18	35		

Tabela 3.1: Características técnicas apresentadas pela fonte de soldagem

A bancada experimental completa pode-se observar na Fig. 3.3.



Figura 3.3: Bancada experimental completa.

### 3.1.2 Metal de base e consumíveis

#### a) Metal base

Para avaliação dos possíveis efeitos dos processos de soldagem utilizados neste trabalho sobre as características geométricas do cordão, a microestrutura da zona fundida (ZF) e da Zona termicamente afetada pelo calor (ZTA) selecionou-se uma liga de aço com baixo teor de carbono (ASTM A36). Na Tabela 3.2 apresenta-se a composição química, e na Tab. 3.3 são relacionadas às principais propriedades mecânicas do metal de base.

Tabela 3.2: Composição química do aço ATSM A36.

Elemento	С	Р	S	Si
% em peso máx.	0,25	0,04	0,05	0,4

Tabela 3.3: Propriedades mecânicas do aço ASTM A36

Dureza	Limite escoamento	Limite de	Alongamento	Alongamento	
Rockwell B	mín. (MPa)	resistência (MPa)	200 mm (%)	50 mm (%)	
73	250	400-550	20	21	

A microdureza do material foi validada experimentalmente e os resultados são apresentados na Tabela C.3 nos apêndices do documento.

#### b) Metal de adição

O metal de adição para confecção dos cordões de solda (AWS ER 70S-6) foi selecionado com base em recomendações propostas por fabricantes de consumíveis, tendo como referência a composição química do metal de base. A Tabela 3.4 apresenta a composição química, e na Tab 3.5 são relacionadas às principais propriedades mecânicas do metal de adição.

Tabela 3.4: Composição química do arame AWS ER 70S-6.

Elemento	С	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Cu
% Em	0,06-0,15	1,4-1,85	0,8-1,15	0,025	0,035	0,15	0,15	0,15	0,03	0,5

Tabela 3.5: Propiedades mecânicas do arame AWS ER 70S-6

Ensaio de	Alongomonto	Encoio	
Limite resistência (MPa) (MPa)		(%)	Impacto
480	400	22	27J –20 °C

#### c) Gás de proteção

O gás de proteção empregado foi uma mistura de Argônio com 2% de Oxigênio. A escolha desse gás foi em função das considerações explanadas na fundamentação teórica, sendo citado que o argônio possui baixo potencial de ionização, apresentando maior facilidade de abertura e estabilidade do arco. Porém, para metais reativos, sempre é necessária a presença de um gás ativo para soldagem. Assim, foi utilizado o gás O<sub>2</sub> com percentual limitado em 2%, com o objetivo de aumentar a fluidez da poça de fusão (LITTLE e STAPON 1990).

A vazão de gás foi verificada com um fluxômetro na saída da tocha de soldagem e inicialmente foi fixada em 16 l/min, mas devido a problemas de porosidade no cordão de solda no modo convencional (Fig. 3.4), a vazão de gás foi aumentada para 20 l/min.



Figura 3.4: Magrografia a 10x do cordão de solda com porosidade no modo convencional com vazão de gás de 16 l/min.

#### 3.1.3 Definição dos modos de soldagem

Neste item se apresentam os modos de soldagem utilizados no desenvolvimento dos experimentos. Inicialmente na concepção dos objetivos deste foram considerados três modos: Soldagem MIG/MAG Convencional, Pulsado e Pulsado térmico, mas dado que a fonte de soldagem utilizada neste trabalho tem a possibilidade de combinar dois deles: o modo Pulsado e o Convencional, como foi detalhado no item 2.4 desta dissertação, o pulsado térmico combinado adota o modo de soldagem Pulsado na *fase primária* e o Convencional na *fase secundária* como mostra a Fig. 3.5, decidiu-se desenvolver a pesquisa com quatro modos de soldagem MIG/MAG:

- 1. Convencional (C)
- 2. Pulsado (P)
- 3. Pulsado térmico combinado Pulsado/Convencional (CP).
- 4. Pulsado térmico (PP).



Figura 3.5: Modos de soldagem utilizados no trabalho: A - Convencional, B - Pulsado, C – Pulsado térmico combinado Pulsado/Convencional, D – Pulsado térmico.

### 3.1.4 Parâmetros de soldagem fixos

Esta parte do trabalho descreve os parâmetros que não são objeto do estudo desta pesquisa e foram deixados fixos ao longo do desenvolvimento dos experimentos.

Segundo Sousa et al. (2011) o aumento da DBCP sem variar a velocidade de alimentação (consumo) leva à diminuição da corrente. Becker (2013) em sua pesquisa utilizou uma DBCP de 15 mm para favorecer o processo de soldagem por curto circuito, e Barra (2003) no seu trabalho utilizou uma DBCP de 19 mm para favorecer o processo de pulsado

térmico. Como este trabalho é uma combinação dos processos anteriores o DBCP fixou-se em 17 mm.

Na Tabela 3.6 apresentam-se o resumo dos parâmetros fixos durante o desenvolvimento dos experimentos.

DBCP	Gás de proteção	Vazão de gás	Ângulo de deslocamento da tocha (θ)
17 mm	Ar / 2% O <sub>2</sub>	20 l/min	0°

Tabela 3.6: Parâmetros de soldagem fixos durante o desenvolvimento dos experimentos.

#### **3.1.5** Testes preliminares

Para cada modo de soldagem definido no item 3.1.3 e usando simples deposição sobre chapas, foram procurados os parâmetros da fonte para dois níveis diferentes de aporte térmico, tendo como objetivo principal uma boa estabilidade de cada um deles visando sempre a menor quantidade de respingos e o melhor acabamento da superfície do cordão.

Para auxiliar no processo de busca dos parâmetros, se utilizou uma planilha de *Microsoft Excel* (Fig. 3.6) com todas as equações descritas na Fundamentação Teórica deste trabalho para cada modo de soldagem.

	IAL (C)	Programa No.	1	PULSADO	(P)	Programa No. 2		
Dad	los de ent	rada Convencional		Dados de entrada Pulsado				
Velocidade de s (mm/min) - (i	oldagem mm/s)	125	2,083	Velocidade de so (mm/min) - (n	oldagem nm/s)	300	5,000	
				Tensão (V)	30	Vel. arame (m/min)	4,5	
Tensão (V)	20	Vel. arame	4,2	Ip (A)	320	Ib (A)	31	
		(m/min)		Tp (ms)	2,4	Frequência (Hz)	94	
	50 S.					Tb (ms)	2,389	
Corrente	(A)	110				Corrente m (A)	175,821	
Eficiência té	rmica	10	1	Eficiência tér	mica	10	553 	
Energia de sol	daaem	1,0		Energia de solo	laaem	1,0		
(J/mm)	aagam	1056,0		(J/mm)	agem	1054,9	9	
PI	JLSADO T	ÉRMICO / CONVENC	IONAL - P	ULSADO (CP)		Programa No.	3	
Da	dos de ent	rada base térmica		Dado	s de entr	ada pulso térmico		
Velocidade de s	oldagem			Velocidade de s	oldagem			
(mm/min)		300		(mm/seg	;)	5,000		
				Tensão (V)	34	Vel. arame	4,5	
Tensão (V) 20,5		Vel. arame	4,6	Ipp (A)	340	Ibp (A)	73	
		(m/min)		Tpp (ms)	2,4	Frequência (Hz)	94	
						Tbp (ms)	2,389	
Tempo base (s)	0,41	Corrente (A)	121	Tempo base (s)	0,84	Corrente m (A)	206,797	
Constants of	d:= (A)	170.00		Tana%a m(d)	- (17)	20.57		
Corrente media (A)		178,66		Tensao media (V)		29,57		
Eficiência té	rmica	1,0		Energia de solo	Energia de soldagem 1056.6		6	
		лт- -		()/ (((()))		-		
	PULSAD	O TÉRMICO / PULSA	DO - PUL	.SADO (PP) Programa No.				
Dao	dos <mark>d</mark> e ent	rada base térmica		Dado	s de entr	ada pulso térmico		
Velocidade de s	oldagem	300		Velocidade de se	oldagem	5 000		
(mm/mi	n)	500		(mm/seg	;)	5,000		
Tensão (V)	30	Vel. arame (m/min)	4,2	Tensão (V)	34	Vel. arame	4,5	
Ipb (A)	220	Ibb (A)	50	Ipp (A)	320	Ibp (A)	70	
Tpb (ms)	2	Frequência (Hz)	80	Tpp (ms)	2,4	Frequência (Hz)	90	
		Tbb (ms)	1,988			Tbp (ms)	2,389	
Tempo base (s)	0,5	Corrente mb (A)	135,266	Tempo base (s)	0,5	Corrente mp (A)	195,290	
Corrente mé	dia (A)	165,28		Tensão médi	a (V)	32,00		
Eficiência té	rmica	1,0		Energia de solo (J/mm)	lagem	1057,8	B	

Figura 3.6: Planilha de Excel para calculo do aporte térmico em cada modo de soldagem.

# 3.1.6 Deposição dos cordões.

O objetivo principal desta pesquisa foi avaliar a influência do nível de energia, em quatro modos diferentes de soldagem, na microestrutura e na dureza da ZTA e ZF. Para tal, as soldagens foram realizadas em dois níveis diferentes de energia. Depois de encontrar estes dois níveis de energia para cada modo de soldagem específico, definiu-se, tal como nos testes preliminares, a utilização da técnica de simples deposição sobre chapas de 15 cm de cumprimento por cinco cm de largura e 6.35 mm de espessura.

Antes da realização dos depósitos, as chapas passaram por um processo de preparação da superfície que envolveu:

- Remoção de oxidação através de escova rotativa de aço inoxidável e, quando necessário, uso de escovamento manual.
- Remoção, com solvente, de substâncias contendo hidrogênio (H<sub>2</sub>) em sua estrutura (agua, óleos, graxa, entre outros).

# **3.2** Análises Metalográficas

### 3.2.1 Extração dos corpos de prova

Para a análise das características apresentadas pela zona fundida e a ZTA, foram extraídos corpos-de-prova situados nos terços médios dos cordões. Esta condição teve como objetivo garantir que a amostra pertencesse a uma região do cordão já em regime (longe das extremidades descartadas).

O corte e seccionamento dos corpos de prova foi realizada segundo ASTM E3 (2011) com uma serra circular refrigerada por água seguindo as seguintes etapas:

- Corte de duas tiras transversais à linha de centro dos cordões, a primeira tira, de 10 mm de largura, para as análises da geometria do cordão de solda, e outra tira de 20 mm de largura.
- Seccionamento longitudinal das tiras de 20 mm sobre a linha de centro dos cordões para análise metalográfica dos modos de soldagem adotados na pesquisa.

A Figura 3.7 traz uma apresentação esquemática da forma de corte dos cordões e detalhes das regiões selecionadas para análise metalográfica e de microdureza.



Figura 3.7: Características do cordão de solda e do detalhe da região de medição das respostas de interesse. Adaptado de Barra (2003).

A Figura 3.8 apresenta o detalhe do cordão de solda após a etapa de corte das seções transversais e longitudinais.



Figura 3.8: Detalhe dos corpos de prova extraidos do cordao de soldas.

## 3.2.2 Preparação de amostras

Depois da extração dos corpos de prova o procedimento de preparação de amostras foi realizado segundo a norma ASTM E3 (2011); sendo embutidos em baquelite entre 150°C e 180°C, processo no qual o aço não tem mudanças na microestrutura pela alta temperatura de fusão (1300 °C aprox.). Na sequência, as amostras foram lixadas e polidas com ajuda de uma máquina semiautomática do Laboratório de Metalurgia e Materiais da UNIFEI, conforme o procedimento especificado na Tab. 3.7.

Processo	Granulometria / Pano	Abrasivo	Lubrificante
	100	SiC	Agua
	220	SiC	Agua
<b>.</b>	320	SiC	Agua
Lixamento	400	SiC	Agua
	500	SiC	Agua
	600	SiC	Agua
	1200	SiC	Agua
Polimento	DP-Pan	Alumina 0,05 μm	Agua

Tabela 3.7: Preparação das superfícies para análise metalográfica dos corpos de prova.

### 3.2.3 Microestrutura

A seguir descreve-se o procedimento com os materiais e técnicas para a revelação da microestrutura nas macrografias e micrografias segundo ASTM E407 (2007) e Rohde (2010).

#### a) Macrografia

- Reagente: Nital a 4% (4 ml  $\text{HNO}_3 + 96 \text{ ml } \text{C}_2\text{H}_5\text{OH})$
- Técnica: Imersão
- Tempo de ataque: 25 a 40 segundos
- Lavagem da superfície com água corrente e álcool
- Secagem da superfície.
- Aquisição da imagem por meio de estereoscópio marca *Feldmann Wild Leitz*, modelo FWL-SM7.5 (Fig. 3.9) do Laboratório do Centro de Tecnologia em Compósitos da UNIFEI a 10x ou 20x com ajuda do software *Micrometrics SE Premium*.

A nomenclatura das macrografias no Apêndice B deste trabalho foi realizada segundo a Fig. 3.10.



Figura 3.9: Equipamentos para aquisição das macrografias.



- 1. Energia entregue: 6 (600J) ou 13 (1300J)
- 2. Processo de soldagem: C, P, CP ou PP
- 3. MACRO: Indica macrografia
- 4. Ampliação da imagem

#### Figura 3.10: Definição da nomenclatura das macrografias.

#### b) Micrografia

- Reagente: Nital a 4% (4 ml  $\text{HNO}_3 + 96 \text{ ml } \text{C}_2\text{H}_5\text{OH})$
- Técnica: Imersão
- Tempo de ataque: 15 a 30 segundos
- Lavagem da superfície com agua corrente e álcool
- Secagem da superfície
- Aquisição da imagem por meio de microscópio ótico marca *Olympus*, modelo BX41M-LED (Fig. 3.11) do Laboratório de Metalurgia e Materiais da UNIFEI, nos pontos B, D-F, H, J-L mostrados na Fig. 3.7 à 100x, 200x e 500x com ajuda do software *Stream Basic 1.9.1*.

A nomenclatura das micrografias no Apêndice D deste trabalho foi realizada segundo a Fig. 3.12.



Figura 3.11: Equipamentos para aquisição de micrografias.



Energia entregue: 6 (600J) ou 13 (1300J)
Processo de soldagem: C, P, CP ou PP
Zona de analises: F (ZF) ou T (ZTA)
Ponto de analises: A-L
Ampliação da imagem.

Figura 3.12: Definição da nomenclatura das micrografias.

### 3.2.4 Geometria do cordão

A análise da geometria do cordão de solda foi realizada com ajuda das macrografias dos corpos de prova. Foram tomadas as medidas de largura (l), reforço (r), penetração (pen), Área de reforço (Ar) e área de penetração (Ap) da geometria do cordão de solda (Fig. 3.13).



Figura 3.13: Características da geometria do cordão de solda.

Com os dados tomados anteriormente pôde-se calcular a área transversal total da solda  $(A_t)$ , índice de penetração  $(IND_p)$  e diluição (D) conforme equações 3.1 - 3.3:

$$A_t = A_r + A_p \tag{3.1}$$

$$IND_p = \frac{pen}{t} * 100\% \tag{3.2}$$

$$D = \frac{A_p}{A_p + A_r} *100\%$$
(3.3)

#### 3.2.5 Determinação da área média dos grãos na ZTA e no metal base

A determinação do tamanho de grão do metal base utilizado na pesquisa e caraterizado no começo deste capítulo, foi realizada para considerá-lo como ponto de partida nos análises dos resultados da área média dos grãos na ZTA da solda.

Segundo ASM (1992), a microestrutura de um aço ASTM A36 está constituída por ferrita equiaxial (fase clara) e perlita (fase escura) como apresenta a Fig. 3.14.



Figura 3.14: Microestrutura de uma chapa de aço ASTM A36 de 9.5 mm (3/8") de espessura (ASM, 1992).

Como foi detalhado no final do capítulo dois na seção de Metalurgia da soldagem, no ponto mais próximo ao metal base da ZTA (pontos F e L da Fig. 3.7), os microconstituintes são similares ao metal base. A zona média entre a ZTA e a zona de ligação (pontos E e K da Fig. 3.7) é submetida a uma temperatura maior que permite a nucleação da austenita que decompõem em ferrita e em pequenos grãos de perlita durante o subsequente resfriamento. A zona da ZTA mais próxima a zona de ligação (pontos D e J da Fig. 3.7) é submetida a uma temperatura ainda maior em comparação a zona anterior que permite aos grãos de perlita crescer, logo, junto com as altas taxas de resfriamento a ferrita forma placas laterais nos

contornos do grão austenítico chamadas Ferrita de Widmanstätten, e neste resfriamento os grãos de austenita viram grãos de perlíta, isto devido que o aço ASTM A 36 usado nos experimentos não tem elementos químicos autenitizadores que permitam ao grão austenítico permanecer na temperatura ambiente.

Baseado nos microconstituintes do metal base e na evolução deles na ZTA durante o processo de soldagem como explicado no paragrafo anterior, foram mensuradas as áreas dos grãos ferríticos e/ou perlíticos nos pontos D-F para o processo convencional (pela ausência do pulso na corrente), e nos pontos, D-F e J-L da Fig. 3.7 para os demais processos.

Para fazer a medição dos grãos, segundo as normas ASTM E112 (2013) e ASTM E1181 (2002) que detalham o procedimento de medição para amostras com distribuição de grão único e duplex respectivamente, deve-se dar um tratamento as imagens, que se não for feito corretamente, pode-se incorrer em erros de medição. Para evitar esses possíveis erros pela inexperiência no tratamento das imagens, foi concebido um processo de medição mais simples com ajuda do software livre (freeware) *Image J*. Em cada ponto de analises a medição foi feita em uma área quadrada de 50  $\mu$ m de lado (linha vermelha na Fig. 3.15), no qual foi tomada à área (linha amarela na Fig. 3.15) de todos os grãos completos dentro do mesmo quadro.



Figura 3.15: Medição da área do grão com o software Image J.

O programa *Image J* após tomar as medidas, calcula a média e desvio padrão, permitindo salvar os dados numa tabela de *Excel*.

### 3.2.6 Ensaio de Microdureza

Os procedimentos para os ensaios de microdureza foram realizados segundo ASTM E384 (2011) no microdurômetro marca *Time*, modelo TH712 (Fig. 3.16).



Figura 3.16: Microdurômetro utilizado nos testes.

O perfil de microdureza HV10, *Hardness Vickers* com carga de 9,8 Newtons; foi realizado com o objetivo de avaliar as mudanças nesta propriedade nos diferentes modos de soldagem e condições de aporte térmico na ZF e da ZTA das amostras. A impressão foi realizada nos pontos A-F para o modo convencional (pela ausência do pulso na corrente), e nos pontos, A-L da Fig. 3.7 para os demais modos de soldagem.

Para a abordagem estatística de microdureza, foram realizadas três medições (Fig. 3.17) espaçadas segundo ASTM E384 (2011), calculando-se para cada uma: média aritmética e o desvio padrão.



Figura 3.17: Representação esquemática das durezas tomadas em cada ponto de interesse.

# Capítulo 4

# **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Este capítulo apresenta os resultados experimentais preliminares e definitivos obtidos, decorrentes da adoção de dois diferentes níveis de aporte térmico nos quatro modos de soldagem MAG descritos na metodologia experimental. Primeiramente, compara-se a relação de cada modo no aspecto superficial e na geometria do cordão. Num segundo momento, avalia-se a relação entre o modo de soldagem, o aporte térmico, a estrutura obtida na zona fundida, o refinamento do grão na zona termicamente afetada e a influência na microdureza destas zonas.

# 4.1 Testes preliminares

Inicialmente na procura dos parâmetros ótimos do equipamento, encontrou-se dois níveis de energia diferentes de 800 J/mm e 1050 J/mm, mas optou-se por ampliar a diferença entre os níveis de energia para entender melhor a influência do aporte térmico em cada modo de soldagem, obtendo como resultado de novas buscas dos níveis de energia de 600 J/mm e 1300 J/mm finalmente adotados para o desenvolvimento dos experimentos.

A Figura 4.1 apresenta os cordões de soldadura depositados para cada modo adotado na pesquisa em cada nível de energia encontrado nas pesquisas preliminares.



Figura 4.1: Perfis dos cordões de solda através dos processos de soldagem e seus respectivos níveis de energia: (1) 800 J/mm, (2) 1050 J/mm, (3) 600 J/mm e (4) 1300 J/mm.

Segundo Campos et al. (2012), o modo de soldagem MIG/MAG com pulsação térmica foi desenvolvido com o intuito de aliar as vantagens dos modos de corrente pulsada MIG e TIG, incluindo o aspecto superficial. A Figura 4.1 mostra que um nível maior de energia gera maior diferença das escamas dos cordões de solda, além da melhora do aspecto superficial dos cordões feitos no modo Convencional (C) comparado com os modos com pulsação térmica como são CP e PP.

# 4.2 Características geométricas do cordão

Com a organização das medidas obtidas das macrografias dos corpos de prova (vide apêndice B) no decorrer dos experimentos, foi possível comparar os modos de soldagem ao variar os níveis de aporte térmico neles.

A Tabela 4.1 apresenta um resumo da geometria do cordão de solda de cada modo de soldagem, além da área total, índice de penetração e diluição da solda, calculados a partir das equações 3.1, 3.2 e 3.3 respectivamente.

Processo	t	l	r	pen	A <sub>d</sub>	A <sub>p</sub>	INDp	D	At
11000350	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	$(\mathbf{mm}^2)$	( <b>mm</b> <sup>2</sup> )	(%)	(%)	( <b>mm</b> <sup>2</sup> )
6C	6,350	6,949	3,189	1,107	16,696	2,624	17,433	13,582	19,320
6P	6,350	6,021	2,551	0,663	11,462	1,466	10,441	11,340	12,928
6CP	6,350	6,310	2,388	0,749	11,379	1,546	11,795	11,961	12,925
6PP	6,350	5,610	2,461	0,842	9,899	1,776	13,260	15,212	11,675
13C	6,350	11,611	3,588	1,611	29,489	7,987	25,370	21,312	37,476
13P	6,350	5,990	2,956	0,966	13,258	1,988	15,213	49,349	13,039
13CP	6,350	7,563	2,522	0,774	13,873	2,040	12,189	12,820	15,913
13PP	6,350	7,103	2,856	1,021	13,350	2,118	16,079	13,693	15,468

Tabela 4.1: Resultados obtidos e calculados das macrografias dos cordoes de solda de cada modo nos niveis de energia de soldagem de 600J/mm e 1300 J/mm.

A Figura 4.2 mostra que o modo de soldagem convencional tem os cordões de solda de maior área transversal, maior índice de penetração e maior diluição, mas para os modos pulsados (P, CP e PP) que possuem áreas transversais de cordão de solda similares (Fig. 4.2A) obtém-se maior índice de penetração e maior diluição para os modos com pulsação térmica (CP e PP), sendo o duplamente pulsado ou PP o modo com melhores características.



Figura 4.2: Gráficos resultados dados geométricos do cordão vs. modo de soldagem: A – Área transversal total, B – Índice de penetração e C – Diluição do cordão de solda.

Logo, para o modo **CP** pode-se observar uma similaridade dos índices de penetração dos cordões de solda a 600 J/mm e 1300 J/mm (Fig. 4.2B) e, o modo **PP** a 1300 J/mm teve menor diluição a 1300J/mm quando comparado com 600 J/mm. Como hipótese da explicação destes resultados considera-se que o tipo de transferência metálica durante a deposição dos cordões de solda pode afetar algumas caraterísticas geométricas do cordão de solda. Fica como sugestão para trabalhos futuros a verificação desta hipótese por meio do equipamento de aquisição de sinais (Valores de *I*, *V*) e de filmagem em alta velocidade (shadowgrafia) porque o LABSOLDA da UNIFEI não contou com eles durante o desenvolvimento dos experimentos desta pesquisa.

# 4.3 Os modos pulsados.r

Neste item pretende-se determinar dois pontos:

- Se os dados obtidos de cada fase dos modos pulsados podem ser analisados como única fase com ajuda do desvio padrão, para facilitar as análises dos resultados de dureza e tamanho de grão que serão descritos nos próximos itens.
- Se existe diferença entre as fases dos modos de soldagem: Pulsado (P), Pulsado Térmico combinado Pulsado/Convencional (CP) Pulsado Térmico (PP).

Segundo a Tabela 4.2, os pontos A-F são da primeira fase e os pontos G-L são da segunda fase, deste modo deve-se comparar horizontalmente os pontos correspondentes entre cada fase segundo os níveis deles. Por exemplo, os pontos A e G.

	Pontos primeira fase	Pontos segunda fase	Zona da solda
	А	G	
Níveis	В	Н	ZF
de	С	Ι	
cada	D	J	
fase	Е	K	ZTA
	F	L	

Tabela 4.2: Identificação dos pontos a serem comparados entre as fases.

As Tabelas 4.3 e 4.4 apresentam a dureza em Vickers e a área média dos grãos, tomada para o modo de soldagem **CP** a 600 J/mm nos diferentes pontos de análises.

	Α		В		С		D		Ε		F	
	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP
6CD	241,7	18,4	243,4	12,5	215,9	4,8	173,8	5,4	158,0	3,4	152,0	2,4
OUL	G		Η		I		J		J K		L	
	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP
	241,6	6,1	251,6	14,4	227,0	5,5	174,2	2,8	158,4	2,0	154,8	2,6

Tabela 4.3: Dureza em Vickers nos pontos A-L do modo de soldagem CP a 600 J/mm.

Tabela 4.4: Área média em µm<sup>2</sup> nos pontos D-F e J-L do modo de soldagem pulsado a 600 J/mm.

	Ι	)		Ε	F				
6CP	Perlita		Perlita		Р		Ferrita		
	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	
	6180,0	2678,6	298,2	147,6	54,8	19,2	45,8	27,0	
	J			K	L				
	Perlita		Perl	lita	Ferri	ita	Ferrita		
	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	
	6615,4	2567,5	311,1	124,1	55,3	32,8	43,3	19,2	

Nos resultados de dureza, só no modo **CP**, dos seis níveis identificados na Tab 4.2, o nível CI identificado com vermelho na Tab 4.3, apresenta uma diferença que o Desvio Padrão não consegue explicar.

Para os outros resultados, incluindo as áreas dos grãos, o desvio padrão consegue explicar as variações dos dados obtidos entre as fases de cada nível analisado, porque são estatisticamente representativos ao considerar as duas fases como o mesmo grupo de dados.

Consequentemente com o exposto no parágrafo anterior, nesta pesquisa os dados de tamanho de grão e microdureza serão apresentados tomando a média para cada nível das fases (Tab. 4.2) porque não há distorção dos resultados.

Logo, a variação de uma unidade na dureza Rockwell B equivale a cinco unidades da dureza Vickers (ASTM E140, 2012) e, considerando que a variação de uma unidade da dureza Rockwell B não é significativa, pode-se concluir que a variação de cinco unidades da dureza Vickers também não é significativa.

A Tabela 4.5 apresenta as durezas em Vickers para o modo **PP** nos dois níveis de energia. Comparando as durezas entre as fases pode-se observar que a 600 J/mm têm-se durezas maiores no fase secundária (letras G-J) em comparação as durezas da fase primária também a 600 J/mm; mas para o mesmo modo a 1300 J/mm as durezas entre as fases podem-se considerar iguais baseado na explicação do parágrafo anterior.

6PP	Α		В		С		D		Ε		F	
	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP
	236,9	4,9	232,8	9,7	224,4	9,3	175,4	10,0	162,6	1,9	153,7	2,8
	G		H		I		J		K		L	
	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP
	254,2	17,7	247,0	14,2	235,4	11,3	183,2	10,0	163,7	1,7	152,0	1,4
13PP	A		B		C		D		Ε		F	
	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP
	219,5	7,7	218,9	1,9	196,9	5,9	156,9	5,1	142,8	3,0	140,0	2,1
	G		Н		Ι		J		K		L	
	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP
	221,5	13,9	219,6	10,6	200,4	6,8	162,0	2,6	142,9	1,4	141,3	0,8

Tabela 4.5: Dureza em Vickers nos pontos A-L do processo PP a 600 J/mm e 1300 J/mm.

Nos apêndices C e D temos as tabelas em que podem-se verificar os resultados para os outros modos com pulsação nos níveis de energia de soldagem de 600 J/mm e 1300 J/mm.

Embora possa existir uma diferença microestrutural entre as fases dos processos **P**, **CP** e **PP**, e possa depender de fatores entre os quais encontra-se o nível de energia de soldagem dos processos, os experimentos desenvolvidos nesta pesquisa não permitem concluir com plena certeza se sempre vai a existir ou não diferença microestrutural entre as fases.

# 4.4 Tamanho de grão na ZTA

Os modos de soldagem e o aporte térmico em cada um deles têm influência no tamanho de grão perlítico e ferrítico como apresenta a Fig. 4.3.

Partindo desde o metal base, o grão ferrítico é refinado para depois começar a crescer, o grão perlítico evolui para o grão austenítico que no subsequente resfriamento vira novamente perlita com placas laterais de ferrita de Widmanstätten, esta mudança, que foi detalhada no capítulo anterior, pode-se verificar com os resultados obtidos nesta pesquisa.

Basicamente, o grão obtido seja ferrítico ou perlítico é mais grosseiro no modo Convencional (**C**) e é cada vez menor nos modos Pulsado (**P**), Pulsado térmico combinado Pulsado/Convencional (**CP**), até finalizar no modo Pulsado térmico (**PP**) com o grão mais refinado (Fig. 4.3), validando os resultados de outros autores como Henke (2010) e Janaki et al. (1999). Este fenômeno foi validado nos dois níveis de energia adotados nesta pesquisa.
As observações experimentais demonstram que a maior nível de energia, o tamanho do grão perlítico e ferrítico aumentam, e de fato, pode-se verificar facilmente comparando de forma horizontal cada processo na Fig. 4.3.



Figura 4.3: Gráficos das áreas de grão de cada modo de soldagem a 600J/mm e 1300 J/mm: A – Grão perlítico, B – Grão ferrítico.

Logo ao considerar o desvio padrão pode-se verificar que só no tamanho de grão perlítico a 600 J/mm (Fig. 4.3), cada modo de soldagem convencional similar ao adjacente, por exemplo o modo C com o modo P; mas diferente aos modos seguintes na sequência, ao retomar o exemplo anterior tem-se que o modo C é diferente ao modos CP e PP.

Nos demais gráficos da Fig. 4.3, o modo de soldagem convencional (C), é diferente aos modos pulsados (P, CP, PP) e, os modos pulsados são similares entre si ao considerar o desvio padrão dos resultados experimentais; o que coincide também com os resultados apresentados no item de características geométricas do cordão de solda.

Nas Figuras 4.4 e 4.5 pode-se verificar a evolução do grão no modo duplamente pulsado (**PP**) partindo desde o metal base até o ponto de análises D na ZTA perto da zona de ligação.



Figura 4.4: Evolução do tamanho do grão no perfil de solda do modo duplamente pulsado a 600 J/mm. Micrografia com ampliação de 200x.



Figura 4.5: Evolução do tamanho do grão no perfil de solda do modo duplamente pulsado a 1300 J/mm. Micrografia com ampliação de 200x

### 4.5 A microdureza na solda

A microdureza da solda também tem relação com os modos de soldagem e o aporte térmico em cada um deles.

O aporte térmico em cada modo de soldagem diminui a dureza do perfil da solda, encontrando uma relação congruente com os resultados do item anterior, porque quando aumenta a área de aplicação de uma força, que basicamente é o efeito da energia no tamanho de grão, o efeito dela diminui. Este efeito pode-se verificar comparando de forma horizontal cada processo na Fig. 4.6.

Consequentemente com o exposto no parágrafo anterior o modo de soldagem convencional, que apresenta os grãos mais grosseiros, tem a menor dureza e vai aumentando conforme passa aos modos Pulsado (**P**) e com pulsação térmica (**CP** e **PP**) como mostra a Fig. 4.6 para 600 J/mm de energia de soldagem.



Figura 4.6: Perfil de dureza na seção longitudinal da solda para cada modo de soldagem a 600 J/mm e 1300 J/mm.

Logo, para 1300 J/mm de energia de soldagem, observam-se dois diferenças. A primeira uma queda do modo **CP** em comparação ao modo **PP**, e a segunda, um alto grau de similaridade dos modos **P** e **PP** pela superposição das curvas na Fig. 4.6.

#### a) Queda da dureza ao utilizar o modo CP

O modo **CP** é uma combinação do modo convencional (**C**) com o modo pulsado (**P**) como foi detalhado no capítulo 3 desta pesquisa. Durante a base térmica (vide Fig. 3.5), a 600 J/mm, a soldagem convencional apresentou uma transferência metálica de tipo Curto-Circuito, ao mudar para 1300 J/mm de aporte térmico percebe-se uma mudança na transferência metálica para o tipo Globular, o que possivelmente gerou um maior aquecimento na peça ocasionando a queda da dureza do processo.

Porém o laboratório de soldagem da UNIFEI não contou com o equipamento para filmagem em alta velocidade (shadowgrafia) para verificar este fenômeno durante o desenvolvimento dos experimentos, de fato, pode-se verificar que a transferência metálica para esta fase do modo convencional a 1300 J/mm não continuou sendo de tipo curto-circuito porque a tensão utilizada foi de 25,5 V e, segundo (MACHADO, 1996), no processo GMAW a transferência metálica por curto-circuito e realizada em baixas tensões, geralmente de 15 a 22 *V*.

#### b) Similaridade dos modos pulsado (P) e duplamente pulsado (PP)

A similaridade dos modos de soldagem P e PP pode ser explicada com as ondas de corrente entre eles. A Figura 4.7 mostra como a onda do modo pulsado tem similaridade, enquanto as correntes e os tempos base e pico, com a onda do duplamente pulsado. Os valores exatos desses parâmetros são apresentados na Tab. 4.6.



Figura 4.7: Comparação esquemática das ondas de corrente dos modos de soldagem Pulsado (PP) e duplamente pulsado (P) a 1300 J/mm.

Tabela 4.6: Comparação dos parâmetros de soldagem das ondas de corrente dos modos P e PP a 1300 J/mm.

	Р	PP
I <sub>p</sub> /I <sub>pp</sub> (A)	320	330
$I_{b}/I_{bb}$ (A)	31	50
T <sub>p</sub> /T <sub>pp</sub> (ms)	2,4	2,4
T <sub>b</sub> /T <sub>bb</sub> (ms)	2,389	1,988

Outro fator que pode afetar a dureza nas áreas da ZTA perto da zona fundida (Pontos de análises D e J da Fig. 3.7), além do tamanho dos grãos é a inclusão de placas laterais ferrita e ferrita acicular nos grãos de perlita de origem austenítico (grão de austenita que vira perlita no subsequente resfriamento), considerando que a fase ferrítica tem menor dureza que a fase perlítica (AWS, 1995).

Durante o processamento dos resultados, verificou-se que estas inclusões aumentam ao subir o nível de energia de energia dos modos de soldagem. A Figura 4.8 mostra os Grãos de perlita de origem austenítico (Linha amarela) com inclusões laterais de ferrita (Linha vermelha) e ferrita acicular (Linha azul) no modo Pulsado (**P**) nos dois níveis de energia adotados nesta pesquisa.



Figura 4.8: Imagem (100x) da inclusão de placas laterais de ferrita e ferrita acicular nos grãos de perlita de origem austenítico no modo Pulsado: A – 600 J/mm e B – 1300 J/mm de energia de soldagem.

### 4.6 A Zona Fundida

O objetivo deste tópico foi registrar de maneira geral algumas fases da microestrutura obtida na zona fundida, em cada modo de soldagem e nível de energia adotados nesta pesquisa.

Para identificar as fases presentes na microestrutura da Zona Fundida, foram utilizados os códigos das fases definidos no Quadro 2.1.

Durante o processamento dos resultados, verificou-se que a microestrutura encontrada na zona fundida das soldas feitas com o metal base ASTM A36 e o arame AWS ER 70S-6 adotados nesta pesquisa, coincide com o descrito por autores como Modenesi (2004) e Pargeter & Dolby (1985) para a zona fundida nas soldas dos aços de baixo teor de carbono.

As Figuras 4.9 e 4.10 apresentam as micrografias para os quatro modos de soldagem a 600 J/mm e 1300 J/mm respectivamente.

Nas imagens pode-se verificar que ao aumentar a energia de soldagem aumenta também a matriz ferrítica na Zona Fundida (fase clara) contribuindo ao decréscimo da dureza nesta zona por ser uma fase macia (AWS, 1995).

Também verifica-se que o modo de soldagem convencional apresenta uma diferença maior comparado com os modos pulsados que estes últimos entre si.



Figura 4.9: Metalografias a 100x da área central na zona fundida á 600J/mm de energia de soldagem para os modos: A-Convencional, B - Pulsado, C – Pulsado térmico combinado Pulsado/Convencional, D – Pulsado térmico.



Figura 4.10: Metalografias a 100x da área central na zona fundida á 1300J/mm de energia de soldagem para os modos: A-Convencional, B - Pulsado, C – Pulsado térmico combinado Pulsado/Convencional, D – Pulsado térmico.

### Capítulo 5

## CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

### 5.1 Conclusões

Em função dos resultados obtidos e as análises efetuadas para os modos e os níveis de energia de soldagem adotados, estabelecem-se, para o presente trabalho, as seguintes conclusões:

- Foram encontrados os parâmetros da fonte de soldagem para quatro níveis diferentes de energia, gerando cordões de solda com boa estabilidade e ótimo acabamento superficial.
- O modo de soldagem MAG convencional gera um tamanho de grão mais grosseiro na ZTA em comparação a os modos pulsados que geram um grão mais fino nesta zona.
- Os experimentos desenvolvidos nesta pesquisa não permitem concluir com plena certeza se sempre vai a existir ou não diferença microestrutural entre as fases dos modos pulsados.
- O perfil de dureza do cordão de solda diminui á maior energia de soldagem e muda com cada modo de soldagem, começando com uma dureza menor no Convencional (C), e aumentando cada vez mais no modo Pulsado (P), Pulsado térmico combinado

Pulsado/Convencional (CP), e no modo Pulsado Térmico (PP) na mesma ordem de menção.

- A microestrutura da ZF do cordão de solda muda com os níveis de energia de soldagem adotados.
- No mesmo nível de energia, o modo de soldagem convencional (C) apresenta uma menor dureza e maior diferença do tamanho dos grãos microestruturais comparado com os processos pulsados que estes últimos entre si.
- Considerando todos os resultados obtidos nesta pesquisa e a quantidade de variáveis em cada modo de soldagem, pode-se concluir que a soldagem MIG/MAG com corrente pulsada é o melhor modo de soldagem pela sua semelhança e facilidade no domínio do processo quando comparado com os outros modos pulsados (CP e PP) com duas vezes mais variáveis ou parâmetros de soldagem.

### **5.2** Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestões para estudos futuros propõem-se:

- Avaliar quais fatores ou parâmetros de soldagem aumentam a diferença microestrutural entre as fases dos modos pulsados e em quais condições de soldagem não existiria diferença entre elas.
- Avaliar o efeito dos modos de soldagem e os níveis do aporte térmico adotados nesta pesquisa, nas propriedades mecânicas do cordão de solda validando os resultados com ensaios de tração, impacto e microscópio de varredura eletrônica (MEV).
- Avaliar o efeito da energia de soldagem nas variantes do processo MIG/MAG mudando a percentagem de oxigênio do gás de proteção.
- Avaliar o efeito dos modos de soldagem monitorando e conservando sempre o tipo de transferência metálica de cada um deles entre os níveis de energia adotados.
- Verificar os resultados do estudo empregando outros materiais como o alumínio ou o aço inoxidável como também uma abordagem estatística aplicando a teoria de desenho de experimentos (DOE).

# APÊNDICES

**APÊNDICE A:** Planilhas de *Excel* com os parâmetros do equipamento para o cálculo do aporte térmico em cada modo de soldagem.

CONVENCION	AL (C)	Programa No.	13	PULSADO TÉRMICO / CONVENCIONAL - PULSADO (CP)						Programa No.	15
Dade	os de ent	trada Convencional		Dao	Dados de entrada base térmica Dados de entrada pulso térmico						
Velocidade de so (mm/min) - (n	oldagem nm/s)	188	3,133	Velocidade de s (mm/mi	soldagem n)	300		Velocidade de se (mm/seg	oldagem g)	5,000	
		Val. arama				Val arama		Tensão (V)	30	Vel. arame	4,3
Tensão (V)	19,2	(m/min)	4,2	Tensão (V)	18,5	(m/min)	4	Ipp (A)	250	Ibp (A)	40
		(invinin)				(mymm)		Tpp (ms)	2,4	Frequência (Hz)	94
			0						Tbp (ms)	2,389	
Corrente (	A)	99		Tempo base (s) 0,5 Corrente (A) 104 Te		Tempo base (s)	0,5	Corrente m (A)	145,233		
Ef. 10 - 1 - 4 / -		1						-			
Eficiencia ter	mica	1,0		Corrente me	dia (A)	124,62		Tensao medi	ia (V)	24,25	
Energia de sola (J/mm)	lagem	606,6		Eficiência térmica 1,0 Energia de soldagem (J/mm)				604,4	1		
								(J/mm)			
PULSADO	(P)	Programa No.	14		PULSAD	O TÉRMICO / PULSA	NDO - PUL	SADO (PP)		Programa No.	16
PULSADO	(P) ados de	Programa No. entrada Pulsado	14	Dao	PULSAD dos de ent	I O TÉRMICO / PULSA rada base térmica	NDO - PUL	SADO (PP)	os de entra	Programa No. ada pulso térmico	16
PULSADO D Velocidade de so (mm/min) - (n	(P) ados de oldagem nm/s)	Programa No. entrada Pulsado 300	<b>14</b> 5,000	Dao Velocidade de s (mm/mi	PULSAD dos de ent soldagem n)	O TÉRMICO / PULSA irada base térmica 300	NDO - PUL	SADO (PP) Dado Velocidade de su (mm/seg	os de entra oldagem g)	Programa No. ada pulso térmico 5,000	16
PULSADO D Velocidade de sc (mm/min) - (n Tensão (V)	(P) ados de oldagem nm/s) 28	Programa No. entrada Pulsado 300 Vel. arame (m/min)	14 5,000 4,5	Dao Velocidade de s (mm/mi Tensão (V)	PULSAD dos de ent soldagem n) 26	O TÉRMICO / PULSA rada base térmica 300 Vel. arame (m/min)	ADO - PUL	SADO (PP) Dado Velocidade de so (mm/seg Tensão (V)	os de entra oldagem 3) <b>30</b>	Programa No. ada pulso térmico 5,000 Vel. arame	16 4,2
PULSADO D Velocidade de so (mm/min) - (n Tensão (V) Ip (A)	(P) ados de oldagem nm/s) 28 190	Programa No. entrada Pulsado 300 Vel. arame (m/min) Ib (A)	14 5,000 4,5 28	Dao Velocidade de s (mm/mi Tensão (V) Ipb (A)	PULSAD dos de ent soldagem n) 26 160	O TÉRMICO / PULSA rada base térmica 300 Vel. arame (m/min) Ibb (A)	4 28	SADO (PP) Dado Velocidade de s. (mm/seg Tensão (V) Ipp (A)	os de entra oldagem g) <b>30</b> <b>228</b>	Programa No. ada pulso térmico 5,000 Vel. arame Ibp (A)	16 4,2 40
PULSADO D Velocidade de so (mm/min) - (n Tensão (V) Ip (A) Tp (ms)	(P) ados de oldagem nm/s) 28 190 2,5	Programa No. entrada Pulsado 300 Vel. arame (m/min) Ib (A) Frequencia (Hz)	14 5,000 4,5 28 130	Dac Velocidade de s (mm/mi Tensão (V) Ipb (A) Tpb (ms)	PULSAD dos de ent soldagem n) 26 160 2,4	O TÉRMICO / PULSA rada base térmica 300 Vel. arame (m/min) Ibb (A) Frequência (Hz)	4 28 110	SADO (PP) Dado Velocidade de s (mm/seg Tensão (V) Ipp (A) Tpp (ms)	os de entra oldagem 3) 228 2,4	Programa No. ada pulso térmico 5,000 Vel. arame Ibp (A) Frequência (Hz)	16 4,2 40 100
PULSADO D Velocidade de sc (mm/min) - (n Tensão (V) Ip (A) Tp (ms)	(P) ados de oldagem nm/s) 28 190 2,5	Programa No. entrada Pulsado 300 Vel. arame (m/min) Ib (A) Frequencia (Hz) Tb (ms)	14 5,000 4,5 28 130 2,492	Dao Velocidade de s (mm/mi Tensão (V) Ipb (A) Tpb (ms)	PULSAD dos de ent soldagem n) 26 160 2,4	O TÉRMICO / PULSA rada base térmica 300 Vel. arame (m/min) Ibb (A) Frequência (Hz) Tbb (ms)	4 28 110 2,391	SADO (PP) Dadc Velocidade de s (mm/seg Tensão (V) Ipp (A) Tpp (ms)	os de entra oldagem 30 228 2,4	Programa No. ada pulso térmico 5,000 Vel. arame Ibp (A) Frequência (Hz) Tbp (ms)	16 4,2 40 100 2,390
PULSADO D Velocidade de sc (mm/min) - (n Tensão (V) Ip (A) Tp (ms)	(P) ados de oldagem nm/s) 28 190 2,5	Programa No. entrada Pulsado 300 Vel. arame (m/min) Ib (A) Frequencia (Hz) Tb (ms) Corrente m (A)	14 5,000 4,5 28 130 2,492 109,125	Date Velocidade dee (mm/mi Tensão (V) Ipb (A) Tpb (ms) Tempo base (s)	PULSAD dos de ent soldagem n) 26 160 2,4 0,8	O TÉRMICO / PULSA rada base térmica 300 Vel. arame (m/min) Ibb (A) Frequência (Hz) Tbb (ms) Corrente mb (A)	4 28 110 2,391 94,125	SADO (PP) Dadc Velocidade de s (mm/seg Tensão (V) Ipp (A) Tpp (ms) Tempo base (s)	os de entra oldagem 3) <b>30</b> <b>228</b> <b>2,4</b> 0,55	Programa No. ada pulso térmico 5,000 Vel. arame Ibp (A) Frequência (Hz) Tbp (ms) Corrente mp (A)	16 4,2 40 100 2,390 134,196
PULSADO   D Velocidade de sc (mm/min) - (n Tensão (V) Ip (A) Tp (ms) Eficiência tér	(P) ados de oldagem nm/s) 28 190 2,5 mica	Programa No. entrada Pulsado 300 Vel. arame (m/min) Ib (A) Frequencia (Hz) Tb (ms) Corrente m (A) 1,0	14 5,000 4,5 28 130 2,492 109,125	Date Velocidade des (mm/mi Tensão (V) Ipb (A) Tpb (ms) Tempo base (s) Corrente mé	PULSAD dos de ent soldagem n) 26 160 2,4 0,8 dia (A)	O TÉRMICO / PULSA rada base térmica 300 Vel. arame (m/min) Ibb (A) Frequência (Hz) Tbb (ms) Corrente mb (A) 110,45	4 28 110 2,391 94,125	SADO (PP) Dadc Velocidade de s. (mm/seg Tensão (V) Ipp (A) Tpp (ms) Tempo base (s) Tensão médi	s de entra oldagem 30 228 2,4 0,55	Programa No. ada pulso térmico 5,000 Vel. arame Ibp (A) Frequência (Hz) Tbp (ms) Corrente mp (A) 27,63	<b>4,2</b> <b>40</b> <b>100</b> 2,390 134,196

Figura A.1: Planilha de Excel para 600 J/mm de aporte térmico em cada modo de soldagem.

CONVENCION	AL (C)	Programa No.	5	PULSADO TÉRMICO / CONVENCIONAL - PULSADO (CP) Programa No.							7
Dade	os de ent	trada Convencional	a.	Dados de entrada base térmica Dados de entrada pulso térmico							
Velocidade de so (mm/min) - (n	oldagem nm/s)	160	2,667	Velocidade de s (mm/mi	soldagem in)	300		Velocidade de se (mm/seg	oldagem g)	5,000	
		Val. arama				Val arama		Tensão (V)	30	Vel. arame	4,5
Tensão (V)	20,5	(m/min)	4	Tensão (V)	20,5	(m/min)	4	Ipp (A)	320	Ibp (A)	42
		(m/mm)				1		Tpp (ms)	2,4	Frequência (Hz)	94
			0						Tbp (ms)	2,389	
Corrente (	A)	104		Tempo base (s) 0,43 Corrente (A) 104 Tempo base (s) 0,7			Corrente m (A)	181,309			
Eficiencia ter	mica	1,0		Corrente mé	edia (A)	151,89		Tensão médi	ia (V)	26,38495575	
Energia de sola (J/mm)	lagem	799,5		Eficiência térmica 1,0 Energia de soldagem (J/mm)				801,5			
								(3) mm			
PULSADO	(P)	Programa No.	6		PULSAD	O TÉRMICO / PULSA	DO - PUL	SADO (PP)		Programa No.	8
PULSADO	( <b>P)</b> ados de	<b>Programa No.</b> entrada Pulsado	6	Dao	PULSAD dos de ent	O TÉRMICO / PULSA	NDO - PUL	SADO (PP)	os de entra	Programa No. ada pulso térmico	8
PULSADO ( D Velocidade de so (mm/min) - (n	(P) ados de oldagem nm/s)	Programa No. entrada Pulsado 300	<b>6</b> 5,000	Dao Velocidade de s (mm/mi	PULSAD dos de ent soldagem in)	O TÉRMICO / PULSA rada base térmica 300	NDO - PUL	SADO (PP) Dado Velocidade de su (mm/seg	os de entra oldagem g)	Programa No. ada pulso térmico 5,000	8
PULSADO ( D Velocidade de sc (mm/min) - (n Tensão (V)	(P) ados de oldagem nm/s) 32	Programa No. entrada Pulsado 300 Vel. arame (m/min)	6 5,000 4,5	Dao Velocidade de s (mm/mi Tensão (V)	PULSAD dos de ent soldagem in) 29,5	O TÉRMICO / PULSA trada base térmica 300 Vel. arame (m/min)	4	SADO (PP) Dado Velocidade de so (mm/seg Tensão (V)	os de entra oldagem 3) <b>33</b>	Programa No. ada pulso térmico 5,000 Vel. arame	8
PULSADO ( D Velocidade de sc (mm/min) - (n Tensão (V) Ip (A)	(P) ados de oldagem nm/s) 32 220	Programa No. entrada Pulsado 300 Vel. arame (m/min) Ib (A)	6 5,000 4,5 30	Dao Velocidade de s (mm/mi Tensão (V) Ipb (A)	PULSAD dos de ent soldagem in) 29,5 185	O TÉRMICO / PULSA rada base térmica 300 Vel. arame (m/min) Ibb (A)	4 30	SADO (PP) Dado Velocidade de s (mm/seg Tensão (V) Ipp (A)	os de entra oldagem 3) <b>33</b> <b>250</b>	Programa No. ada pulso térmico 5,000 Vel. arame Ibp (A)	8 4,5 45
PULSADO ( D Velocidade de sc (mm/min) - (n Tensão (V) Ip (A) Tp (ms)	(P) ados de oldagem nm/s) 32 220 2,4	Programa No. entrada Pulsado 300 Vel. arame (m/min) Ib (A) Frequência (Hz)	6 5,000 4,5 30 90	Date Velocidade de s (mm/mi Tensão (V) Ipb (A) Tpb (ms)	PULSAD dos de ent soldagem in) 29,5 185 2	O TÉRMICO / PULSA rada base térmica 300 Vel. arame (m/min) Ibb (A) Frequência (Hz)	4 30 80	SADO (PP) Dado Velocidade de s (mm/seg Tensão (V) Ipp (A) Tpp (ms)	os de entra oldagem 33 250 2,4	Programa No. ada pulso térmico 5,000 Vel. arame Ibp (A) Frequência (Hz)	8 4,5 45 90
PULSADO ( D Velocidade de so (mm/min) - (n Tensão (V) Ip (A) Tp (ms)	(P) ados de oldagem nm/s) 32 220 2,4	Programa No. entrada Pulsado 300 Vel. arame (m/min) Ib (A) Frequência (Hz) Tb (ms)	6 5,000 4,5 30 90 2,389	Dao Velocidade des (mm/mi Tensão (V) Ipb (A) Tpb (ms)	PULSAD dos de ent soldagem in) 29,5 185 2	O TÉRMICO / PULSA rada base térmica 300 Vel. arame (m/min) Ibb (A) Frequência (Hz) Tbb (ms)	4 30 80 1,988	SADO (PP) Dadc Velocidade de s. (mm/seg Tensão (V) Ipp (A) Tpp (ms)	os de entra oldagem 33 250 2,4	Programa No. ada pulso térmico 5,000 Vel. arame Ibp (A) Frequência (Hz) Tbp (ms)	8 4,5 45 90 2,389
PULSADO ( D Velocidade de so (mm/min) - (n Tensão (V) Ip (A) Tp (ms)	(P) ados de oldagem nm/s) 32 220 2,4	Programa No. entrada Pulsado 300 Vel. arame (m/min) Ib (A) Frequência (Hz) Tb (ms) Corrente m (A)	6 5,000 4,5 30 90 2,389 125,220	Date Velocidade des (mm/mi Tensão (V) Ipb (A) Tpb (ms) Tempo base (s)	PULSAD dos de ent soldagem in) 29,5 185 2 0,6	O TÉRMICO / PULSA rada base térmica 300 Vel. arame (m/min) Ibb (A) Frequência (Hz) Tbb (ms) Corrente mb (A)	4 30 1,988 107,743	SADO (PP) Dadc Velocidade de s (mm/seg Tensão (V) Ipp (A) Tpp (ms) Tempo base (s)	os de entra oldagem 3) <b>33</b> <b>250</b> <b>2,4</b> 0,6	Programa No. ada pulso térmico 5,000 Vel. arame Ibp (A) Frequência (Hz) Tbp (ms) Corrente mp (A)	8 4,5 45 90 2,389 147,738
PULSADO ( D Velocidade de sc (mm/min) - (n Tensão (V) Ip (A) Tp (ms) Eficiência tér	(P) ados de oldagem nm/s) 32 220 2,4 mica	Programa No. entrada Pulsado 300 Vel. arame (m/min) Ib (A) Frequência (Hz) Tb (ms) Corrente m (A) 1,0	6 5,000 4,5 30 90 2,389 125,220	Date Velocidade des (mm/mi Tensão (V) Ipb (A) Tpb (ms) Tempo base (s) Corrente mé	PULSAD dos de ent soldagem in) 29,5 185 2 0,6 edia (A)	O TÉRMICO / PULSA rada base térmica 300 Vel. arame (m/min) Ibb (A) Frequência (Hz) Tbb (ms) Corrente mb (A) 127,74	4 30 80 1,988 107,743	SADO (PP) Dado Velocidade de s (mm/seg Tensão (V) Ipp (A) Tpp (ms) Tempo base (s) Tensão médi	s de entra oldagem 33 250 2,4 0,6	Programa No. ada pulso térmico 5,000 Vel. arame Ibp (A) Frequência (Hz) Tbp (ms) Corrente mp (A) 31,25	8 4,5 45 90 2,389 147,738

Figura A.2: Planilha de Excel para 800 J/mm de aporte térmico em cada modo de soldagem.

CONVENCION	AL (C)	Programa No.	1	PULSADO TÉRMICO / CONVENCIONAL - PULSADO (CP) Programa No.							. 3
Dad	os de ent	trada Convencional		Dados de entrada base térmica Dados de entrada pulso térmico							
Velocidade de so (mm/min) - (n	oldagem nm/s)	125	2,083	Velocidade de s (mm/mi	soldagem n)	300		Velocidade de s (mm/seg	oldagem 3)	5,000	
		Mal annara				Mal annas		Tensão (V)	34	Vel. arame	4,5
Tensão (V)	20	(m/min)	4,2	Tensão (V)	20,5	(m/min) 4,6		Ipp (A)	340	Ibp (A)	73
		(11/1111)				1		Tpp (ms)	2,4	Frequência (Hz)	94
			с — ) ,							Tbp (ms)	2,389
Corrente (	A)	110		Tempo base (s) 0,41 Corrente (A) 121 T		Tempo base (s)	0,84	Corrente m (A)	206,797		
-71.10.1.4											
Eficiência têr	mica	1,0		Corrente mé	dia (A)	178,66		Tensão méd	ia (V)	29,57	
Energia de solo (J/mm)	lagem	1056,0	)	Eficiência té	ermica	1,0		Energia de solo (J/mm)	dagem	1056,6	
PULSADO	(P)	Programa No.	2		PULSAD	O TÉRMICO / PULSA	ADO - PUL	SADO (PP)		Programa No.	. 4
D	ados de	entrada Pulsado		Da	dos de ent	trada base térmica		Dado	os de entra	ada pulso térmico	
Velocidade de so (mm/min) - (n	oldagem nm/s)	300	5,000	Velocidade de s (mm/mi	soldagem n)	300		Velocidade de s (mm/seg	oldagem 3)	5,000	101
Tensão (V)	30	Vel. arame (m/min)	4,5	Tensão (V)	30	Vel. arame (m/min)	4,2	Tensão (V)	34	Vel. arame	4,5
Ip (A)	320	Ib (A)	31	Ipb (A)	220	Ibb (A)	50	Ipp (A)	320	Ibp (A)	70
Tp (ms)	2,4	Frequência (Hz)	94	Tpb (ms)	2	Frequência (Hz)	80	Tpp (ms)	2,4	Frequência (Hz)	90
		Tb (ms)	2,389		0	Tbb (ms)	1,988	1		Tbp (ms)	2,389
		Corrente m (A)	175,821	Tempo base (s)	0,5	Corrente mb (A)	135,266	Tempo base (s)	0,5	Corrente mp (A)	195,290
Eficiência tér	mica	1.0	1	Corrente mé	dia (A)	165.28	,	Tensão méd	ia (V)	32.00	
Energia de solo	lagem	1054.0	<b>`</b>	Eficiôncia té	rrrente média (A) 165,28 ficiência térmica 1,0			Energia de solo	dagem	1057,8	

Figura A.3: Planilha de Excel para 1050 J/mm de aporte térmico em cada modo de soldagem.

CONVENCION	AL (C)	Programa No.	9	PULSADO TÉRMICO / CONVENCIONAL - PULSADO (CP) Programa 1							. 11
Dade	os de en	trada Convencional		Dados de entrada base térmica Dados de entrada pulso térmico							
Velocidade de so (mm/min) - (n	oldagem nm/s)	180	3,000	Velocidade de soldagem (mm/min) 250 Velocidade de soldagem (mm/seg) 7 200					4,167		
		Val. arama				Val arama		Tensão (V)	34	Vel. arame	4,5
Tensão (V)	25	(m/min)	6,6	Tensão (V)	25,5	(m/min)	4,6	Ipp (A)	340	Ibp (A)	73
		(mymm)				((())(()))		Tpp (ms)	2,4	Frequência (Hz)	94
			0							Tbp (ms)	2,389
Corrente (	(A)	157		Tempo base (s) 0,4 Corrente (A) 130 Tem		Tempo base (s)	0,64	Corrente m (A)	206,797		
Eficiencia ter	rmica	1,0		Corrente mé	dia (A)	177,26		Tensão médi	ia (V)	30,73076923	
Energia de sola (J/mm)	lagem	1308,3	3	Eficiência té	rmica	1,0		Energia de solo (J/mm)	dagem	1307,4	
PULSADO	(P)	Programa No.	10		PULSAD	O TÉRMICO / PULSA	ADO - PUL	SADO (PP)		Programa No.	. 12
D	ados de	entrada Pulsado		Dao	los de ent	trada base térmica		Dado	os de entra	ada pulso térmico	
Velocidade de so (mm/min) - (n	oldagem nm/s)	250	4,167	Velocidade de s (mm/mi	oldagem n)	250		Velocidade de se (mm/seg	oldagem g)	4,167	-
Tensão (V)	31	Vel. arame (m/min)	4,5	Tensão (V)	30	Vel. arame (m/min)	4,2	Tensão (V)	34	Vel. arame	4,5
lp (A)	320	Ib (A)	31	Ipb (A)	230	Ibb (A)	50	Ipp (A)	330	Ibp (A)	70
Tp (ms)	2,4	Frequência (Hz)	94	Tpb (ms)	2	Frequência (Hz)	80	Tpp (ms)	2,4	Frequência (Hz)	90
		Tb (ms)	2,389			Tbb (ms)	1,988			Tbp (ms)	2,389
						Corrente mb (A) 140,282 Tempo base (s) 0,5					
		Corrente m (A)	175,821	Tempo base (s)	0,5	Corrente mb (A)	140,282	Tempo base (s)	0,5	Corrente mp (A)	200,302
Eficiência tér	mica	Corrente m (A)	175,821	Tempo base (s)	0,5 dia (A)	Corrente mb (A)	140,282	Tempo base (s) Tensão médi	0,5	Corrente mp (A)	200,302

Figura A.4: Planilha de Excel para 1300 J/mm de aporte térmico em cada modo de soldagem.

APÊNDICE B: Imagens macrográficas dos cordões de solda.



13CP-MACRO-10x

13PP-MACRO-20x

**APÊNDICE C:** Tabelas com as durezas e áreas médias de tamanho de grão ferrítico e perlítico tomadas nos pontos de análises.

Tabela C.1: Durezas média em Vickers e desvio padrão dos dados tomados nos pontos nos pontos de análises A-L para 600 J/mm de aporte térmico em cada modo de soldagem.

	1	A		B		С		D		Е		F
6C	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP
	207,6	3,2	203,7	1,9	195,9	3,6	156,6	2,8	143,9	2,5	137,3	2,9
	Α		В		C		D		E		F	
	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP
6 <b>P</b>	236,8	13,7	227,3	9,9	221,0	6,6	167,1	2,8	153,2	7,4	147,9	0,4
UI	G		Н		Ι		J		Κ		L	
	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP
	225,4	11,6	231,2	19,6	214,9	2,0	171,5	6,0	160,4	2,9	152,2	3,0
	А		В		C		D		E		F	
	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP
6CP	241,7	18,4	243,4	12,5	215,9	4,8	173,8	5,4	158,0	3,4	152,0	2,4
UCI	G		Н		Ι		J		K		L	
	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP
	241,6	6,1	251,6	14,4	227,0	5,5	174,2	2,8	158,4	2,0	154,8	2,6
	А		В		C		D		E		F	
	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP
6PP	236,9	4,9	232,8	9,7	224,4	9,3	175,4	10,0	162,6	1,9	153,7	2,8
UII	G		Н		Ι		J		K		L	
	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP
	254,2	17,7	247,0	14,2	235,4	11,3	183,2	10,0	163,7	1,7	152,0	1,4

	Α		В		С		D		Ε		F	
<b>13C</b>	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP
	171,8	7,8	175,6	5,9	157,5	4,6	126,0	5,8	122,3	4,4	120,5	3,1
	А		В		С		D		E		F	
	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP
12D	203,0	14,6	218,0	7,6	201,6	4,2	153,1	9,8	147,7	1,9	139,1	2,4
131	G		Н		Ι		J		Κ		L	
	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP
	216,9	10,6	212,6	7,6	199,8	8,6	159,2	5,2	143,9	2,7	138,4	2,6
	А		В		С		D		E		F	
	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP
13CD	195,1	7,3	195,2	14,7	181,6	8,0	152,4	2,5	139,5	2,2	137,8	0,7
1301	G		Н		Ι		J		K		L	
	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP
	211,0	8,7	202,1	4,8	187,9	7,6	152,4	1,8	141,3	0,1	136,7	1,7
	А		В		C		D		E		F	
	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP
13DD	219,5	7,7	218,9	1,9	196,9	5,9	156,9	5,1	142,8	3,0	140,0	2,1
1311	G		Н		Ι		J		K		L	
	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP
	221,5	13,9	219,6	10,6	200,4	6,8	162,0	2,6	142,9	1,4	141,3	0,8

Tabela C.2: Durezas média em Vickers e desvio padrão dos dados tomados nos pontos de análises A-L para 1300 J/mm de aporte térmico em cada modo de soldagem.

Tabela C.3: Durezas média e desvio padrão dos dados tomados no metal base usado nos experimentos.

	Média	DP	Equivalência
	(HV)	(HV)	(RB)
Metal Base	132,0	6,6	73

	D	)		Ε			F	
60	Per	lita	Per	lita	Ferr	ita	Ferr	ita
oc	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP
	10806,5	3869,2	287,0	173,3	91,3	67,4	61,7	45,6
	Ľ	)		E			F	
	Per	lita	Perl	lita	Ferr	ita	Ferr	ita
	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP
<b>A</b> D	8750,8	2775,6	481,7	238,5	58,7	36,4	56,4	26,1
or	J	-		K			L	
	Per	lita	Perl	lita	Ferr	ita	Ferr	ita
	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP
	8104,9	3185,9	460,9	286,2	61,4	46,6	51,5	20,6
	D	)		E			F	
	Per	lita	Perl	lita	Ferr	ita	Ferr	ita
	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP
6CP	6180,0	2678,6	298,2	147,6	54,8	19,2	45,8	27,0
UCI	J			K			L	
	Per	lita	Perl	lita	Ferr	ita	Ferr	ita
	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP
	6615,4	2567,5	311,1	124,1	55,3	32,8	43,3	19,2
	Ľ	)		E			F	
	Per	lita	Perl	lita	Ferr	ita	Ferr	ita
	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP
6PP	5175,9	2714,6	574,1	301,3	42,5	17,9	43,1	23,9
UI I	J			K			L	
	Per	lita	Perl	lita	Ferr	ita	Ferr	ita
	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP
	5314,4	2373,8	613,3	231,7	45,6	26,5	38,0	16,8

Tabela C.4: Área média em μm<sup>2</sup> e desvio padrão dos dados tomados nos pontos de análises D-F e J-L para 600 J/mm de aporte térmico em cada modo de soldagem.

	Ι	)		Ε			F	
120	Fer	rita		Ferr	ita		Ferr	ita
150	Média	DP	Mé	dia	DF	)	Média	DP
	146,8	129,3	121	,0	88,	9	72,7	43,9
	Ι	)		E			F	
	Per	lita	Perl	lita	Ferr	ita	Ferri	ita
	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP
13D	8958,4	2284,1	359,2	250,8	86,8	29,6	65,1	45,2
131		J		K			L	
	Per	lita	Perl	lita	Ferr	ita	Ferri	ita
	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP
	8624,2	4674,9	464,5	160,4	93,3	47,1	66,5	31,4
	I	)		E			F	
	Per	lita	Perl	lita	Ferr	ita	Ferri	ita
	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP
13CP	7703,3	2845,6	146,9	39,4	84,6	39,1	70,4	42,5
1001		J		K			L	
	Per	lita	Perl	lita	Ferr	ita	Ferri	ita
	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP
	7823,1	3471,3	162,6	66,6	77,3	26,1	61,7	30,1
	Ι	)		E			F	
	Per	lita	Perl	lita	Ferr	ita	Ferr	ita
	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP
13PP	6364,4	820,6	406,7	144,1	74,1	42,5	50,6	25,7
1011		J		K			L	
	Per	lita	Perl	lita	Ferr	ita	Ferr	ita
	Média	DP	Média	DP	Média	DP	Média	DP
	7634,6	3458,3	432,6	139,3	80,2	35,3	54,2	25,1

Tabela C.5: Área média em µm<sup>2</sup> e desvio padrão dos dados tomados nos pontos de análises D-F e J-L para 1300 J/mm de aporte térmico em cada modo de soldagem.

Tabela C.6: Área média em μm<sup>2</sup> e desvio padrão dos dados tomados no metal base usado nos experimentos.

Matal	Fer	rita
Nietai Basa	Média	DP
Dase	142,1	172,2

APÊNDICE D: Imagens micrográficas dos pontos de análises.





6P-FB-100x



6P-FB-500x



6P-TE-200x



6P-TJ-100x



6P-FB-200x



6P-TD-100x



6P-TF-200x



6P-TK-200x





6PP-TE-200x

6PP-TF-200x



6PP-TJ-100x



6PP-TL-200x



13C-FB-200x



13C-TD-100x



6PP-TK-200x



13C-FB-100x



13C-FB-500x



13C-TE-200x







13PP-TD-100x

13PP-TE-200x



13PP-TF-200x



13PP-TK-200x



METAL BASE-200x



13PP-TJ-100x



13PP-TL-200x

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- AICHELE, G. (2002), "The Contact-Tube Distance in Gas-Shielded Metal-Arc Welding How Does it Work?" In: *Welding and Cutting*, pp. 80-83. Issue 2.
- ASM, (1992), *Metallography and Microestructures, Metals Handbook*, 9 Ed. vol. 9, Miami, ASM International ed., 1627 p.
- ASM, (1997), Weld Integrity and Performance A Source Book Adapted from ASM International Handbooks, Conference Proceedings, and Technical Books, ASM International ed., 417 p.
- ASTM E112, (2013), "Standard Test Methods for Determining Average Grain Size" ASTM Internacional, West Conshohocken, PA, United States, DOI:10.1520/E0112-13, www.astm.org.
- ASTM E140, (2012), "Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, Scleroscope Hardness, and Leeb Hardness" ASTM Internacional, West Conshohocken, PA, United States, DOI:10.1520/E0140-12be1, www.astm.org.
- ASTM E1181, (2002), "Standard Test Methods for Characterizing Duplex Grain Sizes" ASTM Internacional, West Conshohocken, PA, United States, DOI:10.1520/E1181-02R08E01, www.astm.org.
- ASTM E3, (2011), "Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens" ASTM Internacional, West Conshohocken, PA, United States, DOI:10.1520/E0003-11, www.astm.org.
- ASTM E384, (2011), "Standard Test Method for Knoop and Vickers Hardness of Materials" ASTM Internacional, West Conshohocken, PA, United States, DOI: 10.1520/E0384-11E01, www.astm.org.
- ASTM E407, (2007), "Standard Practice for Microetching Metals and Alloys" ASTM Internacional, West Conshohocken, PA, United States, DOI: 10.1520/E0407-07, www.astm.org.
- AWS (1991), Welding Process, Welding Handbook, 8 Ed. vol. 2, Miami, AWS ed.
- **AWS** (1995), Weldability, Welding Metallurgy, and Welding Chemistry.
- **BARBOSA, A. D. (2006)**, Avaliação da sensitização em aços inoxidáveis ferríticos estabilizados e não estabilizados usando-se a técnica reativação eletroquímica potenciocinética em meio sulfúrico, Ouro Preto, 115 p. Dissertação de mestrado, UFOP.
- BARRA, S. R., DUTRA, J. C., RIBAS, F. A. (1998), "Avaliação dos Efeitos da Variação dos Parâmetros/Procedimentos de Soldagem e Automação, Sobre a Planicidade e Aspecto Superficial dos Revestimentos Empregados em Turbinas Hidráulicas", In: *XXIV ENTS*, Fortaleza, Setembro.

- **BARRA, S. R. (2003)**, *Influência do processo MIG/MAG Térmico sobre a microestrutura e a geometria da zona fundida*, Florianópolis, 220 p. Tese de Doutorado, UFSC.
- **BECKER, A. A. F. (2013)**, Influência dos parâmetros do processo MIG/MAG com curto circuito controlado sobre a geometria do cordão de solda, Porto Alegre, 146 p. Dissertação de mestrado, UFRGS.

**BRACARENSE, A. Q. (2003)**, "Gas Metal Arc Welding", In: Infosolda, Disponível em <a href="http://www.infosolda.com.br/artigos/prosol18.pdf">http://www.infosolda.com.br/artigos/prosol18.pdf</a>>. Acesso em: 18 ago de 2014.

- **CAMPOS, P. T. (2005)**, Caracterização mecânica e microestrutural de juntas soldadas pelos processos MIG/MAG e Arame Tubular, Curitiba, 61 p. Dissertação de mestrado, PUC-PR.
- CAMPOS, E. A., RIOS, C. M., MENDONÇA, L. P. B. (2012), "Influência dos parâmetros de pulso na microestrutura e perfil de dureza na soldagem de ligas de alumínio pelo processo mig superpulso" In: *Revista Militar de Ciência e Tecnologia*, Rio de Janeiro, 2° Trimestre pp. 42-56.
- CHADWICK, G. A. (1972), *Metallography of Phase Transformations*, New York, Crane, Russak and Company, Inc. ed., 309 p.
- **COSTA, U. (1995)**, "Qual a Importância do "Stickout" na Soldagem MIG/MAG e Arame Tubular", In: *Soldagem & Inspeção*, São Paulo, no. 01, pp. 54-55, Maio.
- DA SILVA, T. B., DA SILVA FILHO, C. B. A., DE SIQUEIRA FILHO, C. A., DA MOTA, C. A. M., DE MALAGALHÃES, B. E. (1995), "Influência dos parâmetros operacionais do processo Mig sobre a microestrutura e perfil de dureza na soldagem de alumínio naval", In: *IV CONEM* – Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Recife, Agosto.
- **DE SOUZA, C. I., (2011)**, Análise comparativa dos processos de soldagem GMAW e FCAW com transferência metálica por curto-circuito na posição horizontal, Uberlândia, 103 p. Dissertação de mestrado, UFU.
- DENNIS, J. H., MORTAZAVI, S. B., FRENCH, M. J., HEWITT, P. J., REDDING, C. R. (1997), "The Effects of Welding Parameters on Ultra-Violet Emissions, Ozone and CrVI Formation in MIG Welding", In: Annals of Occupational Hygiene, Great Britain, vol. 41, no. 01, p. 95-104.
- **DUTRA, J.C. (1990)**, *Procedimento computadorizado de determinação, seleção e controle de variáveis de soldagem MIG/MAG*, Florianópolis, Tese de Doutorado, UFSC.
- EVANS, G. M. (1980), "Effect of manganese on the microstructure and properties of allweld-metal deposits", In: *Welding Journal*, vol. 59, pp. 67s-75-s.
- FBTS (2000), Curso de Inspetor de Soldagem, Fundação Brasileira de Tecnologia da Soldagem.
- **HENKE, S.L. (2010)**, *Efeito da soldagem plasma pulsada na microestrutura e resistência à fadiga de um aço inoxidável supermartensítico*, Curitiba, 120 p. Tese de Doutorado, UFPR.
- JANAKI, G.D.R., MURUGESAN, R., SUNDARESAN, S. (1999), "Fusion Zone Grain Refinement in Aluminum Alloy Welds through Magnetic Arc Oscillation and Its Effect on Tensile Behavior", *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 8(5), pp. 513-520, October.

- JEFFUS, L. (2004), *Welding: Principles and applications*. United States of America, Thomson/Delmar Learning, 904 p.
- KOU, S. (2002), Welding Metallurgy, New Jersey, Wiley-Interscience Publication, 461 p.
- LITTLE, K. A., STAPON, W. F. G. (1990), "Select the Best Shielding Gas Blend for the Application", In: *Welding Journal*, USA, pp. 21-27, November.
- MACHADO, I. G. (1996), Soldagem & Técnicas Conexas: Processos. Porto Alegre, editado pelo autor, 477 p.
- **MODENESI, P. J. (2004)**, *Soldabilidade dos Aços Transformáveis (Apostila)*, UFMG, Belo Horizonte.
- MODENESI, P. J., MARQUES, P. V. (2006), Introdução aos Processos de Soldagem. UFMG, Belo Horizonte, pp. 18-19.
- **MODENESI, P. J. (2007)**, Introdução à Física do Arco Elétrico e sua aplicação na Soldagem dos Metais. UFMG, Belo Horizonte, 146 p.
- **PARGETER, R.J., DOLBY, R.E. (1985)**, Guidelines for Classification of Ferritic Steel Weld Metal Microstructural Constituents Using the Light Microscope, IIW Doc no. IX-1377-85.
- **PIZA, M.T.P. (2000)**, *Procedimentos para a soldagem de dutos e tubulações industriais em operação*, Rio de Janeiro, editado pelo autor.
- **RADICI, E. (2011)**, "Soldadura en sistemas de escapes de automóviles con proceso mig mag aristo superpulse" In: Soldar Conarco, Argentina, no. 134, pp. 17-29.
- **ROHDE, R. A. (2010)**, *Metalografia, preparação de amostras. Uma abordagem pratica (Apostila)*, Laboratório de ensaios mecânicos e materiais LEMM, URI, Santo Ângelo.
- SCOTTI, A., PONOMAREV, V. (2008), Soldagem MIG/MAG: Melhor entendimento, melhor desempenho. São Paulo, Artliber Ed., 284 p.
- **SOUSA, D. (2010)**, Levantamento de mapas operacionais de transferência metálica para soldagem mig/mag de aço ao carbono na posição plana, Uberlândia, 280 p. Dissertação de mestrado, UFU.
- SOUSA, D., ROSSI, M. L., KEOCHEGUERIANS, F., DO NASCIMENTO, V. C., VILARINHO, L. O., SCOTTI, A. (2011), "Influência da Regulagem de Parâmetros de Soldagem sobre a Estabilidade do Processo MIG/MAG Operando em Curto-Circuito" In: Soldagem & Inspeção, São Paulo, no. 01, pp. 22-32, Janeiro-Março.
- **TOKAR, A. (2011)**, *Efeito dos parâmetros de pulsação no processo TIG sobre a formação da poça de fusão*, Uberlândia, 93 p. Dissertação de mestrado, UFU.
- WAINER, E., BRANDI, S. D., MELLO, F. D. H. (1992), Soldagem: Processos e Metalurgia. 1<sup>a</sup> Ed., São Paulo, Edgard Blücher Ltda. ed. 494 p.