Universidade Federal da Paraíba
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
- Mestrado - Doutorado

API 5L X65: INFLUÊNCIA DO PROCESSO DE SOLDAGEM MIG TÉRMICO SOBRE A DUREZA E A MUDANÇA DE FASES NA ZGG

por

Reginaldo Florêncio de Paiva Filho

Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal da Paraíba para obtenção do grau de Mestre.

João Pessoa – Paraíba **agosto, 2019**

REGINALDO FLORÊNCIO DE PAIVA FILHO

API 5L X65: INFLUÊNCIA DO PROCESSO DE SOLDAGEM MIG TÉRMICO SOBRE A DUREZA E A MUDANÇA DE FASES NA ZGG

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba, em cumprimento às exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientadora: Professora Dra. Kelly Cristiane Gomes da Silva
Co-Orientador: Professor Dr. José Hilton Ferreira da Silva

João Pessoa – Paraíba **2019**

Catalogação na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

F481a Filho, Reginaldo Florencio de Paiva.
API 5L X65: INFLUÊNCIA DO PROCESSO DE SOLDAGEM MIG TÉRMICO SOBRE A DUREZA E A MUDANÇA DE FASES NA ZGG / Reginaldo Florencio de Paiva Filho. - João Pessoa, 2019.
80 f. : il.

Orientação: Kelly Cristiane Gomes da Silva.
Coorientação: José Hilton Ferreira da Silva.
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT.

1. Soldagem. 2. aço API X65. 3. microestrutura. 4. dureza. 5. MIG Térmico. I. da Silva, Kelly Cristiane Gomes. II. da Silva, José Hilton Ferreira. III. Título.

UFPB/BC

API 5L X65: INFLUÊNCIA DO PROCESSO DE SOLDAGEM MIG TÉRMICO SOBRE A DUREZA E A MUDANÇA DE FASES NA ZGG

por

REGINALDO FLORENCIO DE PAIVA FILHO

Dissertação aprovada em 12 de agosto de 2019

Profa. Dra. KELLY CRISTIANE GOMES DA SILVA
Orientadora – UFPB

Prof. Dr. JOSÉ HILTON FERREIRA DA SILVA
Coorientador - UFPB

Prof. Dr. JOSINALDO PEREIRA LEITE
Examinador Interno - UFPB

Prof. Dr. SÉRGIO RODRIGUES BARRA
Examinador Externo – UFRN

João Pessoa - PB *2019*

AGRADECIMENTOS

A Deus, por sempre nos fortalecer nos momentos difíceis para enfrentar todos os desafios. Aos meus pais, Reginaldo Florêncio de Paiva (in memoriam) e Avani Silva de Paiva por sempre incentivarem os meus estudos acreditando no poder da educação e a todos os meus familiares.

A minha esposa, Lucicleide pelo companheirismo e compreensão no decorrer desta jornada, sempre me dando forças nos momentos difíceis. A minha filha, Maria Clara que apesar de pequena, já compreende a importância dos estudos e das minhas ausências justificadas nas brincadeiras.

Ao IFPB – Campus João Pessoa, na pessoa do Prof. Francisco Antônio de França Neto (Prof. Chico) por todo o apoio na disponibilização dos laboratórios para realização das práticas experimentais.

Aos amigos do LABSID da UFPB: Os técnicos Herickson e Diego pelo suporte, na oficina do curso de Eng. Mecânica. Aos amigos da pós: Saulo, David, Adiana e Allisson.

Ao Prof. Dr. José Hilton Ferreira da Silva pela oportunidade e por acreditar que eu poderia ser capaz.

Ao Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Barra, pela disponibilidade em compartilhar seu rico conhecimento e toda a sua equipe do Laboratório de Soldagem e Inspeção da UFRN.

A Profa. Dra Kelly Cristiane Gomes da Silva, por todo o apoio durante toda essa jornada.

API 5L X65: INFLUÊNCIA DO PROCESSO DE SOLDAGEM MIG TÉRMICO SOBRE A DUREZA E A MUDANÇA DE FASES NA ZGG

RESUMO

O desenvolvimento do processo de soldagem MIG Térmico buscou alinhar a qualidade da solda, o melhor aspecto visual do cordão e a alta eficiência do processo MIG pulsado; com a capacidade de controle da poça de fusão do processo de soldagem TIG pulsado. No entanto, a soldagem MIG Térmico também faz com que a ZTA sofra um rápido ciclo térmico de aquecimento e resfriamento que resulta em mudanças metalúrgicas e de propriedades mecânicas. Nesta região, embora o material não tenha se fundido, pode ainda ocorrer transformações de fase no estado sólido, recristalização e crescimento de grãos. O crescimento de grãos na zona de grãos grosseiros (ZGG) pode causar degradação nas propriedades mecânicas dos materiais, fragilizando a junta soldada. Este crescimento está relacionado com os altos valores de energia de soldagem, as condições de soldagem e a variante do processo de soldagem utilizada. O presente trabalho investiga a influência da variante MIG Térmico sobre o refinamento de grãos da microestrutura na ZGG do aço API 5L X65. A variante MIG Térmico foi comparada aos processos MIG Convencional e MIG Pulsado com dois níveis de energia: 0,65 kJ/mm e 1,3kJ/mm na soldagem por simples deposição de cordões na posição 1G. Como variáveis de resposta foram analisadas a microestrutura (fases e tamanho de grãos) e a dureza da ZTA. Foram analisados: geometria do cordão, microdureza, tamanho de grão e fases presentes por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Os resultados mostraram que a variante MIG Duplo Pulsado (Térmico) apresentou um maior refinamento de grãos da ZTA, maior dureza e foram encontradas fases que indicam possivelmente, melhores propriedades mecânicas na região de grãos grosseiros (ZGG) se comparado às outras variantes (Convencional e Pulsado).

Palavras chave: Soldagem, aço API X65, microestrutura, dureza, MIG Térmico

API 5L X65: INFLUENCE OF THE MIG THERMAL WELDING PROCESS ON PHASE HARDNESS AND CHANGE IN THE REGION OF COARSE GRAINS

ABSTRACT

The developments in the welding process double pulsed MIG / MAG came to align a better quality of welding, better visual aspects of wires and high efficiency of pulsed MIG process; better ability of puddle control in the pulsed TIG (Tungsten inert gas) welding process. However, the heat pulsed MIG/MAG welding also causes in the HAZ - Heat affected Zone (ZTA) a rapid thermal heating and cooling cycles that results changes in metallurgical and mechanical properties. In this area although the material has not melted, solid-state phase transformations, recrystallization and grain growth may still occur as precipitations or dissolutions of substances present in the material as well. This phenomenon happens in certain temperatures. The present academic work investigates the influence of the double pulsed MIG / MAG variants (thermal) on the grain refinement of the microstructure of the API 5L X65 HAZ (ZTA) steel. The double Pulsed MIG variant was compared to the Conventional MIG and Pulsed MIG processes within two energy levels: 0.65 kJ / mm and 1.3kJ / mm for single wire welding at 1G position. As variants of response we analyzed microstructures (phases and grain sizes) and the hardness of heat zone affected (ZTA). Analysis of wire geometry, micro-hardness, grain size and phase identification by scanning electron microscopy (SEM) indicated that the Pulsed Double MIG (Thermal) variant has a better performance in HAZ (ZTA) grain refinement among the welding modes tested mainly with smaller grain size, higher hardness and phases that possibly indicate better mechanical properties in the region of coarse grains (ZGG) compared to other variants (Conventional and Pulsed).

Keywords: Welding MIG/MAG, Steel API, microstructure, hardness

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 17
1.1 Justificativa 18
1.2 Objetivos 18
1.3 Estrutura da Dissertação 19
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 20
2.1 Processos de Soldagem e suas Variações 20
2.1.1 Processo MIG/MAG - Convencional 20
2.1.2 Parâmetros de Soldagem 21
2.2 Modos de Transferência Metálica 23
2.2.1 Transferência por Curto-Circuito 23
2.2.2 Transferência Globular 24
2.2.3 Transferência por Spray 24
2.3 Variantes do Processo MIG 25
2.3.1 Processo MIG Pulsado 25
2.3.2 Processo MIG Duplo Pulsado (Térmico) 27
2.4 Metalurgia da Soldagem 28
2.5 O Refinamento de Grão na ZTA 32
3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL 36
3.1 Introdução 36
3.2 Materiais e Consumíveis 36
3.2.1 Metal de Base 36
3.2.2 Metal de Adição 36

3.2.3 Gás de Proteção 37
3.3 Equipamentos 37
3.3.1 Bancada Experimental 37
3.3.2 Sistema de Aquisição de dados (SAP) 38
3.4 Planejamento Experimental 39
3.5 Deposição dos Cordões 41
3.5.1 Modos de Soldagem 41
3.5.2 Parâmetros de Soldagem para o Processo MIG Convencional 46
3.5.3 Parâmetros de Soldagem para o Processo MIG Pulsado 46
3.5.4 Parâmetros de Soldagem para o Processo MIG Duplo Pulsado (Térmico) 47
3.6 Análises Metalográficas 51
3.7 Preparação dos corpos de prova 51
3.8 Análise Macro e Microestrutural 53
3.8.1 Macrografias 53
3.8.2 Micrografias 54
3.9 Análise da Geometria do Cordão 55
3.10 Determinação do Tamanho de Grão 56
3.11 Ensaios de Microdureza 57
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 59
4.1 Aspectos Visuais dos Cordões de Solda 59
4.2 Análise da geometria do cordão de solda para cada modo de soldagem 60
4.3 Relação microdureza x condição fabricação 64
4.4 Tamanho e refinamento do grão na ZGG 66
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 72
5.1. Conclusões 72
5.2. Sugestões para Trabalhos Futuros 74
REFERÊNCIAS 75

LISTAS DE FIGURAS

Figura 2. 1 Detalhe do Processo MIG/MAG (FIGUEIREDO,2000) 20

Figura 2. 2 - Balanço de forças na ponta do eletrodo.....22

Figura 2. 3 - Transferência tipo curto-circuito, (KOU, 2003).....24

Figura 2. 4 - A formação da gota e posterior desprendimento por ação das força gravitacional e a tensão superficial - Transferência globular (KOU, 2003). 24

Figura 2. 5 – Imagem apresentando a transferência metálica onde o diâmetro das gotas são aproximadamente iguais ao diâmetro do eletrodo, características da Transferência tipo spray, (KOU, 2003).....25

Figura 2. 6 - Pulsos de corrente idealizados (onda retangular) e parâmetros básicos associados, adaptado de (MACHADO, 1996). 25

Figura 2. 7 - Representação da variante MIG/MAG Térmico (BARRA, 2003).....27

Figura 2. 8 - Representação esquemática de partes de uma junta soldada 29

Figura 2. 9 - Detalhe: Zona termicamente afetada – ZTA. Foto: Autoria própria...30

Figura 2. 10 - Zonas ou Regiões da Zona Termicamente Afetada (EASTERLING,1992) 31

Figura 2. 11 – Efeito da Pulsação Térmica sobre a diferença de largura da ZTA adaptado de BARRA(2003). 32

Figura 2. 12 - Gráficos Tempo x Temperatura e Tamanho de grão vs Distância na ZTA - adaptado de (KOU, 2003).....34

Figura 2. 13 - Mecanismo refinação parcial nos aços carbono. Adaptado de (KOU, 2003) 35

ansferência tipo curto-circuito, (KOU, 2003). 24

Figura 3. 1 - Bancada completa para a prática experimental: Bancada de Soldagem (A), Fonte DIGIplus e Torre de resfriamento (B) e cabeçote de alimentação do arame (C). 38

Figura 3. 2 - Sistema de aquisição de dados SAP: (A) Maleta com conjunto para conexões de sensores, (B) Gráficos do software SAP 38

Figura 3. 3 - Esquema do Planejamento Fatorial para avaliar a microestrutura produzida na ZTA. 40

Figura 3. 4 - Teste em chapa de aço 1020 - Processo Duplo Pulsado E2.....43

Figura 3. 5 - Oscilogramas de Corrente, tensão, velocidade de alimentação do arame e vazão do gás para o modo Duplo Pulsado. 43

Figura 3. 6 - Média da Tensão obtida no modo Duplo Pulsado.....50

Figura 3. 7 - Detalhe da região de extração dos corpos de prova para medição das respostas de interesse, adaptado de BARRA (2003). 52

Figura 3. 8 – Cortes das seções transversais e longitudinais dos corpos de prova...52

Figura 3. 9 - Embutidora e lixadeira utilizadas na preparação das amostras. 53

Figura 3. 10 – Representação esquemática dos parâmetros analisados na geometria dos cordões de solda. 56

Figura 3. 11 – Representação esquemática da técnica utilizada para as medições do tamanho de grão do metal de base. 57

Figura 3. 12 - Microdurômetro marca Shimadzu utilizado nos testes.....57

Figura 3. 13 - Pontos de análise para os ensaios de Microdureza. 58

Figura 3. 14 - Representação esquemática das durezas tomadas em cada ponto de interesse. Fonte: Norma ASTM E-384. 58

Figura 4. 1 - Cordões depositados para cada modo e respectivo nível:(A, B e C – nível E1) e (D, E e F – nível E2) 59

Figura 4. 2 Perfis longitudinais dos cordões 1) DP1 e 2) DP2 60

Figura 4. 3 Geometria dos Cordões de Solda modo Convencional: (A) C2 e (B) C1 61

Figura 4. 4 Geometria dos Cordões de Solda modo Pulsado: (C) P2 e (D) P1.....61

Figura 4. 5 - Gráficos dos dados geométricos do cordão vs. modo de soldagem: A – Índice de penetração , B – Área transversal total, e C – Diluição do cordão de solda. 62

Figura 4. 6 - Gráfico: D – Penetração no Cordão de Solda (considerar a fase de Pulso térmico para modo DP) para cada modo de soldagem e níveis de Energia de Soldagem. ..63

Figura 4. 7 – Gráficos :Reforço (E) e Largura dos cordões de Solda (F) para cada modo e níveis de Energia de Soldagem. 63

Figura 4. 8 - Gráfico da Dureza VS Ponto de Análise para cada modo de soldagem nos níveis: (1) E1 e (2) E2.....65

Figura 4. 9 - Pontos de análises do tamanho de grãos na ZGG. 66

Figura 4. 10 – Representação esquemática do tamanho de Grão vs Ponto de Análise nos dois níveis de energia de soldagem para cada modo: (1) E1 e (2) E2.....67

Figura 4. 11 – Comparação dos tamanhos de grão na ZGG para cada variante nos níveis E1 e E2.....68

Figura 4. 12 – Constituintes encontrados no modo Convencional (C1 e C2): ferrita primaria intragranular PF(I), ferrita secundaria de fase alinhada FS(A) e ferrita primaria de contorno de grão PF(G).....69

Figura 4. 13 - Constituintes encontrados no modo Pulsado (P1 e P2): ferrita primaria intragranular PF(I), ferrita secundaria de fase alinhada FS(A) e ferrita primaria de contorno de grão PF(G). 69

Figura 4. 14 - Constituintes encontrados no modo Duplo Pulsado (DP1 e DP2): ferrita primaria intragranular PF(I), ferrita secundaria de fase alinhada FS(A), ferrita primaria de contorno de grão PF(G) e ferrita acicular.....69

Figura 4. 15 - Micrografias obtidas na região dos grãos grosseiros da ZTA para cada modo no nível E2: (M) Martensita, (F) Ferrita e Bainita (B).....70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição Química do aço API 5L X65 36
Tabela 2 Propriedades Mecânicas do aço API 5L X65 (Usiminas, 2013.....36
Tabela 3 - Composição química do arame AWS ER70S - 6 37
Tabela 4 - Planejamento Fatorial com Réplica 40
Tabela 5 - Simbologias dos modos de soldagem e suas réplicas. 41
Tabela 6 – Dados para cálculo das energias de soldagem para o modo MIG Duplo Pulsado e ajuste dos valores de velocidade de soldagem.....44
Tabela 7 - Dados para cálculo das energias de soldagem para o modo Convencional e ajuste dos valores de velocidade de soldagem.....45
Tabela 8 - Dados para cálculo das energias de soldagem para o modo MIG Pulsado e ajuste dos valores de velocidade de soldagem.....45
Tabela 9 - Parâmetros fixos utilizados na pesquisa.....46
Tabela 10 - Parâmetros de Soldagem MIG Convencional. 46
Tabela 11 - Parâmetros de Soldagem MIG Pulsado.....47
Tabela 12 - Parâmetros de Soldagem MIG Duplo Pulsado. 48
Tabela 13 - Preparação das superfícies para análise metalográfica. 53
Tabela 15 – Valores dos diferentes parâmetros analisados para a geometria do cordão em cada variante e o nível de energia de soldagem E1 e E2.....62
Tabela 16 – Valores de Dureza na Região de Grãos Grosseiros para cada variante e seu nível de energia de soldagem E1 e E2. 64
Tabela 17 - Tamanho de grão do Metal de BasE 67
Tabela 18 – Valores de tamanho de grãos na ZGG para cada variante e seu nível de energia de soldagem.....67

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

α	Ângulo do plano de deslocamento da tocha de soldagem
θ	Ângulo de trabalho da tocha de soldagem
A	Ampere
AF	Ferrita acicular
AISI	American Iron and Steel Institute
Ap	Área de penetração da solda
Ar	Área de reforço da solda
ASTM	American Society for Testing and Materials
At	Área transversal total da solda
AWS	American Welding Society
Bt	Base térmica
C	Carbono
C_1	Modo de soldagem Convencional Energia E1
C_2	Modo de soldagem Convencional Energia E2
CC	Corrente constante
CO_2	Dióxido de carbono
Cr	Cromo
D	Diluição da solda

DBCP	Distância Bico Contato Peça
DP	Desvio Padrão
DP1	Modo de soldagem Duplo Pulsado Energia E1
DP2	Modo de soldagem Duplo Pulsado Energia E2
dV	Diagonal identação Vickers
ER	Eletrodo revestido
FS (A)	Ferrita com segunda fase alinhada
FS (NA)	Ferrita com segunda fase não alinhada
Fg	Força da Gravidade
$F\gamma$	Força da temsão superficial
Fem	Força eletromagnética
Fa	Força de arraste pela passagem dos gases
Fv	Força de reação aos jatos de vapores
E	Energia de soldagem
H	Hidrogênio
He	Hélio
HV	Dureza Vickers
I	Corrente de soldagem
Ib	Corrente de base
Ibb	Corrente de base na base térmica
Ibp	Corrente de base no pulso térmico
IIW	International Institute of Welding
Im	Corrente média.
Impt	Corrente média no pulso térmico

Imbt	Corrente média na base térmica
Imt	Corrente média total
Ip	Corrente de pulso
INDp	Índice de penetração da solda
Ipb	Corrente de pulso na base térmica
Ipp	Corrente de pulso no pulso térmico
It	Corrente de transição
l ou l_0	Comprimento livre do arame
l_c	Largura do cordão de solda
M-A	Martensita Austenita
M	Martensita
MAG	Metal Active Gás
MIG	Metal Inert Gás
Mn	Manganês
Mo	Molibdênio
Ni	Níquel
O_2	Oxigênio
P	Fósforo
Pen	Penetração do cordão de solda
P1	Modo de soldagem Pulsado Energia E1
P2	Modo de soldagem Pulsado Energia E2
PF (G)	Ferrita primária de contorno de grãos
PF (I)	Ferrita primária intragranular
DP	Modo de soldagem Duplo 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.
tb	Tempo base
tbb	Tempo de base na base térmica
tbp	Tempo de base no pulso térmico
tbt	Tempo da base térmica.
TIG	Tungstênio Inerte Gás
tp	Tempo de pulso
tpb	Tempo de pulso na base térmica
tpp	Tempo de pulso no pulso térmico
tpt	Tempo do pulso térmico
Tt	Período térmico
V	Tensão de soldagem
V	Vanádio
Vapt	Velocidade de alimentação do arame no pulso térmico
Vabt	Velocidade de alimentação do arame na base térmica
Vbt	Tensão na base térmica
Vm	Tensão media
Vpt	Tensão no pulso térmico

Vs	Velocidade de soldagem
ZGG	Região de grãos grosseiros
ZF	Zona Fundida
ZTA	Zona Termicamente Afetada

1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda no transporte de gás, petróleo e seus derivados vem tornando cada vez mais exigentes as especificações de tubos para gasodutos e oleodutos. Um dos aços mais utilizados pela indústria na fabricação desses tubos é o API 5L X65, uma vez que, no Brasil, o uso comercial de aços API 5L X80 é muito reduzido devido à dificuldade do controle da velocidade de resfriamento (ALBUQUERQUE, 2015). Neste caso, novas técnicas de soldagem que combinem maior produtividade e maximização das propriedades mecânicas destes materiais são um desafio para a engenharia.

O aumento da resistência mecânica destes aços proporcionou o menor consumo de material permitindo também o transporte de gás a maiores pressões, em virtude da adição de elementos como Ni, Ti, V e o processo controlado de laminação termomecânica, possibilitando o refinamento da microestrutura (OGATA, RAMÍREZ, *et al.*, 2008).

Espera-se que a alta resistência mecânica destes materiais, após os processos de fabricação, mantenha-se em níveis compatíveis com as aplicações e normas técnicas. Pois estas propriedades podem ser modificadas pela condição térmica imposta durante a operação de soldagem, principalmente na região de Grãos Grosseiros da Zona Termicamente Afetada (ZGG) (CHILQUE, SOUZA, *et al.*, 2014).

Esta região normalmente apresenta problemas de resistência mecânica ligados as características da microestrutura encontrada. Nesta linha, o processo de Soldagem MIG Térmico surge como uma ferramenta que pode, através da corrente duplamente pulsada, provocar um maior refinamento de grãos devido, entre outros fatores, ao menor tempo de exposição à região de austenitização.

1.1 Justificativa

O processo MIG e suas variantes possuem grande interesse de pesquisa pela comunidade científica e industrial pela necessidade de manutenção ou melhorias de propriedades e custos aliado a alta produtividade, bem como minimização de perda das características do metal de base devido ao processo. O MIG Térmico, ainda em fase de consolidação na literatura, surge como uma alternativa que une as vantagens da soldagem MIG/MAG, em corrente pulsada, com as vantagens do processo TIG pulsado (TIG térmico) (BARRA, 2003), ou seja, ao realizar a soldagem, esta variante proporciona uma agitação na poça de fusão que devido a diferença imposta pelas fases (Base Térmica e Pulso Térmico), pode induzir o refinamento de grão na ZTA.

Desta forma, este trabalho pretende contribuir apresentando a variante MIG Duplo Pulsado (Térmico) como uma opção na operação de soldagem que proporciona um refinamento do tamanhão de grão e, consequentemente, melhores propriedades mecânicas da ZTA.

1.2 Objetivos

Neste trabalho propõe-se avaliar a influência do processo MIG Duplo Pulsado (Térmico) sobre a microestrutura (fases e tamanho de grãos), da região da zona de grãos grosseiros da zona termicamente afetada (ZGG) de juntas soldadas do aço API 5L X65.

Como objetivos específicos: têm-se:

- Avaliar a influência dos modos de corrente: convencional, pulsada e duplamente pulsada; sobre a geometria do cordão de solda e sobre o tamanho de grãos da ZGG;
- Avaliar a influência da energia de soldagem (E1 e E2) sobre a microestrutura e dureza da região ZGG;
- Avaliar a influência da energia de soldagem (E1 e E2) sobre a geometria dos cordões de solda da ZGG.

1.3 Estrutura da Dissertação

Este trabalho será estruturado com um capítulo introdutório e mais quatro capítulos descritos a seguir:

Capítulo II: Apresentação da fundamentação teórica sobre os processos MIG/MAG e suas variantes (Convencional, Pulsado e Térmico) e a Metalurgia da Soldagem (Parâmetros de soldagem, Energia de Soldagem e Tipos e Juntas soldadas) além da análise da variante MIG Duplo Pulsado como agente de refinamento de grãos na ZGG.

Capítulo III: Descrição do Procedimento Experimental com informações sobre as práticas de soldagem e parâmetros utilizados, preparação dos corpos de prova com descrição de materiais e equipamentos utilizados.

Capítulo IV: Apresentação dos resultados obtidos com as devidas análises dos dados e suas relações com as variações das propriedades analisadas.

Capítulo V: Apresentação das conclusões desta pesquisa e sugestões para trabalhos futuros sobre o assunto.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A revisão bibliográfica que será descrita neste capítulo, apresentará as três variantes do processo MIG: Convencional, Pulsado e Duplo Pulsado (Térmico), como também os modos de transferência metálica e os cálculos das Energias de Soldagem para cada variante, para mais à frente discutirmos a influência de cada uma delas na região de grãos grosseiros (ZGG) da ZTA.

2.1 Processos de Soldagem e suas Variações

2.1.1 Processo MIG/MAG - Convencional

O processo de soldagem MIG/MAG se baseia na formação de um arco elétrico entre a peça e o eletrodo maciço consumível, continuamente alimentado, a proteção da poça de fusão formada, é feita por um gás, ou mistura de gases, inertes ou ativos (MACHADO, 1996). É essa proteção gasosa ativa ou inerte que protege a poça de fusão e as gotas metálicas. Este processo proporciona um arco estável, transferência metálica com baixas perdas por respingos e boa penetração (KOU, 2003). A figura 2.1 apresenta esquematicamente o processo MIG/MAG:

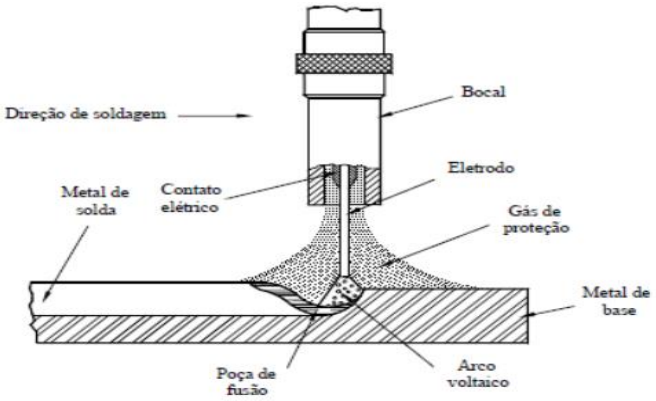


Figura 2. 1 Detalhe do Processo MIG/MAG (FIGUEIREDO,2000)

Este processo é amplamente utilizado na indústria devido a sua aplicabilidade na soldagem de vários metais e suas ligas comerciais a exemplo: aço carbono (1020, API, etc),

aço inoxidável, alumínio, cobre e etc. A alta produtividade do processo MIG/MAG comparada com o processo de Eletrodo Revestido, por exemplo, o credencia para utilização junto à automação do processo na indústria, devido à qualidade e possibilidade de reprodução das juntas soldadas, aliando segurança operacional e redução de custos de fabricação. A soldagem pode ser realizada de forma semiautomática ou automática, uma vez que pode ser robotizada e realizar soldas em todas as posições.

Os gases normalmente utilizados como proteção são: argônio, hélio, nitrogênio, hidrogênio, oxigênio e dióxido de carbono. Alguns destes puros ou em misturas dependendo da aplicação. Nos últimos anos, fabricantes de equipamentos de soldagem desenvolveram fontes de energia com controle eletrônico e algoritmos inteligentes para controle do processo.

Os avanços tecnológicos apresentados por essas fontes na soldagem para o processo MIG incluem, entre outros, soldagem por corrente pulsada, redução de respingos da transferência de metal por curto-circuito e ajuste fino da entrada de calor (MODENESI, 2018). O processo utiliza fontes de soldagem com características estáticas: corrente constante (Plana) ou Tensão Constante (Tombante).

2.1.2 Parâmetros de Soldagem

O Processo MIG/MAG, normalmente utiliza fonte na condição de corrente continua, e polaridade inversa, isto é, eletrodo com polo positivo a fim de possibilitar melhor penetração do cordão (poça de fusão) e estabilidade do arco elétrico. Uma correta seleção nos parâmetros de soldagem é importante, pois estas variáveis podem influenciar na estabilidade do arco e qualidade final do depósito (BARRA, 2003). A seguir uma explicação dos parâmetros de soldagem do processo MIG/MAG:

Tensão de Soldagem (U)

A tensão de soldagem é um parâmetro muito importante, pois dependendo do modo, pode influenciar diretamente o processo de soldagem, impactando no comprimento e na largura do arco se não ajustado corretamente (BARBEDO, 2011). Este parâmetro, ainda pode interferir na largura e penetração do cordão, uma vez que, para uma mesma corrente, uma tensão muito baixa provocará cordões mais estreitos com maior penetração. Além disso,

o valor da tensão é decisivo para induzir o tipo de transferência metálica pretendido no processo.

Corrente de Soldagem (I)

A Corrente elétrica é um dos principais parâmetros dos processos de soldagem a arco elétrico, pois a passagem de corrente (fluxo) proporciona a energia ou aporte de calor necessária para a formação da poça de fusão. A sua intensidade, é um dos fatores responsáveis pelo controle das forças atuantes na poça de fusão. Segundo Modonesi (2012). As principais forças que podem atuar na ponta do eletrodo e contribuir para a transferência de metal são:

- Força da gravidade (Fg);
- Força da tensão superficial (Fγ);
- Força eletromagnética (Fem);
- Força de arraste pela passagem de gases (Fa);
- Força de reação à jatos de vapores ou ao jato de plasma (Fv);

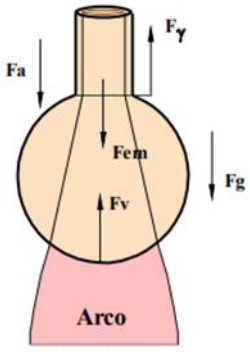


Figura 2. 2 - Balanço de forças na ponta do eletrodo. Fg - força gravitacional, Fem - força eletromagnética, Fγ - força de tensão superficial, Fa - força de arraste e Fv - força de reação.

Considera-se que uma gota na ponta do eletrodo se destacará deste quando o balanço das forças atuando nesta passar a apresentar uma resultante que a afaste do eletrodo. Por exemplo, no caso da figura 2.2, o destacamento da gota ocorrerá como mostrado na equação I:

$$F_{em} + F_g + F_a > F_\gamma + F_v \qquad \text{(I)}$$

Associadas diretamente a maiores aportes térmicos nos processos de soldagem, a corrente também impacta na dureza, tamanho de grão e nas propriedades mecânicas finais do material soldado.

Velocidade de Soldagem (Vs)

Outro parâmetro importantíssimo no processo de soldagem e uma das variáveis para análise e variação de energia de soldagem empregado. Um aumento na velocidade de soldagem proporciona um estreitamento do cordão, elevação da penetração num primeiro instante e diminuição em valores mais altos. Em velocidades ainda mais altas, pode provocar mordeduras, trincas de solidificação. O incremento na velocidade de soldagem, mantido os outros parâmetros fixos, acarretará ainda uma redução no nível de distorção, tamanho da ZTA e modificação na microestrutura do metal depositado (BARRA, 2008).

2.2 Modos de Transferência Metálica

A maneira como ocorre a transferência metálica e a taxa com que a gota se desprende do eletrodo consumível são de grande importância na soldagem (MACHADO, 1996). Basicamente, a transferência de metal fundido, desde o eletrodo consumível até a poça de fusão, acontece de três modos: a) curto-circuito, b) globular e c) spray. Os modos de transferência podem ser alterados se houver alguma mudança nos parâmetros estabelecidos de soldagem como corrente, tensão, gás de proteção, etc.

2.2.1 Transferência por Curto-Circuito

A transferência metálica do tipo curto-circuito acontece com menores comprimentos de arco e valores de tensão elétrica. De acordo com este mecanismo, a gota toca a poça de fusão numa frequência entre 20 e 200 Hz, ocorrendo um curto-circuito então a corrente se eleva provocando um forte aquecimento do eletrodo (efeito Joule), fusão (com a transferência do metal para a poça de fusão) e reabertura do arco (SILVA, *et al*.,2011). A figura (2.3) mostra a transferência por curto-circuito numa sequência de fotografias de alta velocidade:

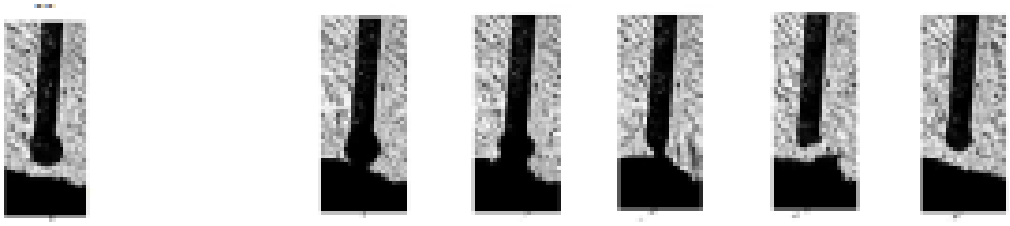


Figura 2. 3 - Transferência tipo curto-circuito, (KOU, 2003).

2.2.2 Transferência Globular

A transferência metálica globular possui a característica de ausência de curtos-circuitos, com tensões mais elevadas do que o modo corrente constante e o desprendimento de gotas metálicas com diâmetro maiores que o eletrodo por influência da ação gravitacional e da tensão superficial. Este tipo de transferência produz uma quantidade considerável de respingos. A figura 2.4 mostra a transferência globular numa sequência de fotografias de alta velocidade:

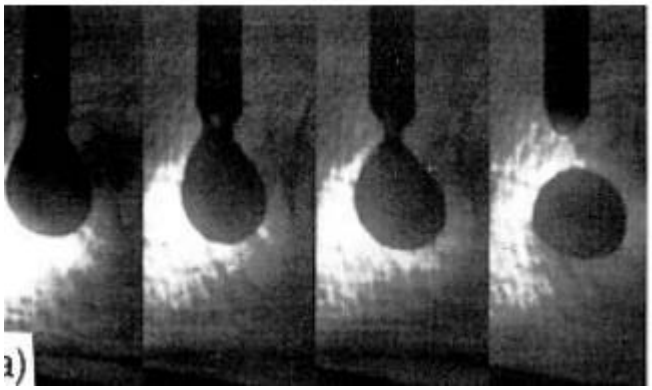


Figura 2. 4 - A formação da gota e posterior desprendimento por ação das força gravitacional e a tensão superficial - Transferência globular (KOU, 2003).

2.2.3 Transferência por Spray

A transferência metálica por spray ou goticular, como também é conhecida, proporciona uma transferência estável, ausência de respingos e alta taxa de deposição. Este tipo de transferência metálica, atua com altos valores de tensão e correntes de soldagem e a gotas metálicas geradas são da ordem do diâmetro do eletrodo, a figura (2.5) mostra a transferência por spray numa sequência de fotografias de alta velocidade:

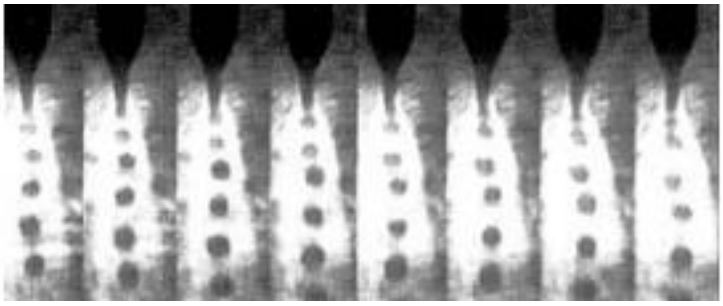


Figura 2. 5 – Imagem apresentando a transferência metálica onde o diâmetro das gotas são aproximadamente iguais ao diâmetro do eletrodo, características da Transferência tipo spray, (KOU, 2003).

2.3 Variantes do Processo MIG

2.3.1 Processo MIG Pulsado

Segundo Scotti e Ponomarev (2008), o processo MIG/MAG Pulsado surgiu com o intuito de reunir as melhores características das versões por curto-circuito e goticular axial (spray) em um só processo, ou seja, obter-se uma transferência estável que proporcione baixo índice de respingo e bom acabamento do cordão, a um valor de corrente baixa e possibilidade de soldagem em qualquer posição e de chapas finas.

A manutenção do arco elétrico é obtida com uma corrente mais baixa enquanto que a corrente de pulso provoca o destacamento da gota, assim, obtêm-se a transferência metálica por spray na condição controlada.

O modo Pulsado utilizado nos processos TIG e MIG, é definido pela corrente de base (Ib) juntamente com seu tempo de atuação (Tb); corrente de pico (Ip) e tempo de duração (Tp), além de relacionar a velocidade de alimentação do arame e tensão, com o objetivo de manter um arco estável (MACHADO, 1996).

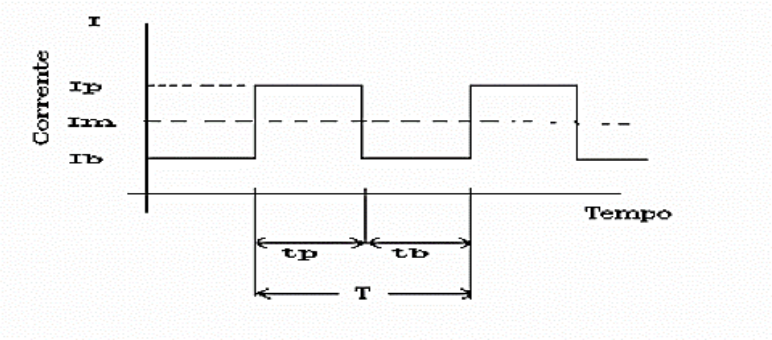


Figura 2. 6 - Pulsos de corrente idealizados (onda retangular) e parâmetros básicos associados, adaptado de (MACHADO, 1996).

Onde:

tp – Tempo de pulso;
tb – Tempo de base;
Ip – Corrente de Pulso;
Ib – Corrente de Base.

Esta última variação, proporciona algumas vantagens com relação a corrente convencional, ou seja: Soldagem em todas as posições, maior taxa de fusão, corrente média menor que na convencional, redução nos salpicos e bons aspectos na geometria do cordão de solda.

A seguir os parâmetros para a soldagem no modo pulsado:

✓ **Corrente de Base (Ib)**: Esta corrente é obtida para que se tenha um equilíbrio entre a velocidade de fusão do arame com a velocidade de alimentação do arame, ou seja, Txf=Txa. O valor da corrente de base deve ser tal que permite a manutenção do arco.

✓ **Tempo de Base (Tb):** É o tempo ajustado para que se obtenha o tamanho da gota pretendida, que juntamente somado com o tempo de pulso, tenha valor suficiente para fundir uma determinada quantidade de arame.

✓ **Corrente de Pulso (Ip):** A corrente de pulso deve possuir um valor acima da corrente de transição de maneira que garanta o destacamento de uma gota, condição UGPP.

✓ **Tempo de Pulso (Tp):** Outra variável que deve ser bem ajustada para garantir a condição UGPP e dependerá dos materiais envolvidos (diâmetro do eletrodo, gás de proteção, metal base, material do eletrodo, DBCP, etc).

Energia de Soldagem no modo pulsado

A Energia de Soldagem no modo pulsado pode ser obtida utilizando-se como a base a Im (corrente média) calculada pela seguinte relação da equação II:

$$I_m = \frac{I_p \times t_p + I_b \times t_b}{t_p + t_b} \qquad (2)$$

Onde:

Im – Corrente Média

Ip – Corrente de Pulso

tp – Tempo de Pulso

Ib – Corrente de Base

tb – Tempo de Base

2.3.2 Processo MIG Duplo Pulsado (Térmico)

A variante MIG Térmico é obtida com a imposição conjunta da modulação nos sinais de corrente média e da velocidade de alimentação do arame em duas fases distintas ou com modulação da corrente e velocidade de alimentação do arame constante (BARRA, 2003). Segundo Rocha, Filho, *et al.* (2018), no processo de soldagem MIG Duplo Pulsado (Térmico), duas condições de transferência metálica, ou pacotes operacionais por corrente pulsada, são utilizadas em um mesmo procedimento de soldagem, uma de maior velocidade de alimentação de arame e corrente média, denominada pulso térmico, e outra com menor velocidade de alimentação de arame e de menor corrente média, denominada base térmica. A figura 2.7 apresenta as duas condições relatadas na variante MIG Duplo Pulsado (Térmico).

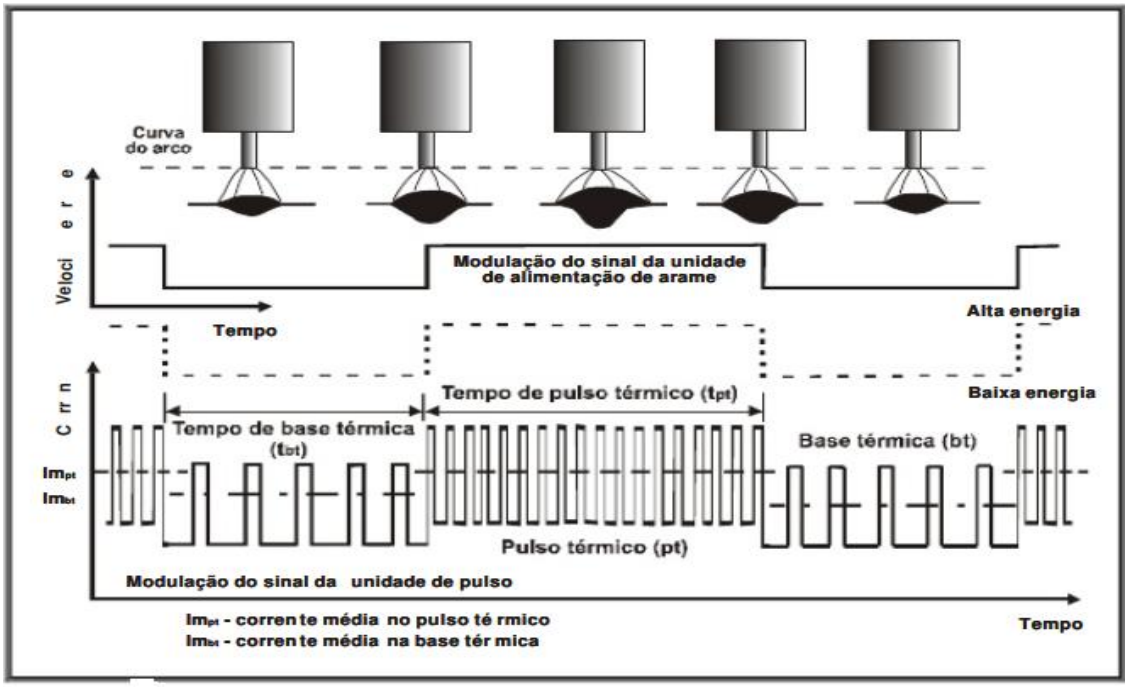


Figura 2. 7 - Representação da variante MIG/MAG Térmico (BARRA, 2003).

Na execução do processo são utilizados pacotes operacionais com parâmetros pré-definidos de maneira experimental que produzem efeitos diretos na formação e solidificação

da poça metálica. Durante o processo, o material é submetido a sucessivos ciclos térmicos devido a variação controlada da energia de soldagem, como consequência desta e da variação da velocidade de alimentação do arame, ocorre uma mudança cíclica na geometria do cordão de solda, o chamado efeito ou perfil “serrilhado”.

Energia de Soldagem no modo Duplo Pulsado (Térmico)

A Energia de Soldagem do modo Duplo Pulsado é calculada com base na obtenção da corrente média Total (**Imt**) que é resultado da relação entre corrente média do pulso térmico e corrente média da base térmica (HINCAPIÉ, 2015):

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

$$I_{mt} = \frac{\left(\frac{I_{pp} \times t_{pp} + I_{bp} \times t_{bp}}{t_{pp} + t_{bp}}\right) \times t_{pt} + (I_b) \times t_{bt}}{t_{pt} + t_{bt}} \qquad (3)$$

Onde:

- I_{pp}: Corrente de pulso no pulso térmico
- I_{bp}: Corrente de base no pulso térmico
- t_{pp}: Tempo de pulso no pulso térmico
- t_{bp}: Tempo de base no pulso térmico
- t_{pt}: Tempo do pulso térmico
- I_{pb}: Corrente de pulso na base térmica
- I_{bb}: Corrente de base na base térmica
- t_{pb}: Tempo de pulso na base térmica
- t_{bb}: Tempo de base na base térmica
- t_{bt}: Tempo da base térmica
- I_b: Corrente na base térmica

2.4 Metalurgia da Soldagem

Neste tópico, serão relatadas as partes da junta soldada e as características microestruturais encontradas na regiões pós-soldagem.

2.4.1 Partes de uma Junta Soldada

A junta soldada é formada por várias regiões ou zonas distintas conforme pode ser observado na figura 2.8:

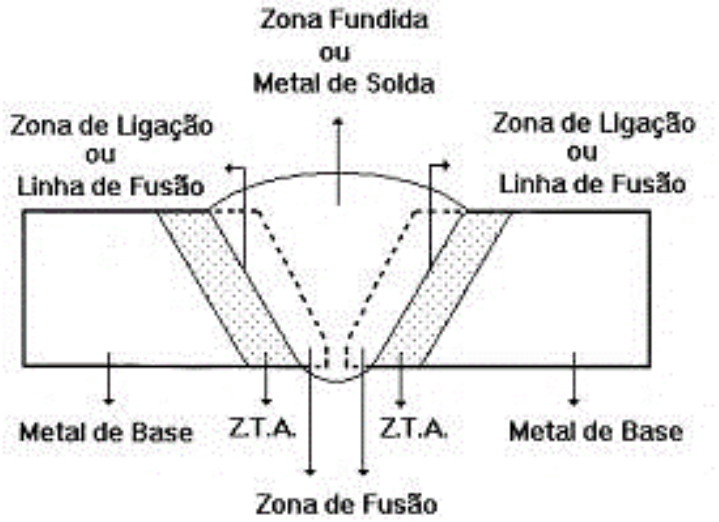


Figura 2. 8 - Representação esquemática de partes de uma junta soldada

Zona Fundida – Zona formada pela mistura do metal fundido (base) com o metal de adição.

Zona de ligação – É a região que delimita a poça de fusão e o metal de base. É nesta zona que é iniciada o processo de solidificação e o crescimento dos grãos em direção a linha central do metal de solda.

ZTA – Zona termicamente afetada – é uma das mais importantes regiões de uma junta soldada, localizada ao lado da zona fundida. Pode sofrer mudanças microestruturais devido a influência dos ciclos térmicos durante o processo de soldagem e isso pode provocar como consequência, a diminuição de propriedades mecânicas importantes do material.

2.4.2 Efeitos Metalúrgicos nas Microestruturas da ZTA Pós-Soldagem

Zona Termicamente Afetada - ZTA

A Zona Termicamente Afetada – ZTA sofre mudanças microestruturais devido aos inúmeros ciclos térmicos os quais esta é submetida ao longo de diferentes regiões do cordão.

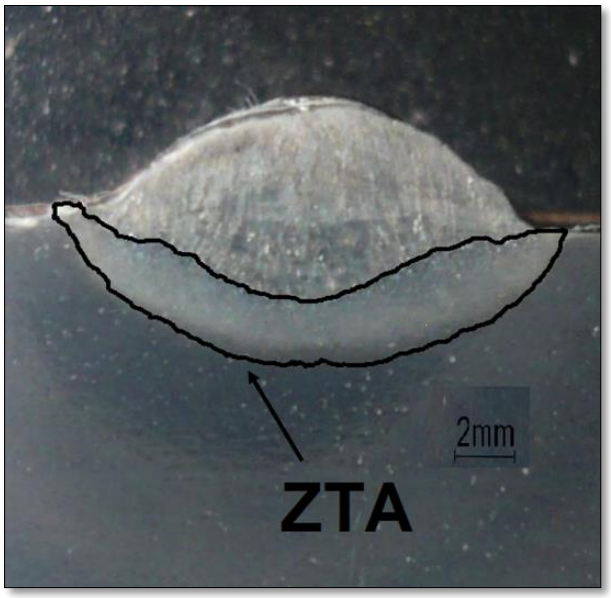


Figura 2. 9 - Detalhe: Zona termicamente afetada – ZTA. Foto: Autoria própria.

Estas variações de ciclos térmicos provocam mudanças na microestrutura do material, pois o valor do energia de soldagem influência diretamente na ZTA, pois um maior energia de soldagem resulta em maior molhabilidade, penetração e em algumas situações menor velocidade de soldagem (MORALES, RESENDE e SCOTTI, 2007). Na ZTA, a literatura menciona que na soldagem multipasse, o pré-aquecimento influencia na largura e dureza dessa região, pois o pré-aquecimento aumenta a energia final de soldagem, diminuindo a taxa de resfriamento e consequentemente reduzindo a largura e dureza da ZTA.

Na soldagem dos aços baixa liga e alta resistência – ARBL como no caso dos aços API 5L, existe a necessidade de um maior controle dos parâmetros de soldagem, para que se obtenha ao final do processo, uma microestrutura com boas propriedades mecânicas. O controle da extensão da ZTA, assim como a sua granulometria e as mudanças de fases, são de fundamental importância para evitar modificações e minimizar o de fragilização devido à formação de microestruturas frágeis, como a formação do microconstituinte M-A, um composto obtido da mistura de martensita e austenita retida que durante o resfriamento não teve tempo para se decompor em ferrita e carbonetos. A literatura relata as principais regiões, estas podem ser observadas na ZTA na figura 2.10:

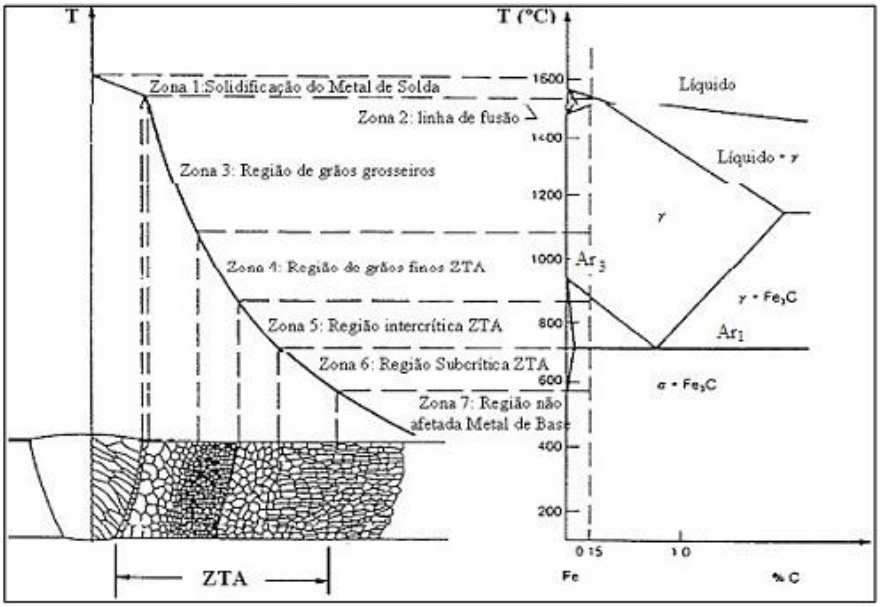


Figura 2. 10 - Zonas ou Regiões da Zona Termicamente Afetada (EASTERLING,1992)

1. Zona grãos grosseiros (ZGG);
2. Zona de granulação fina ou normalizada (ZGF);
3. Zona intercrítica (ZIC);
4. Zona subcrítica (ZSC);

Região de Granulação Grosseira (ZGG): situada junto a linha de fusão e submetida a temperaturas superiores a 1200º. Tem como característica principal o tamanho do grão austenítico devido a imposição de altos valores de ciclos térmicos. A microestrutura resultante pós soldagem desta região vai depender da composição química do metal de base, a velocidade de resfriamento, consequentemente, também na energia de soldagem empregado. Esta região é caracterizada por microestruturas ricas em martensita e bainita. É a região que requer maior atenção na ZTA, pois devido a presença destas microestruturas, pode-se ter uma região com elevada dureza e baixa tenacidade, podendo formar trincas.

Zona de Granulação Fina (Refinada) (ZGF):esta região experimenta temperaturas entre 1200º e a temperatura de A3. Possui grãos com granulometria refinada, semelhante a de um material normalizado, normalmente esta região não apresenta grandes problemas nos aços.

Zona Intercrítica (ZIC): Nesta região há a chamada transformação parcial do metal de base, pois experimenta temperaturas entre A3 e A1. Em situações particulares, como a exemplo de soldagem multipasse, microestruturas de elevada dureza pode se formar nesta região.

Zona Subcrítica (ZSC): apresenta a microestrutura do metal de base aquecida a valores inferiores da temperatura A1. Em casos específicos, como soldagem de aços tratados termicamente, pode sofrer uma super-revenimento e ocorrer a perda de resistência mecânica ou dureza em relação a sua condição inicial (metal de base).

2.5 O Refinamento de Grão na ZTA

Para a análise desta pesquisa, de posse da informação do fabricante sobre a composição química do metal de base, foram analisados o tamanho de grão e dureza para servir como ponto de partida para as análises pós-soldagem (comparação do tamanho de grão e a dureza após o processo de soldagem, além de verificação sobre efeitos sobre as propriedades mecânicas analisando as fases presentes na ZGG). Para o perfeito entendimento dos fenômenos que ocorrem para o refinamento de grão na ZTA, é preciso esclarecer como atua o fenômeno da pulsação térmica nesta região **(ZGG)**.

Na soldagem com pulsação térmica, devido a variação na penetração, era esperado que a largura da ZTA fosse constante ou maior no pulso térmico (**pt**), o que de fato não acontece e a largura é maior na base térmica (**bt**), abaixo a figura 2.11 apresenta a variação na penetração e largura da ZTA do processo MIG Duplo Pulsado:

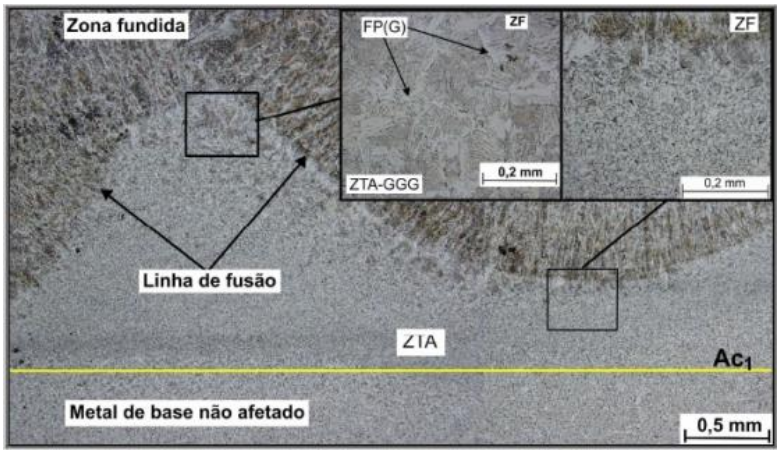


Figura 2. 11 – Efeito da Pulsação Térmica sobre a diferença de largura da ZTA adaptado de BARRA(2003).

Segundo Barra (2003), enquanto a fronteira superior da ZTA (Zona de fusão) varia ciclicamente devido as características do processo MIG Duplo pulsado (modulação do sinal de corrente e variação da velocidade de alimentação do arame), ou seja, devido a influência do calor imposto pelo período térmico, a fronteira inferior (isoterma Ac1), praticamente não altera sua posição com relação ao metal de base.

A fase de pulso, caracteriza-se por imposição de altos valores de aporte térmico e transferência metálica (devido ao nível elevado na frequência de pulsação) e a fase de base térmica caracteriza-se por um nível baixo de frequência, resultado em menores valores de aporte térmico e transferência metálica. O efeito da pulsação de corrente deverá ser percebido pela redução da espessura da ZTA (pulso térmico) e pelo tempo de retenção da temperatura de efetiva recristalização (base térmica), devido à variação entre a base e o pulso térmico (BARRA, 2003). Como consequência tem-se o alargamento da ZTA no período de base, o que pode ocasionar um maior crescimento de grão na região de grãos grosseiros (em relação ao período de pulso térmico), com o surgimento do constituinte FP(G). Isto indica que esta região experimenta por mais tempo temperaturas superiores ao eutetóide (Ac1).

Estes fenômenos explicam o reaquecimento na região de grãos grosseiros **ZGG** na base térmica (a 1100 ºC), indicando que a pulsação térmica impõe a passagem de dois pulsos sucessivos na região conforme mostrado na figura 2.9. Isto explica como esta variante pode atuar como agente de refinamento de grão, uma vez que segundo pulso térmico atua como um novo passe, provocando reaquecimento e nova nucleação de grãos, diminuindo o tamanho do grão nesta região.

Como resultado da variação cíclica do aporte térmico durante a soldagem, um maior crescimento de grãos pode ocorrer próximo ao limite de fusão, ou seja, onde possuir o maior valor da partição térmica G (ºC/mm). Quanto mais lenta a taxa de aquecimento, maior o tempo de retenção acima de Ac3 e, portanto, maior crescimento de grãos (KOU, 2003).A figura 2.12 apresenta um resumo de como se dá o processo de crescimento dos grãos para os aços em função do ciclo térmico e da partição térmica na ZTA :

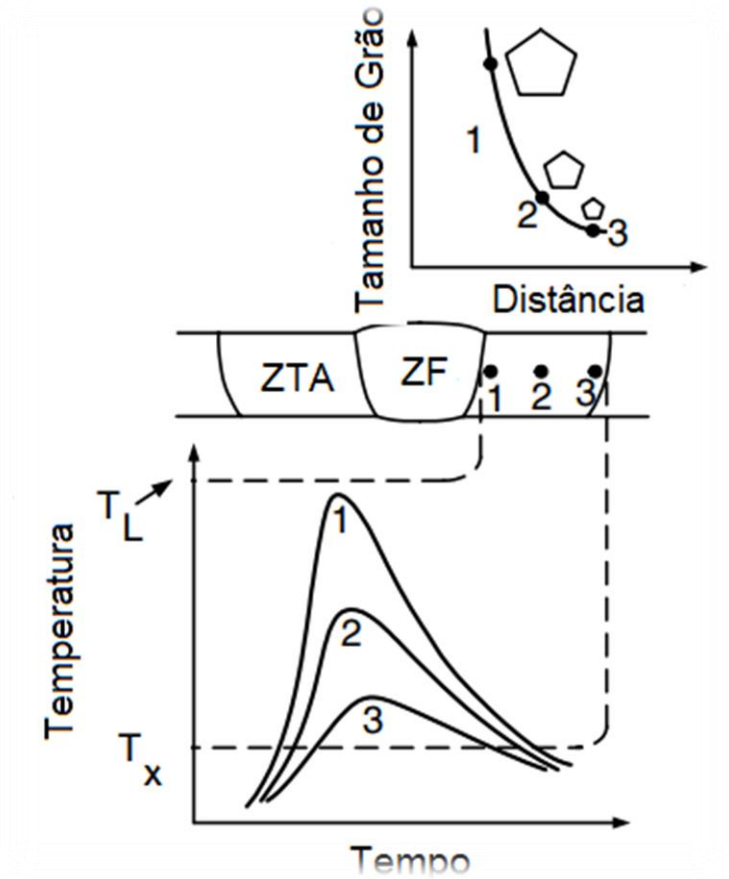


Figura 2. 12 - Gráficos Tempo x Temperatura e Tamanho de grão vs Distância na ZTA - adaptado de (KOU, 2003).

Os pontos: 1, 2 e 3 da figura 2.10, resume basicamente as três principais regiões na ZTA:

1. Região de grãos grosseiros;
2. Região de grãos refinados;
3. Região de grãos parcialmente refinados ou intercrítica;

Percebe-se ainda na figura 2.10, a evolução do tamanho de grão em função da distância desde a o metal de base até a zona de fusão.

Neste sentido, considerando que o aço API 5L X65 é constituído basicamente da microestrutura ferrita (fases claras) e perlita (fases escuras), estas microestruturas sofrem transformações ao longo dos ciclos térmicos, devido a energia de soldagem utilizada e da condição de dissipação (regime) no substrato, ocasionando o surgimento de novas fases. Uma outra forma de compreender os mecanismos de refinamento de grãos, pode ser

entendido observando-se a evolução das microestruturas desde o metal de base até a zona de fusão, conforme a figura 2.13:

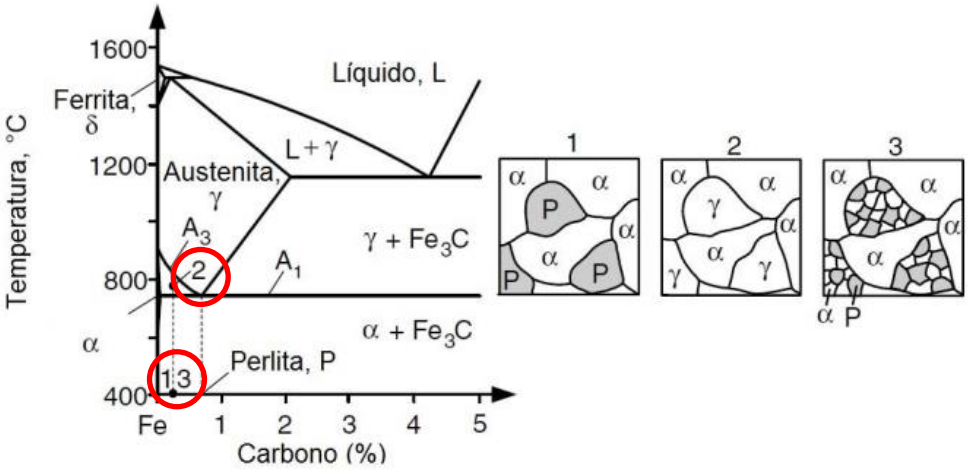


Figura 2. 13 - Mecanismo refinação parcial nos aços carbono. Adaptado de (KOU, 2003)

Sendo que:

- A região de grãos parcialmente refinados **(3),** é aquecida a uma temperatura em que a perlita (P) se transforma em austenita (Ɣ) (austenitização), no resfriamento, a austenita transforma-se em ferrita-pró-eutetóide e grãos extremamente finos de ferrita.
- A região de grãos refinados **(2)** que é submetida a uma temperatura maior, permite a nucleação da austenita, estes se decompõem em ferrita e pequenos grãos de perlita durante o resfriamento. Porém, essa distribuição não é uniforme, devido a limitação do tempo para difusão do carbono provocada pela alta taxa de aquecimento durante a soldagem, o que resulta numa microestrutura austenítica não homogênea.
- A região dos grãos grosseiros **(1)**, é submetida ao maior grau de temperatura na ZTA, a consequência disso são as condições ideais para crescimento dos grãos. A alta taxa de resfriamento e grãos de austenita consideravelmente maiores, possibilita a formação de placas laterais de ferrita nos contornos de grão, as chamadas ferrita de Widmanstätten e a FP(G). Na região mais próxima da linha de fusão (zona de ligação) este grão pode ser ainda maior.

Com base no exposto, este trabalho propõe avaliar a variante MIG Duplo Pulsado como agente de refinamento de grãos na ZTA comparando aos processos tradicionais MIG Pulsado e Convencional com passe simples.

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 Introdução

Neste capítulo, são apresentados todas as etapas e desenvolvimento das atividades experimentais, que incluem a seleção de consumíveis e parâmetros de soldagem, preparação dos corpos de prova, execução dos experimentos e acompanhamento dos dados obtidos para futuras discussões.

3.2 Materiais e Consumíveis

3.2.1 Metal de Base

O metal base utilizado na pesquisa foi o aço API 5L X65, um aço baixo-liga com grande aplicação na construção de tubulações para transporte de derivados de petróleo. A partir do metal base (proveniente de tubulações), foram usinadas chapas nas dimensões de 120x100x10mm. A escolha deste aço, foi pelo motivo de estar disponível no laboratório de soldagem da UFPB. Abaixo a tabela 2 e 3 apresentam as especificações técnicas e as composições químicas do material de acordo com o fabricante:

Tabela 1 - Composição Química do aço API 5L X65

Porcentagem (%) em massa							
C	**Mn**	**Si**	**P**	**S**	**Ni**	**Al**	**Ti+V+Nb**
0,12	1,6	0,45	0,025	0,015	0,06	0,044	0,1 Max.

Tabela 2 Propriedades Mecânicas do aço API 5L X65 (Usiminas, 2013

Limite de Escoamento (σ_{LE})	**450 ~600 MPa**
Limite de Resistência a Tração (σ_{RT})	**535~ 760 MPa**

3.2.2 Metal de Adição

O processo MIG/MAG utiliza arames contínuos e maciços, estes normalmente são protegidos por uma fina camada de cobre que além de ter boa condutividade, evita a

formação da película de óxido. O arame AWS ER70S-6 pode ser utilizado para soldagem de diversos materiais tais como: aços carbono, aços ligados, ligas de alumínio, cobre e etc. Foi utilizado o arame AWS ER70S de 1,2 mm de diâmetro, como não havia necessidade de análise da composição química do metal de solda, optou-se por utilizar um arame disponível no laboratório de soldagem da UFPB. Abaixo a composição química e nomenclatura utilizada:

Tabela 3 - Composição química do arame AWS ER70S - 6

Material	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Cu (%)
ER70S-6	0,06 – 0,15	0,80 – 1,15	1,40 – 1,85	0,025	0,035	0,5

3.2.3 Gás de Proteção

Foi utilizada uma mistura gasosa de 98% Ar + 2% CO_2 sob uma vazão de trabalho de 19 l/min para realização dos experimentos. A mistura rica em gás argônio foi escolhida, pelo motivo que esta composição (98% Ar + 2% CO_2) além de garantir uma boa proteção gasosa a poça de fusão, favorece a transferência metálica por spray.

3.3 Equipamentos

Abaixo a descrição dos equipamentos utilizados nos experimentos com o objetivo de demonstrar a execução das práticas de soldagem.

3.3.1.1 Bancada Experimental

Para realização das práticas de soldagem, foi utilizada uma fonte multiprocesso, sinérgica modelo DIGI*plus* A7. Esta fonte possui capacidade para operar com corrente máxima de 450A. Fazem parte do conjunto célula de soldagem um cabeçote de alimentação do arame modelo STA – 20D-2, uma tocha refrigerada a água, modelo MB – 501D com capacidade para utilização de diâmetros de arame entre 1 a 2,4 mm, o conjunto ainda possui uma unidade refrigeradora modelo UPR 7500. A figura 3.1 apresenta em detalhe, os equipamentos que compõem a célula de soldagem:

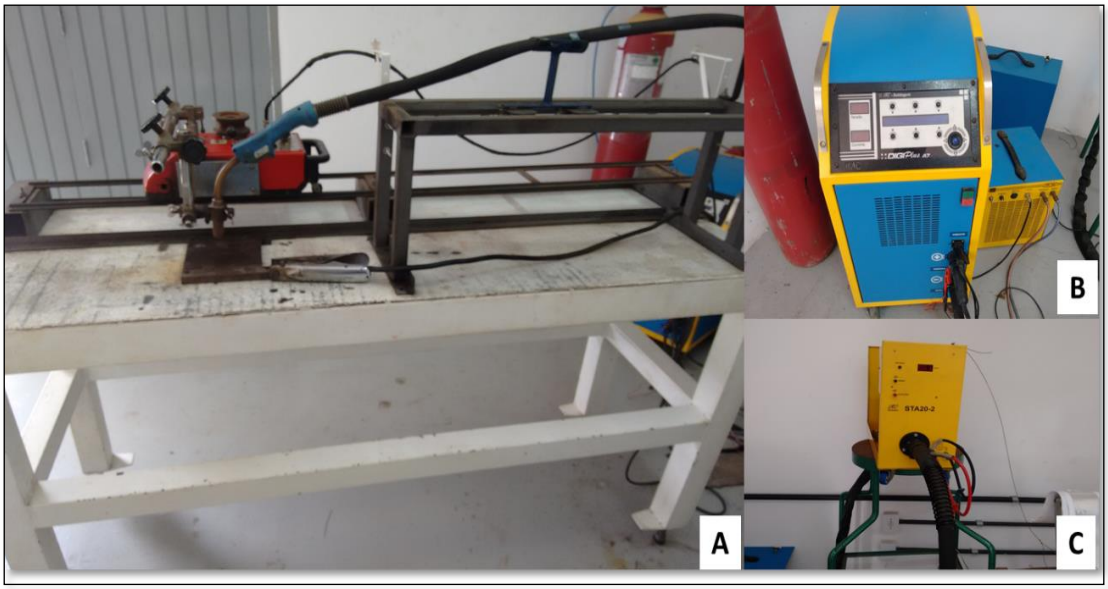


Figura 3. 1 - Bancada completa para a prática experimental: Bancada de Soldagem (A), Fonte DIGIplus e Torre de resfriamento (B) e cabeçote de alimentação do arame (C).

3.3.2 Sistema de Aquisição de dados (SAP)

O sistema de aquisição de dados utilizado foi o software comercial da IMC SAP 4.0, ilustrado na figura 3.2 . Este programa monitora em tempo real as variáveis de soldagem tais como: corrente, tensão, velocidade de alimentação do arame e vazão do gás. Possui uma interface intuitiva e permite a leitura de valores médios das grandezas analisadas.

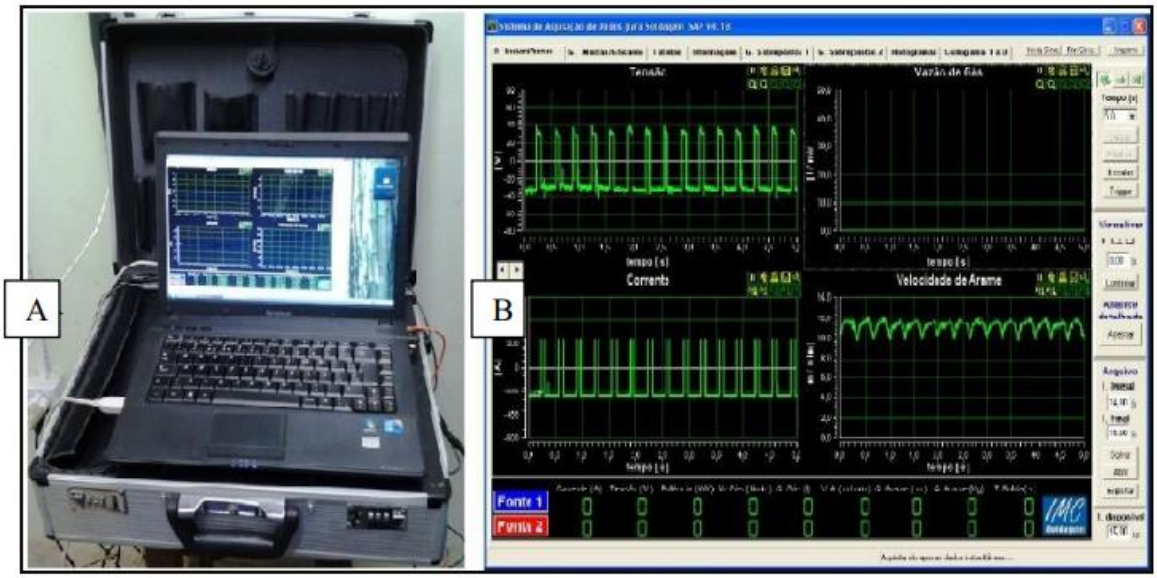


Figura 3. 2 - Sistema de aquisição de dados SAP: (A) Maleta com conjunto para conexões de sensores, (B) Gráficos do software SAP

As informações das grandezas (corrente, tensão, vazão do gás, velocidade de alimentação do arame) foram monitoradas em intervalos de 0,2s, desprezando os 05s iniciais com objetivo de coletar os dados da soldagem na condição de regime soldagem, desprezando o início e o fim do arco para não comprometer os resultados.

O sistema também foi utilizado na tentativa de assegurar através dos parâmetros de soldagem utilizados nesta pesquisa a condição de transferência metálica por spray, tendo visto o acompanhamento em tempo real dos gráficos de corrente e tensão.

3.4 Planejamento Experimental

Segundo Barros (2001), um dos problemas mais comuns para quem faz experimentos é determinar a influência de uma ou mais variáveis sobre uma outra variável de interesse. Neste trabalho, foram realizados experimentos com o objetivo de analisar o efeito de dois fatores: As variantes do processo MIG (Convencional, Pulsado e Duplo Pulsado) e Energia de Soldagem, como também seus níveis e as possíveis interações entre eles.

O Planejamento Fatorial, com réplica, foi adotado para viabilizar a análise estatística e comparar como estes fatores e seus níveis influenciam nas respostas. Reforça-se que a repetibilidade do experimento deve refletir a variabilidade do processo em toda faixa de estudo e não apenas em determinados níveis (NETO e SCARMINIO, 2001).

Avaliaram-se os seguintes fatores:

Energia de Soldagem: E1 e E2 (níveis de energia de soldagem).
Variantes dos processos MIG: C, P e DP (Corrente Convencional, Pulsado e Duplo Pulsado (Térmico).

*A ideia é manter a energia E1 e E2 em valores aproximadamente iguais para todas as condições: **E1(C1) =E1(P1) =E1(DP1)** e **E2(C2) =E2(P2) =E2(DP2)**.

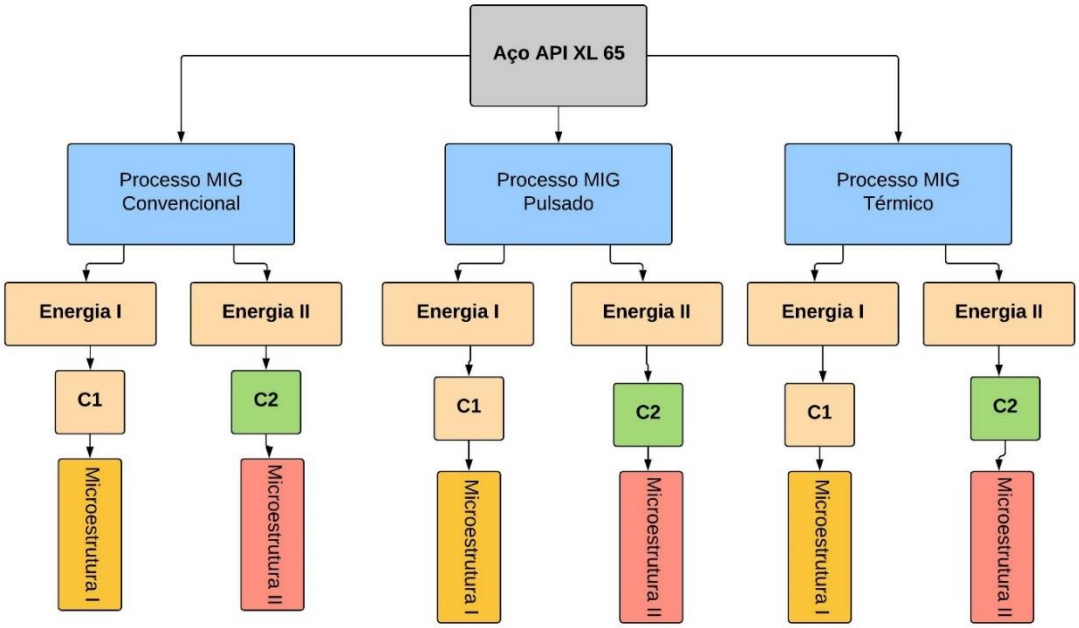


Figura 3. 3 - Esquema do Planejamento Fatorial para avaliar a microestrutura produzida na ZTA.

A análise estatística dos efeitos e interações entre estes parâmetros foram registrados. Além da repetibilidade, a aleatorização dos experimentos é outro princípio extremamente importante no planejamento fatorial. Através desta prática é possível reduzir consideravelmente que fatores indesejáveis comprometam os resultados. Portanto, tal recomendação é adotada neste trabalho.

Produzindo um planejamento fatorial completo correspondente ao produto de dois fatores, um fator de nível 2 e um fator de nível 3, totalizando 6 experimentos conforme a tabela 4. Serão realizados 1 réplica para cada grupo de ensaio totalizando 12 ensaios.

Tabela 4 - Planejamento Fatorial com Réplica

Quant.	Fatores	Níveis de variação			Total
1	Tipos de Processos	Processo MIG Convencional	Processo MIG Pulsado	Processo MIG Térmico	3
1	Energia de Soldagem	Energia de Soldagem I	Energia de Soldagem II		2
Planejamento Fatorial (PF)					$2^1 \times 3^1 = 6$

3.5 Deposição dos Cordões

Os cordões foram depositados na posição plana sobre chapas de aço API 5L X65 nas dimensões de: 100 x 120 x 10 mm. Antes do processo de soldagem as chapas foram preparadas para remover pontos de corrosão, óleos, graxas e outras substâncias contendo hidrogênio, utilizou-se solvente e escova de aço.

3.5.1 Modos de Soldagem

As variantes do processo MIG foram assim escolhidas: MIG Convencional, MIG Pulsado e MIG Duplo Pulsado (Térmico). Estes processos de soldagem foram comparados em dois níveis de aporte de Térmico: 0,65 kJ/mm e 1,3 kJ/mm, abaixo os símbolos que representam os processos nesta pesquisa:

1. Convencional (**C**)
2. Pulsado (**P**)
3. Duplo Pulsado (**DP**)

Os níveis de energia de soldagem estão assim representados:

1. Energia de Soldagem 0,65kJ/mm (**E1**)
2. Energia de Soldagem 1,3kJ/mm (**E2**)

Assim, ao decorrer deste trabalho têm-se, as possíveis combinações:

Tabela 5 - Simbologias dos modos de soldagem e suas réplicas.

Siglas	Tipo de Processo	Réplica
C1	Convencional, Energia de Soldagem 0,65kJ/mm	C1*
C2	Convencional, Energia de Soldagem 1,3kJ/mm	C2*
P1	Pulsado, Energia de Soldagem 0,65kJ/mm	P1*
P2	Pulsado, Energia de Soldagem 1,3kJ/mm	P2*
DP1	Duplo Pulsado, Energia de Soldagem 0,65kJ/mm	DP*
DP2	Duplo Pulsado, Energia de Soldagem 1,3kJ/mm	DP2*

Parâmetros Fixos Estabelecidos

- Uso de um valor fixo entre o bico de contato e a peça (DBCP) igual a 19mm;
- Ângulos de deslocamento e da tocha constantes entre 0 e 90º;
- Posição de soldagem plana, simples deposição dos cordões;
- Corrente de curto-circuito no valor de Icc = 10V.
- Tensão de curto-circuito no valor de Ucc =300 A
- A Velocidade de soldagem foi ajustada para assegurar a energia de soldagem imposta em cada condição, conforme as considerações sobre a velocidade de soldagem para cada modo a seguir.

- **Considerações sobre a escolha dos parâmetros de soldagem e testes preliminares**

De modo a simplificar a execução desta pesquisa, optou-se por seguir o modelo dos parâmetros de soldagem desenvolvido por BARRA (2003) em seu trabalho intitulado "A influência do Processo MIG/MAG Térmico sobre Microestrutura e a Geometria da Zona Fundida". Realizou-se uma etapa preliminar para possíveis ajustes caso fossem necessários, então foi realizada algumas soldagens em chapas de aço 1020 na fase de testes.

Em função dos resultados obtidos nas práticas experimentais (boa estabilidade dos processos Duplo Pulsado e Pulsado), optou-se por seguir os pacotes operacionais desenvolvidos pelo autor para o modo Pulsado e Duplo Pulsado. Para o modo Convencional, os pacotes operacionais foram obtidos através da imposição do valor da tensão (32v) e velocidade de alimentação do arame (5m/min) avaliando os gráficos de corrente x tensão através de oscilogramas (para avaliar a estabilidade do processo e a provável transferência metálica por spray) e analisando-os com um software comercial.

A energia de soldagem calculada no processo Duplo Pulsado (Térmico) nos dois níveis (E1 e E2) foram tomadas como referência para imposição nos modos Pulsado e Convencional, ajustando para cada modo o parâmetro da velocidade de soldagem para obtenção deste mesmo valor de energia de soldagem. A figura 3.4 apresenta um desses cordões testes no modo MIG Duplo Pulsado no nível de energia E2:

Figura 3. 4 - Teste em chapa de aço 1020 - Processo Duplo Pulsado E2.

A análise da estabilidade e viabilidade do processo baseou-se nas análises dos oscilogramas obtidos para cada modo de operação. A figura 3.5 apresenta um dos oscilogramas obtidos para o modo Duplo Pulsado (E1):

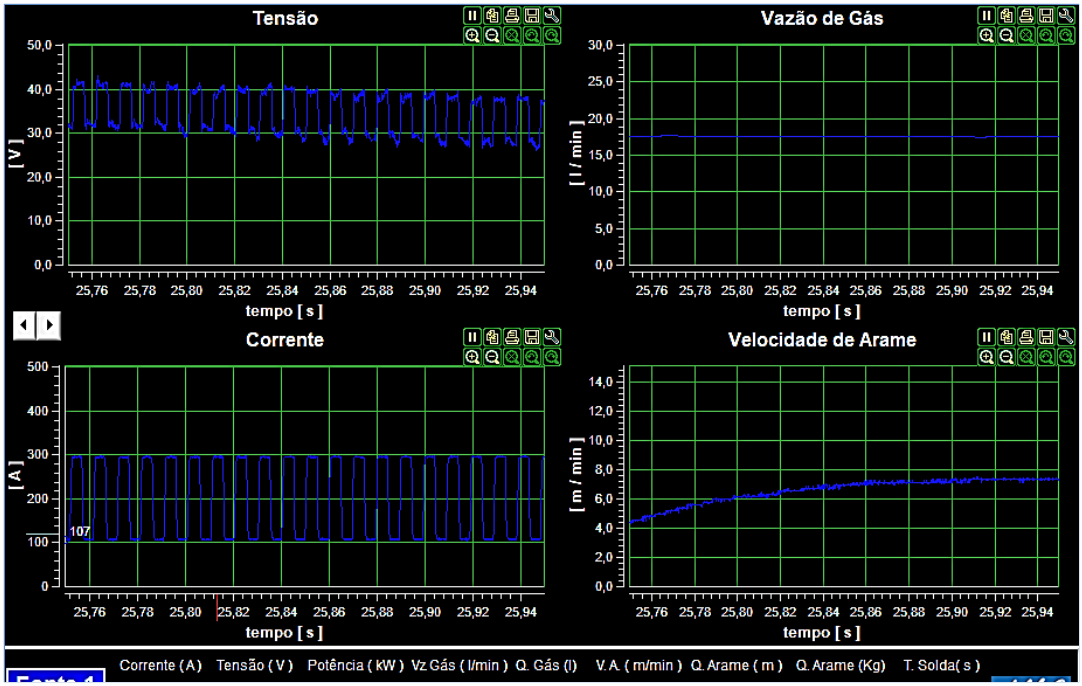


Figura 3. 5 - Oscilogramas de Corrente, tensão, velocidade de alimentação do arame e vazão do gás para o modo Duplo Pulsado.

Para o cálculo das velocidades de soldagem para cada nível de energia, foi usado um software comercial. Inicialmente foram definidas as energias de soldagem para o modo Duplo Pulsado, uma vez que, este processo é mais complexo para ser ajustado. A Tabela 6 apresenta os dados utilizados nos cálculos das velocidades de soldagem para o modo MIG Duplo Pulsado.

- Tabela 6 – Dados para cálculo das energias de soldagem para o modo MIG Duplo Pulsado e ajuste dos valores de velocidade de soldagem

Processo MIG Duplo Pulsado				
Dados de Entrada Base Térmica				
Velocidade de Soldagem (cm/min) - (cm/s)	43,84	0,73	Vel. Arame (m/min)	3
Tensão (V)	36	Corrente Imbt (A)	119,4	
Ipb(A)	300	Ibb(A	30	
Tpb (ms)	5	Tbb(A)	10,1	
Dados de Entrada Pulso Térmico				
de Soldagem (cm/min) - (cm/s)	43,84	0,73	Vel. Arame (m/min)	7
Tensão (V)	32	Corrente Impt (A)	212,0	
Ippt (A)	310	Ibpt (A	110	
Tppt (ms)	5	Tbpt(A)	4,8	
Periodo de Base Térmica	0,5	Periodo de Pulso Térmico	0,5	
Corrente Média Total (A)	170,0	Tensão Média (V)	28,3	
Energia de Soldagem (KJ/mm)	0,66			

Processo MIG Duplo Pulsado				
Dados de Entrada Base Térmica				
Velocidade de Soldagem (cm/min) - (cm/s)	21,57	0,36	Vel. Arame (m/min)	3
Tensão (V)	36	Corrente Imbt (A)	119,4	
Ipb(A)	300	Ibb(A	30	
Tpb (ms)	5	Tbb(A)	10,1	
Dados de Entrada Pulso Térmico				
de Soldagem (cm/min) - (cm/s)	21,57	0,36	Vel. Arame (m/min)	7
Tensão (V)	32	Corrente Impt (A)	212,0	
Ippt (A)	310	Ibpt (A	110	
Tppt (ms)	5	Tbpt(A)	4,8	
Periodo de Base Térmica	0,5	Periodo de Pulso Térmico	0,5	
Corrente Média Total (A)	164,0	Tensão Média (V)	28,6	
Energia de Soldagem (KJ/mm)	1,30			

Após a estabelecimento dos valores de energia de soldagem 0,65 kJ/mm e 1,3 kJ/mm no modo Duplo Pulsado, tabelas semelhantes foram criadas para os modos Convencional e Pulsado, ajustando sempre a velocidade de soldagem afim de obter valores próximos daqueles definidos no modo Duplo Pulsado, as tabelas 07 e 08 apresentam respectivamente os cálculos utilizados para os modos convencional e pulsado:

Tabela 7 - Dados para cálculo das energias de soldagem para o modo Convencional e ajuste dos valores de velocidade de soldagem

Processo MIG Convencional				
Dados de Entrada				
Velocidade de Soldagem (cm/min) - (cm/s)	56,74	0,95	Vel. Arame (m/min)	5
Tensão (V)	32,1	Corrente (I)	192,7	
Energia de Soldagem (KJ/mm)	0,65			

Processo MIG Convencional				
Dados de Entrada				
Velocidade de Soldagem (cm/min) - (cm/s)	29,1	0,49	Vel. Arame (m/min)	5
Tensão (V)	32,1	Corrente (I)	197,2	
Energia de Soldagem (KJ/mm)	1,31			

Tabela 8 - Dados para cálculo das energias de soldagem para o modo MIG Pulsado e ajuste dos valores de velocidade de soldagem

Processo MIG Pulsado				
Dados de Entrada				
Velocidade de Soldagem (cm/min) - (cm/s)	36,9	0,62	Vel. Arame (m/min)	5
Tensão (V)	25,6	Corrente Im (A)	157,5	
Ip (A)	300	Ib (A	63	
Tp (ms)	5	Tb(A)	7,1	
Energia de Soldagem (KJ/mm)	0,66			

Processo MIG Pulsado				
Dados de Entrada				
Velocidade de Soldagem (cm/min) - (cm/s)	19,67	0,33	Vel. Arame (m/min)	5
Tensão (V)	27,2	Corrente Im (A)	158,1	
Ip (A)	300	Ib (A	63	
Tp (ms)	5	Tb(A)	7,1	
Energia de Soldagem (KJ/mm)	1,31			

- Valor do comprimento do arco variando em função da forma da onda de pulsação térmica;
- Comprimento dos cordões de solda de aproximadamente 100 mm.

Em resumo:

Tabela 9 - Parâmetros fixos utilizados na pesquisa.

DBCP	Gás de Proteção	Vazão do Gás	Ângulo da Tocha
20 mm	Ar (98%) + CO_2(2%)	19 l/min	90º

3.5.2 Parâmetros de Soldagem para o Processo MIG Convencional

Os parâmetros de soldagem do processo MIG convencional tiveram como base a Energia de Soldagem calculada no processo MIG Duplo Pulsado, pois através da relação da equação 1, os parâmetros escolhidos foram construídos seguindo as recomendações dos fabricantes e práticas operacionais em laboratório.

Segundo (MACHADO, 1996), com exceção da vazão do gás, as variáveis fixas (diâmetro do eletrodo, gás de proteção) não podem ser alteradas de forma simples por isso a importância de conhecer o intervalo admissível para o eletrodo utilizado, neste caso o AWS ER70S-6 – 1,2 mm é entre 120 a 360 A e o tipo de gás recomendado para esta aplicação, no modo de transferência metálica spray será: Ar98% + 2%CO2.

Seguindo estas recomendações e através de práticas experimentais, foram selecionados os seguintes valores conforme a tabela 10:

Tabela 10 - Parâmetros de Soldagem MIG Convencional.

Metal Base: Aço API 5L X65		
Parâmetros de Soldagem MIG Convencional		
Va (m/min)	**Im (A)**	**U (V)**
5,0	192,7	32,1
Onde: Va – Velocidade de alimentação do Arame; Im – Corrente média ; U - Tensão		

Valores selecionados levando em conta as orientações dos fabricantes e os valores de energia de Soldagem que serão impostos na comparação dos 3(três) processos. Critérios como estabilidade do arco, transferência metálica, velocidade de alimentação do arame, vazão do gás utilizado foram considerados.

3.5.3 Parâmetros de Soldagem para o Processo MIG Pulsado

Diferentemente do modo convencional, no processo pulsado, é necessário um maior número de variáveis para que as condições de operações satisfatórias sejam obtidas,

isso é possível devido a utilização de fontes eletrônicas para soldagem a arco voltaico. Neste caso, a condição de transferência metálica por spray é obtida e controlada por parâmetros que garantam a condição UGPP (uma gota por pulso).

Desta forma, os parâmetros a serem ajustados antes da operação e monitorados durante a soldagem são a corrente de pulso (Ip), tempo de pulso (tp), corrente de base (Ib) e tempo de base (tb) além da velocidade de alimentação do arame e a tensão de soldagem.

A condição UGPP foi estabelecida e avaliada em tempo real através da evolução dos oscilogramas dos sinais de tensão, corrente e velocidade de alimentação do arame, técnica já validada por alguns autores em comparação com a filmagem em alta velocidade (Shadowgrafia). Abaixo foi utilizado um pacote operacional utilizado por BARRA (2003), tabela 11:

Tabela 11 - Parâmetros de Soldagem MIG Pulsado.

Metal Base: Aço API 5L X65						
Parâmetros de Soldagem MIG Pulsado						
Va (m/min)	**Ip (A)**	**Ib (A)**	**Tp (ms)**	**Tb (ms)**	**Im (A)**	**Ief (A)**
5,0	300	63	5,0	7,1	161	200
Onde: Va – Velocidade de alimentação do Arame; Ip – corrente de pulso; Ib – corrente de base; Tp – Tempo de pulso; Tb – tempo de base; Im - corrente média ; Ief – corrente eficaz						

Essa tabela com o pacote operacional foi tomada como referência para o estabelecimento dos parâmetros de soldagem do modo pulsado. O valor da velocidade de alimentação do arame Va=5m/min foi escolhido para fins de comparação, por ser a média entre as velocidades do modo Duplo Pulsado (3m/min e 7m/min na base térmica e pulso térmico respectivamente). Corridas práticas foram realizadas para a realização do ajuste fino destes parâmetros (controle da condição UGPP).

3.5.4 Parâmetros de Soldagem para o Processo MIG Duplo Pulsado (Térmico)

Esta variante do processo MIG/MAG ainda não possui uma denominação definida e adotada na literatura, por isso, é muito comum encontra-la com outras denominações: MIG MAG Térmico, MIG MAG Duplo Pulsado ou MIG MAG com Pulsação Térmica (BARRA,

DUTRA e RIBAS, 1998). Neste trabalho foi utilizada a denominação MIG Duplo Pulsado (Térmico). Os pacotes básicos operacionais para esta variante foram retirados de BARRA (2003), conforme tabela 12 abaixo:

Tabela 12 - Parâmetros de Soldagem MIG Duplo Pulsado.

Metal Base: Aço API 5L X65						
Parâmetros de Soldagem MIG Duplo Pulsado (Térmico)						
Base Térmica						
Va (m/min)	**Ip (A)**	**Ib (A)**	**tp (ms)**	**tb (ms)**	**Im (A)**	**Ief (A)**
3,0	300	30	5,0	10,1	119	174
Pulso Térmico						
Va (m/min)	**Ip (A)**	**Ib (A)**	**tp (ms)**	**tb (ms)**	**Im (A)**	**Ief (A)**
7,0	310	110	5,0	4,8	212	234
Onde: Va – Velocidade de alimentação do Arame; Ip – corrente de pulso; Ib – corrente de base; tp – Tempo de pulso; tb – tempo de base; Im - corrente média ; Ief – corrente eficaz						

O período Térmico do processo MIG Térmico **(Tt)**, corresponde a soma do período de base térmica **(Tbt)** + o período de pulso térmico **(Tpt):**

$$\mathbf{Tt = tbt + tpt}$$

Isso implica que a frequência térmica (Ft) será:

$$\mathbf{Ft = 1/Tt \text{ ou } Ft = 1/(tbt + tpt)}$$

Neste trabalho adotou-se os valores de Tbt=0,5s e Tpt=0,5s, o que resultará em Ft = 1Hz

De posse destes dados e com o objetivo de calcular a **Corrente média total (Imt)**, calculou-se a corrente média de cada fase (Pulso Térmico e Base Térmica) aplicando-se a seguinte relação para cada caso:

$$Im = \frac{(tp.Ip + tb.Ib)}{tp+tb}$$

Aplicando-se esta equação e utilizando os dados acima, têm-se:

1. Cálculo da **Impt** (Corrente média na fase de pulso térmico);

$$Impt = \frac{(tpt.Ipt + tbt.Ibt)}{tpt+tbt}$$

Substituindo pelos valores, temos:

$$Impt = (5*310 + 4,8*110)/(5+4,8) = \underline{212\ A}$$

2. Cálculo da **Imbt** (Corrente média na fase de Base térmica);

$$Imbt = \frac{(tpbt.Ipbt + tbbt.Ibbt)}{tpbt+tbbt}$$

Substituindo pelos valores da Tabela 02, temos:

$$Imbt = (5*300 + 10,1*30)/(5+10,1) = \underline{119\ A}$$

Com os valores das correntes médias da Base e Pulso Térmico, é possível calcular a **Imt** (corrente média total) substituindo os valores encontrados de **Impt** e **Imbt** e os valores de **tpt** e **tbt** conforme equação III:

$$Im_t = \frac{1}{T_t}\int_0^{T_t} I dt = \frac{1}{(t_{pt}+t_{bt})}\int_0^{t_{pt}+t_{bt}} I dt = \frac{Im_{pt}.t_{pt} + Im_{bt}.t_{bt}}{t_{pt}+t_{bt}} \qquad (3)$$

Ou seja:

$$Imt = \frac{(212*0,5+119*0,5)}{(0,5+0,5)};$$

$$\boxed{Im=165,5\ A}$$

Na realização das práticas experimentais, foram obtidos o valor da corrente média através dos gráficos dos oscilogramas do processo, o valor ficou próximo deste, **Im = 170 A**. Portanto, apenas por conveniência, usou-se a média calculada pelos gráficos, uma vez que, também foi usada o valor da tensão média obtida pela mesma ferramenta. A partir do estabelecimento do valor da corrente média é possível calcular a **Energia de Soldagem I (E1)** pela relação:

$$E = V.I/Vs$$

Onde:

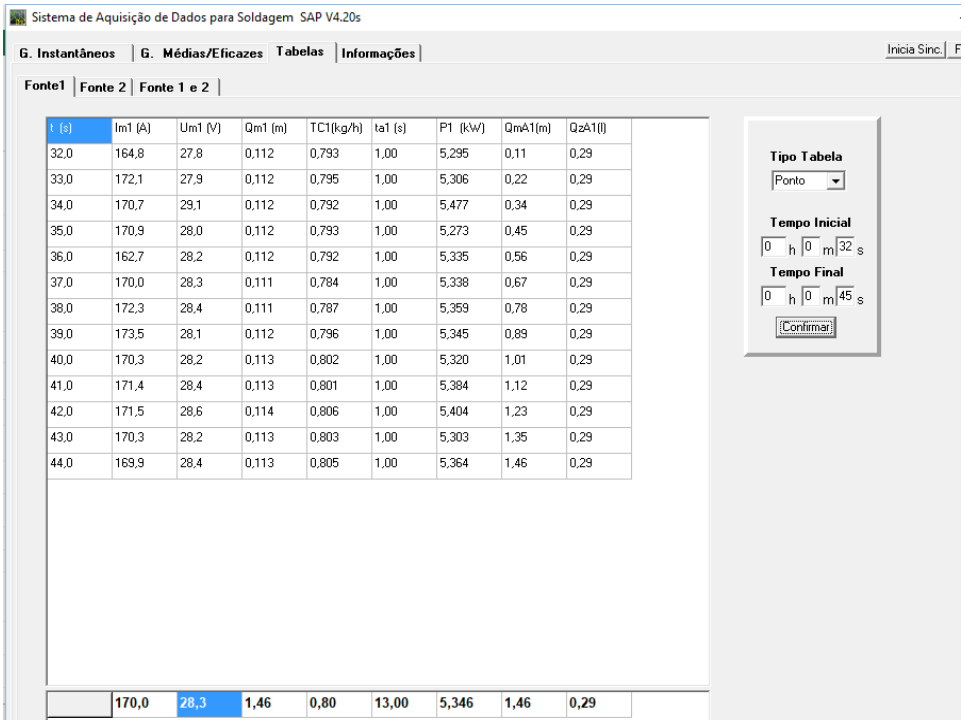
E= Energia de Soldagem em (J/m);

V= Tensão (V)

I= Corrente média (A)

Vs= Velocidade de Soldagem (m/s)

O valor da tensão média foi obtido com auxílio de oscilogramas uma vez realizados os primeiros testes de soldagem no modo Duplo Pulsado, abaixo a figura 3.6 apresenta a imagem que demonstra a média da tensão obtida através da aquisição de dados pelo software SAP 4.0:



t (s)	Im1 (A)	Um1 (V)	Qm1 (m)	TC1(kg/h)	ta1 (s)	P1 (kW)	QmA1(m)	QzA1(l)
32,0	164,8	27,8	0,112	0,793	1,00	5,295	0,11	0,29
33,0	172,1	27,9	0,112	0,795	1,00	5,306	0,22	0,29
34,0	170,7	29,1	0,112	0,792	1,00	5,477	0,34	0,29
35,0	170,9	28,0	0,112	0,793	1,00	5,273	0,45	0,29
36,0	162,7	28,2	0,112	0,792	1,00	5,335	0,56	0,29
37,0	170,0	28,3	0,111	0,784	1,00	5,338	0,67	0,29
38,0	172,3	28,4	0,111	0,787	1,00	5,359	0,78	0,29
39,0	173,5	28,1	0,112	0,796	1,00	5,345	0,89	0,29
40,0	170,3	28,2	0,113	0,802	1,00	5,320	1,01	0,29
41,0	171,4	28,4	0,113	0,801	1,00	5,384	1,12	0,29
42,0	171,5	28,6	0,114	0,806	1,00	5,404	1,23	0,29
43,0	170,3	28,2	0,113	0,803	1,00	5,303	1,35	0,29
44,0	169,9	28,4	0,113	0,805	1,00	5,364	1,46	0,29
	170,0	28,3	1,46	0,80	13,00	5,346	1,46	0,29

Figura 3. 6 - Média da Tensão obtida no modo Duplo Pulsado.

Portanto, foi utilizado o valor da tensão média de **28,3 V**. Através de testes práticos realizados, o valor da velocidade de soldagem foi ajustado para obtenção do valor de 0,65 KJ/mm, o que resultou no valor de Vs:

Vs = 7,3 mm/s

Fazendo as substituições, temos:

E1 foi calculada:

E1= (28,3 x 170) /7,3mm/s

E1= 0,659 kJ/mm

O valor da Energia de Soldagem **E1** será imposto nos três processos comparados (variável de influência), assim como para efeito de estudo (princípio da técnica de passe de revenimento) **E2**(2xE1), o valor de **E2** será: **1,3kJ/mm.**

3.6 Análises Metalográficas

Foram realizadas análises metalográficas com o objetivo de caracterizar os constituintes pós-soldagem da ZGG. Para as análises macro e microscópicas das características desta zona, foram extraídos corpos de prova localizados nos terços médios dos cordões. O objetivo deste procedimento é garantir que a amostra pertencesse a uma região do cordão já em regime (longe das extremidades) para evitar distorções nos resultados.

3.7 Preparação dos corpos de prova

O corte e seccionamento dos corpos de prova foram feitos seguindo a norma ASTM E3 (2011), utilizando máquina serra-fita refrigerada com fluido de corte e arco de serra manual. Foram dois cortes:

1. Corte de duas tiras transversais à linha de centro do cordão, com 10mm e 15mm de largura respectivamente.
2. Corte longitudinal de uma tira de 15mm para análise metalográfica e ensaio de microdureza em cada modo de soldagem.

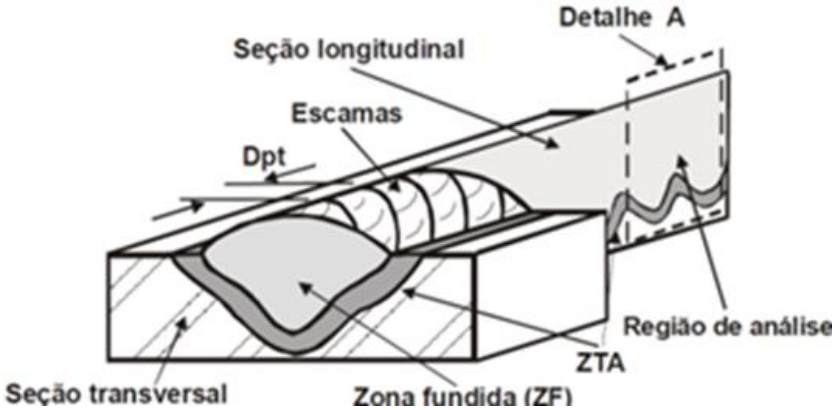


Figura 3. 7 - Detalhe da região de extração dos corpos de prova para medição das respostas de interesse, adaptado de BARRA (2003).

As imagens abaixo mostram em detalhes dos cortes das seções transversais e longitudinais respectivamente:

Figura 3. 8 – Cortes das seções transversais e longitudinais dos corpos de prova

Após extraídos os corpos de prova, o processo de preparação de amostras foi realizado seguindo também a norma ASTM E3 (2011). Foram realizados embutimentos em baquelite entre 150°C e 180°C, processo no qual não há mudança na microestrutura do metal de base. Em seguida, as amostras lixadas e polidas com ajuda de uma máquina politriz, conforme as etapas apresentadas de lixamento e polimento especificados na Tabela 13:

Tabela 13 - Preparação das superfícies para análise metalográfica.

Processo	Granulometria	Abrasivo	Lubrificante
Lixamento	80	SiC	Água
	220	SiC	Água
	320	SiC	Água
	400	SiC	Água
	600	SiC	Água
	800	SiC	Água
	1200	SiC	Água
Polimento	Pano de polimento	Alumina 0,3µm	Água
	Pano de polimento	Alumina 0,1µm	Água

Figura 3. 9 - Embutidora e lixadeira utilizadas na preparação das amostras.

3.8 Análise Macro e Microestrutural

3.8.1 Macrografias

Nesta etapa estão descritas as técnicas e procedimentos para revelação da microestrutura nas macro e micrografias segundo ASTM E407 (2007)

1. Reagente: Nital 3% (2 ml HNO_3 + 98 ml C_2H_5OH)
2. Técnica Imersão com ataque entre 10 e 15 segundos.
3. Lavagem da superfície com água corrente e álcool.
4. Secagem da superfície usando um secador.

5. Aquisição de imagens com o microscópio metalúrgico (lupa) com aumento de 10x ou 20x.

Equipamento para aquisição de imagens (macrografias).

Siglas para identificação das macrografias em função dos modos de soldagem:

<u>C1</u> – <u>20x</u>

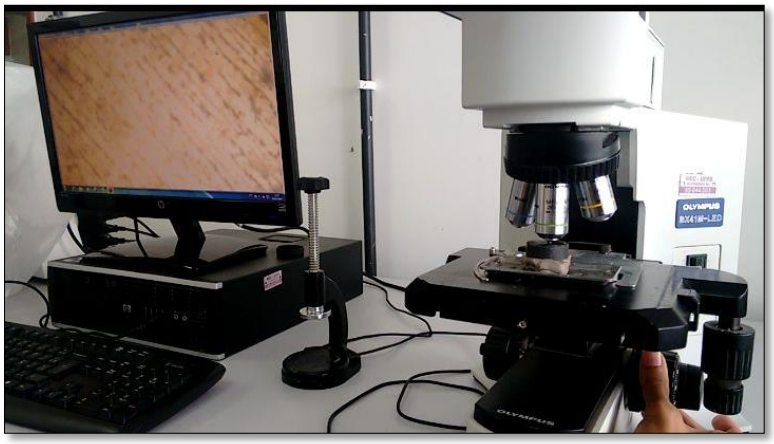
1 2 3

1. Modo de Soldagem C (Convencional), P(Pulsado) e DP (Duplo Pulsado)
2. Energia de Soldagem: 1 = 0,65kJ/mm e 2= 1,3kJ/mm
3. Ampliação da imagem

3.8.2 Micrografias

1. Reagente: Nital 2% (3 ml HNO3 + 97 ml C2H5OH)
2. Técnica Imersão com ataque entre 10 e 15 segundos.
3. Lavagem da superfície com água corrente e álcool.
4. Secagem da superfície usando um secador metalúrgico.

5. Aquisição de imagens com o microscópio ótico com aumento de 100x, 200x e 500x ou até 1000x.



Equipamento para aquisição de imagens (micrografias)

Siglas para identificação das macrografias em função dos modos de soldagem:

C1 – 3 –200x

1 2 3 4

1. Modo de Soldagem C (Convencional), P(Pulsado) e DP (Duplo Pulsado)
2. Energia de Soldagem: 1 = 0,65kJ/mm e 2= 1,3kJ/mm.
3. Ponto de Análise.
4. Ampliação da Imagem.

3.9 Análise da Geometria do Cordão

As características da geometria do cordão de solda foram realizadas através da análise das macrografias dos corpos de prova. Foram tomadas as medidas de largura (l), reforço (r), penetração (pen), Área do metal de adição ou reforço (A_r) e área de penetração ou área do metal de base (A_p) da geometria do cordão de solda (Fig. 3.10):

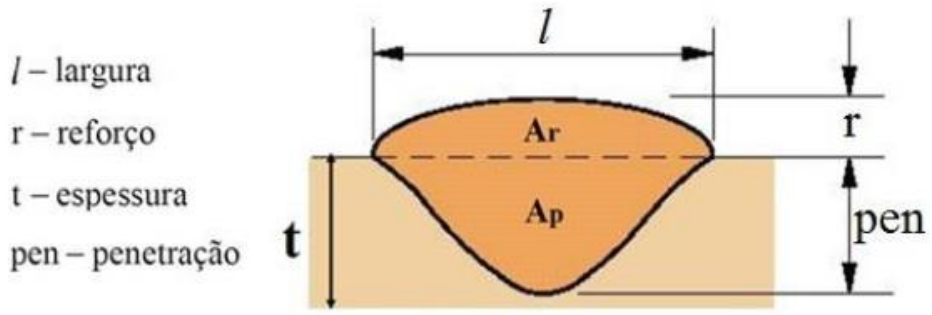


Figura 3. 10 – Representação esquemática dos parâmetros analisados na geometria dos cordões de solda.

Através dos dados obtidos das macrografias da geometria do cordão é possível os seguintes cálculos:

1.At – Área transversal total da solda = $A_r + A_p$

2. INDp – Índice de penetração = (P/t)*100%

3. D – Diluição = $(A_r/(A_p + A_r))$*100%

A medições foram tomadas para efeito de comparação nos diferentes modos das variantes analisadas na pesquisa.

3.10 Determinação do Tamanho de Grão

A determinação do tamanho de grão do metal de base foi realizada para servir de referência para as análises do tamanho de grão na região ZGG para cada modo. Após a preparação metalográfica (lixamento, polimento e ataque com reagente nital 2%) foi possível a identificação dos contornos de grão e através das orientações da norma ASTM E-112 , com auxílio do software ImageJ, realizou-se as medições do tamanho de grão pelo método dos interceptos nas regiões adjacentes aos pontos de análise da microdureza da ZTA.

A figura 3.11 apresenta esquematicamente como foram realizadas as medições do tamanho de grão no metal de base com auxílio do software ImageJ:

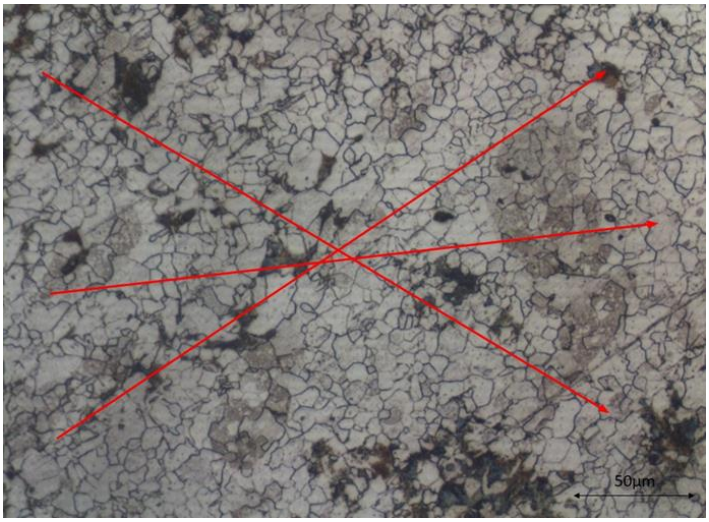


Figura 3. 11 – Representação esquemática da técnica utilizada para as medições do tamanho de grão do metal de base.

Após traçar retas de comprimentos conhecidos, foram realizadas as contagens das interseções dos grãos para cada reta e calculado desvio padrão. O tamanho médio do grão do metal de base foi então obtido.

3.11 Ensaios de Microdureza

Os procedimentos para a realização dos ensaios de dureza foram conforme a norma ASTM - E384, os ensaios foram realizados com o uso de um microdurômetro.

Figura 3. 12 - Microdurômetro marca Shimadzu utilizado nos testes

O perfil de microdureza HV1, com carga de 9,8 Newtons foi utilizado com a finalidade de relacionar os valores obtidos de dureza nos pontos determinados (1 e 2 para os modos pulsados) com as fases encontradas naqueles locais:

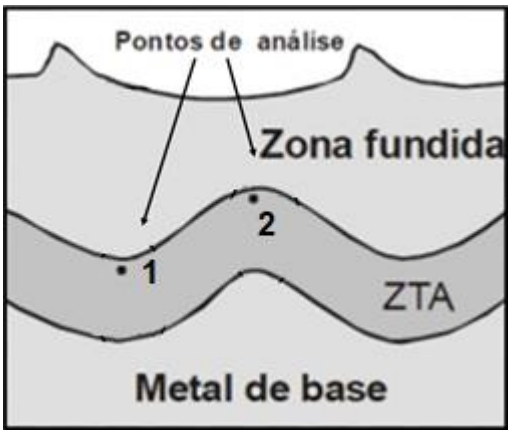


Figura 3. 13 - Pontos de análise para os ensaios de Microdureza.

Seguindo a recomendação da norma, foram realizadas três medições com espaçamento adequado, calculando-se em seguida: média aritmética e desvio padrão.

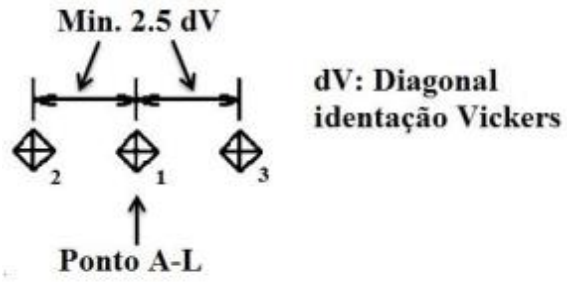


Figura 3. 14 - Representação esquemática das durezas tomadas em cada ponto de interesse. Fonte: Norma ASTM E-384.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os resultados experimentais obtidos decorrentes da utilização dos dois níveis de energia de soldagem nos três modos de soldagem MIG descritos no capítulo procedimento experimental (Convencional E1 e E2, Pulsado E1 e E2 e Duplo Pulsado E1 e E2). No primeiro momento, cada variante é comparada no aspecto visual e na análise da geometria do cordão. Avalia-se a relação de cada variante, com a energia de soldagem, nos pontos coletados de microdureza e as dimensões do tamanho de grão em cada ponto. Finalmente, o refinamento do grão na ZGG é comparado em cada modo com a devida relação com as fases encontradas.

4.1 Aspectos Visuais dos Cordões de Solda

Como descrito anteriormente, definiu-se os dois níveis de energia de soldagem utilizados nesta pesquisa (1,3 kJ/mm e 0,65 kJ/mm), com a finalidade de evidenciar na prática as diferenças macro e microestruturais dos cordões de solda. A figura 4.1 apresenta cordões depositados na posição 1G para cada variante e seu respectivo nível de energia de soldagem utilizado de acordo com a nomenclatura indicada no capítulo 3 (Procedimento Experimental), onde a indicações A, B e C correspondem aos modos em valores menores de energia de soldagem (0,65kJ/mm) para cada modo e D, E e F correspondem a alto valores de energia de soldagem (1,3kJ/mm): (A) C1 , (B) P1 ,(C) DP1 , (D) C2, (E) P2 e (F)DP2.

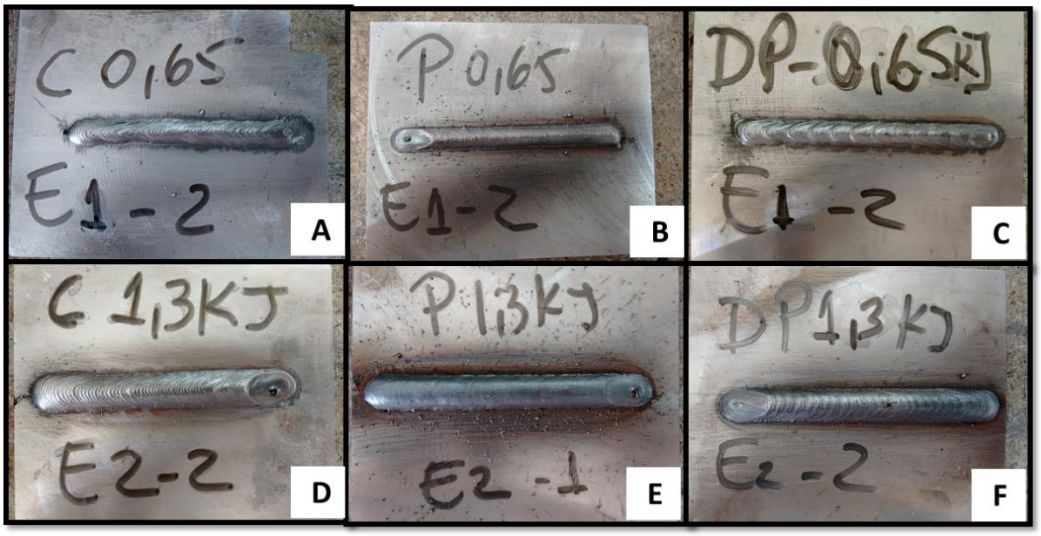


Figura 4. 1 - Cordões depositados para cada modo e respectivo nível:(A, B e C – nível E1) e (D, E e F – nível E2).

Percebe-se pela análise visual algumas das características de dimensão macro que foram confirmadas na análise da geometria do cordão. O modo Duplo Pulsado (Térmico) apresenta no aspecto visual a condição em seu cordão da aparência “escamas” na seção longitudinal devido a influência das variações conjuntas na energia de soldagem e na transferência de massa (BARRA, 1998) e na sua condição de alto energia de soldagem apresenta o menor espaçamento entre estas escamas, consequência da menor velocidade de soldagem.

Os cordões confeccionados no modo pulsado são mais largos, porém no processo foi percebido alguma incidência de respingos, este fato deve-se a corrente de curto circuito por padrão na fonte de soldagem ser de UCC = 300 A, mesmo valor da corrente de pulso do modo pulsado, gerando uma pequena instabilidade no processo.

No processo convencional, a alta velocidade de soldagem na condição de baixo energia de soldagem provocou imperfeições na largura do cordão de solda.

4.2 Análise da geometria do cordão de solda para cada modo de soldagem

Para análise da geometria do cordão de solda para o modo duplo pulsado, considerou-se os perfis obtidos por cortes longitudinais dos cordões de solda, devido a variância da penetração ocasionada pela fase de pulso térmico ou base térmica, conforme a figura 4.2 abaixo:

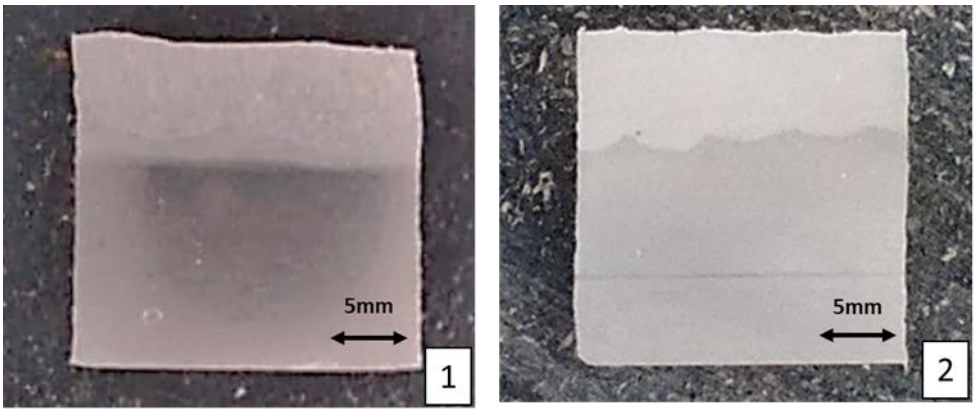


Figura 4. 2 Perfis longitudinais dos cordões 1) DP1 e 2) DP2

Para a medição da penetração nos cordões de solda nos modos Pulsado e Duplo Pulsado, considerou-se a fase de Pulso como referência para obtenção dos dados, uma vez que, na teoria, por ter o maior valor de corrente, seriam os maiores valores de penetração. Com a utilização do software ImageJ, foi possível através da análise das macrografias obtidas dos corpos de prova, realizar as medições dos parâmetros descrito na tabela 14 para cada variante e comparar com os níveis de energia de soldagem empregados na pesquisa.

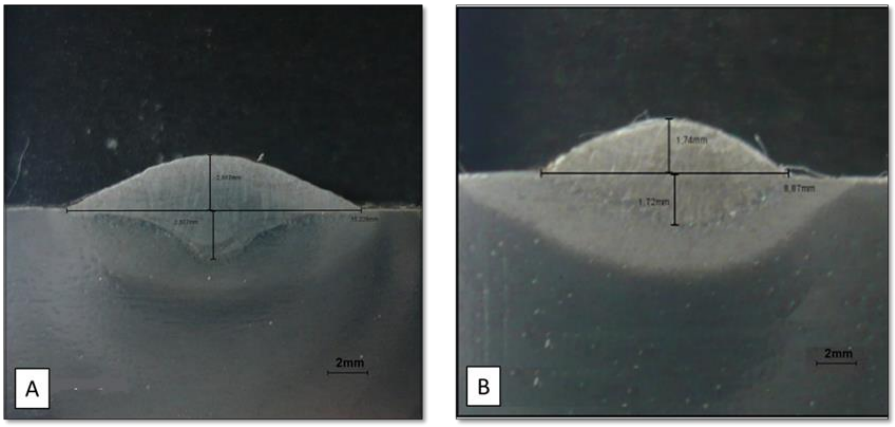


Figura 4. 3 Geometria dos Cordões de Solda modo Convencional: (A) C2 e (B) C1

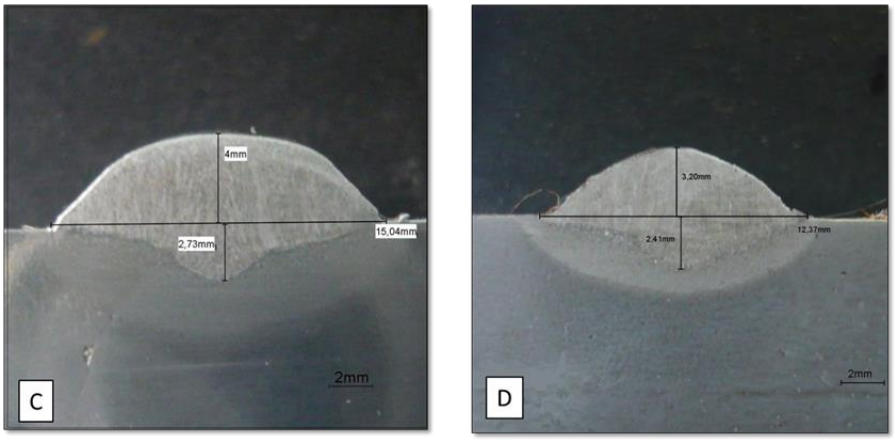


Figura 4. 4 Geometria dos Cordões de Solda modo Pulsado: (C) P2 e (D) P1

A tabela 14 apresenta os valores obtidos nas análises dos perfis de cada secção para cada modo:

Tabela 14 – Valores dos diferentes parâmetros analisados para a geometria do cordão em cada variante e o nível de energia de soldagem E1 e E2.

Processo	l (mm)	r (mm)	pen (mm)	Ad (mm^2)	Ap (mm^2)	INDp (%)	D (%)	At (mm^2)
C1	8,87	1,74	1,72	10,33	10,23	17,44	49,75	20,56
P1	12,37	3,20	2,41	23,44	14,20	32,03	37,73	37,64
DP1	10.39	2,78	1,94	19,24	10,46	27,75	35,22	29,71
C2	15,23	2,89	2,51	26,85	13,25	28,87	33,05	40,10
P2	15,04	4,00	2,73	47,61	22,39	40,00	31,98	70,00
DP2	16,38	4,14	2,857	43,237	18,14	41,35	29,56	61,38

Para uma melhor visualização e análise os dados da tabela 14, são apresentadas algumas relações na forma de gráfico nas figuras 4.5, 4.6 e 4.7:

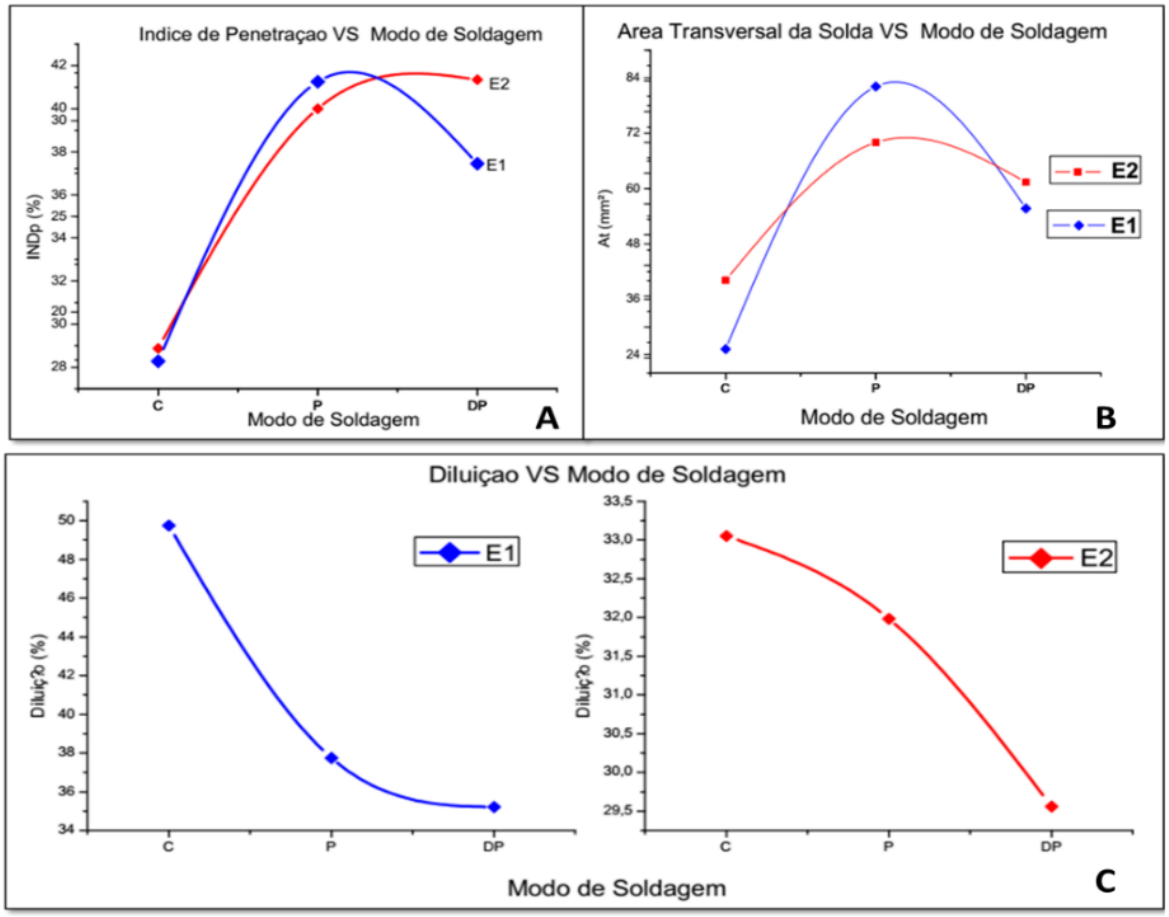


Figura 4. 5 - Gráficos dos dados geométricos do cordão vs. modo de soldagem: A – Índice de penetração , B – Área transversal total, e C – Diluição do cordão de solda.

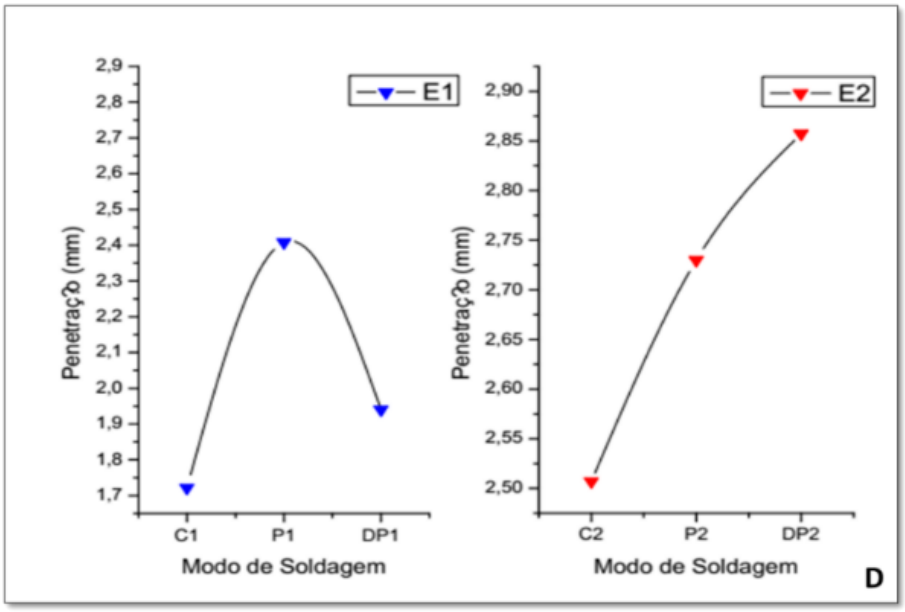


Figura 4. 6 - Gráfico: D – Penetração no Cordão de Solda (considerar a fase de Pulso térmico para modo DP) para cada modo de soldagem e níveis de Energia de Soldagem.

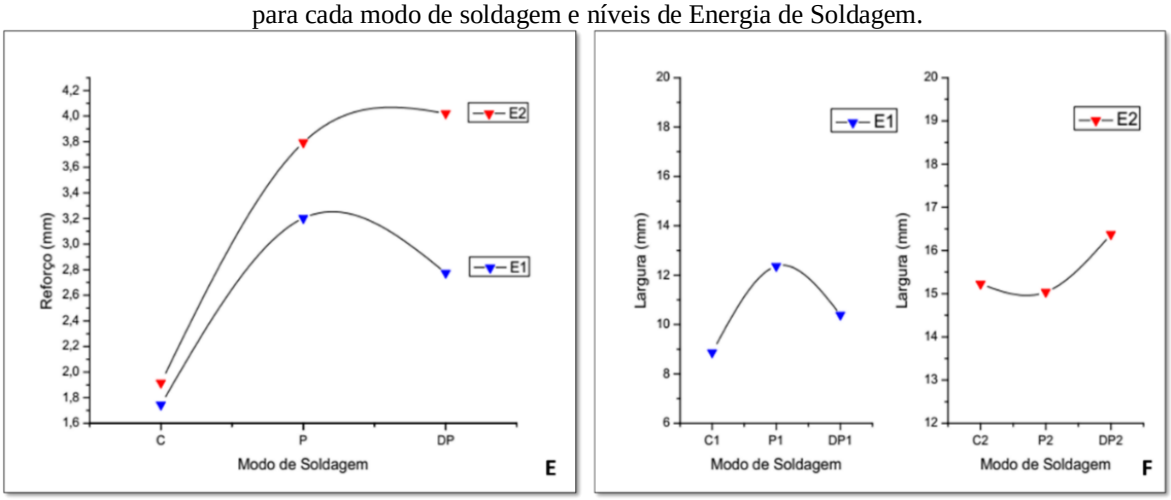


Figura 4. 7 – Gráficos :Reforço (E) e Largura dos cordões de Solda (F) para cada modo e níveis de Energia de Soldagem.

Observa-se que no gráfico da figura 4.5 apesar do modo duplo pulsado apresentar o maior valor de corrente média total na condição **E1** comparado ao Pulsado **(170,4A/157,5** respectivamente**)**, possui um menor índice de penetração, fato observado também no gráfico da figura 4.6 (Penetração). A variação na penetração já é um fato esperado na variante Duplo Pulsado, pois existe a diferença entre Imbt e Impt (corrente média na base térmica e pulso térmico), enfatiza-se que para efeito de comparação da penetração, a coleta de dados aconteceu na fase de pulso térmico, porém além disso, deve-se ao fato de que a penetração não pode ser analisada apenas pelo valor da corrente média, mas também através de outros parâmetros, um deles é a velocidade de soldagem.

Dutra, Machado e Gonzalez (2018) no trabalho “Influência da Velocidade de Soldagem e Potência do Pré-Aquecimento Indutivo Localizado Sobre a Geometria de Juntas Soldadas” reportaram que a maior velocidade de soldagem acarreta redução na penetração, isso ocorre, pois há menor energia por unidade comprimento interagindo localmente para a fusão do material a ser soldado.

Na condição de energia de soldagem E1, o modo pulsado possuía uma velocidade de soldagem de 36,90 cm/min, enquanto que o modo Duplo Pulsado possuía 43,84 cm/min, ou seja, apesar da corrente média maior, o processo DP tinha uma velocidade 16% superior, o que impactou na penetração.

Já na segunda condição (E2) apesar do modo duplo pulsado também possuir um maior valor de corrente média (**164,8A/158,1A**), os valores de velocidade de soldagem foram bem próximos 21,67cm/min (DP) e 19,67cm/min (P), por isso o gráfico apresenta índices de penetração muito próximos. Esta situação também se repete em relação a área transversal, pelo mesmo motivo explicado.

4.3 Relação microdureza x condição fabricação

Foram realizadas a medição da dureza na região da ZGG para cada corpo de prova obtidos das soldagens de cada variante: convencional, pulsado e duplo pulsado, com o objetivo de posteriormente relacionar a dureza obtida para cada variante com as fases presentes. Abaixo a tabela 15 apresenta as durezas obtidas na região ZGG para cada modo:

Tabela 15 – Valores de Dureza na Região de Grãos Grosseiros para cada variante e seu nível de energia de soldagem E1 e E2.

	Valores de Dureza para a Região ZGG em cada Variante				
	Medição 1 (HV)	Medição 2(HV)	Medição 3(HV)	**Média**	Desvio P
C1	254,0	251,0	270,0	**258,3**	10,2
P1	263,0	264,0	257,0	**261,3**	3,8
DP1	272,0	274,0	265,0	**270,3**	4,7
C2	234,0	233,0	239,0	**235,3**	3,21
P2	241,0	234,0	234,0	**236,3**	4,0
DP2	233,0	239,0	244,0	**238,7**	5,5

Segundo Cardins, Silva, *et al.*(2018) a variação de um parâmetro de soldagem como a energia de soldagem e o tamanho de grão, pode acarretar no aumento ou diminuição dos valores das propriedades mecânicas, como a tenacidade e a dureza. Os valores de alto energia de soldagem (E2) em cada modo de soldagem, diminuiram a dureza da região da ZTA, pois o alto valor de energia de soldagem, viabilizou possivelmente uma menor taxa de resfriamento. A figura 4.8 apresenta esquematicamente o gráfico da Dureza vs Ponto de Análise (região ZGG) no dois níveis de energia de soldagem.

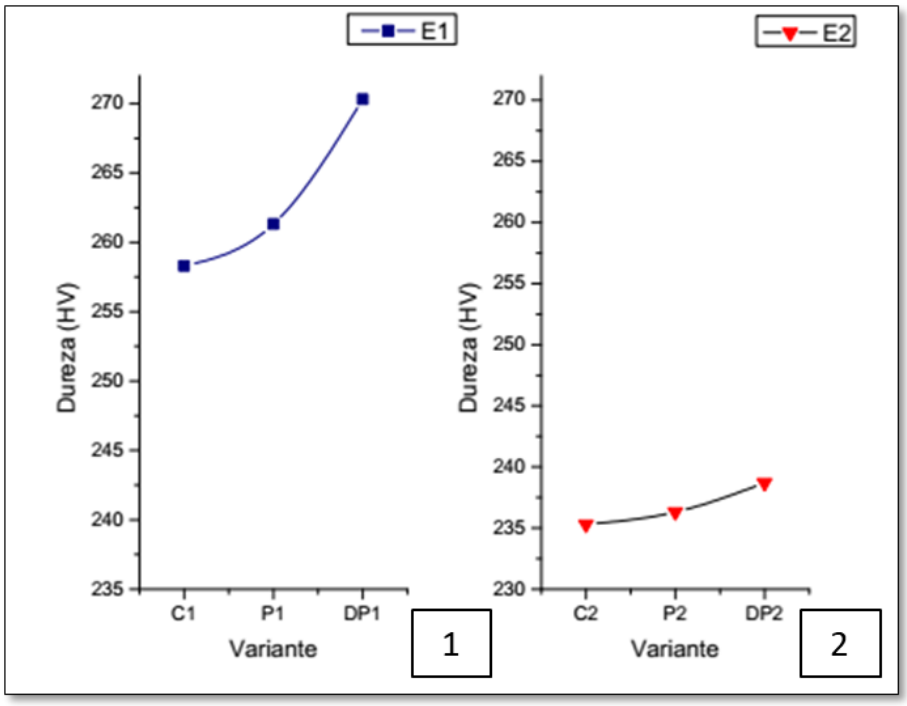


Figura 4. 8 - Gráfico da Dureza VS Ponto de Análise para cada modo de soldagem nos níveis: (1) E1 e (2) E2.

Em seu trabalho, Almeida (2014) afirma que a dureza na região dos grãos grosseiros na ZTA é bastante influenciada pelo energia de soldagem, nessa região os valores de temperaturas provocam mudanças na microestrutura e no tamanho de grão, e consequentemente, variando a dureza.

Neste trabalho, a maior energia de soldagem (E2) reduziu os valores de dureza no modo convencional, pois este processo possui os grãos mais grosseiros, isto está convergente com a explicação anterior, pois na maior energia o grão cresce e o efeito desta diminui, provocando uma menor dureza. A dureza aumenta nos modos Pulsado e Duplo Pulsado, e estes modos mais uma vez apresentam similaridade nos resultados, prevalecendo nos dois níveis (E1 e E2) o modo Duplo Pulsado com maior valor de dureza.

4.4 Tamanho e refinamento do grão na ZGG

Neste tópico, será discutido os resultados sobre as medições do tamanho e refinamento de grão pela variante Duplo pulsado na região de grãos grosseiros ZGG. A influência dos dois níveis de energia de soldagem adotados nesta pesquisa no tamanho do grão foram avaliadas baseadas nas análises de micrografias obtidas nos corpos de prova para cada nível de energia.

Após coletados os resultados de dureza na ZGG para cada variante, foram realizadas as medições do tamanho de grão nesta região, afim de relacionar a dureza vs tamanho de grão e posteriormente com as fases presentes. A figura 4.9 apresenta esquematicamente os pontos de análise na ZGG do modo Duplo Pulsado:

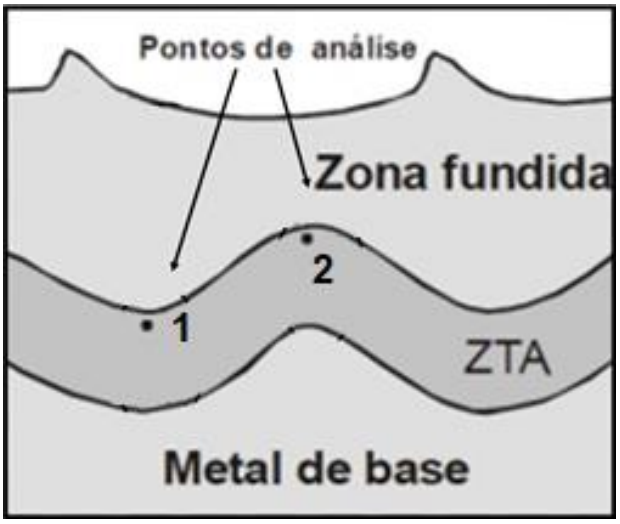


Figura 4. 9 - Pontos de análises do tamanho de grãos na ZGG.

Por sua particularidade, o processo duplo pulsado pode apresentar diferenças na dureza e tamanho de grãos na regiões ZGG, como explicado na fundamentação teórica. Com o auxílio do software ImageJ e baseado na norma ASTM E-112, foram realizadas as medições dos tamanhos de grãos na ZGG, calculando a média e desvio padrão para cada modo de soldagem. Não foram encontradas diferenças significativas entre os tamanhos de grãos na fase de pulso e base térmica.

As tabelas 16 e 17 apresentam esquematicamente os valores obtidos na determinação do tamanho de grão desde o metal de base:

Metal de Base

Tabela 16 - Tamanho de grão do Metal de BasE

Tamanho (µm)	DP
9,7	**0,27**

Tabela 17 – Valores de tamanho de grãos na ZGG para cada variante e seu nível de energia de soldagem.

Medição dos Tamanhos de Grãos para a Região ZGG em cada Variante

	Medição 1 (µm)	Medição2 (µm)	Medição 3 (µm)	**Média**	Desvio P
C1	18,18	18,18	18,18	**18,18**	0
P1	16,66	18,18	18,18	**17,68**	0,87
DP1	15,38	15,38	15,38	**15,38**	0
C2	20,0	18,18	22,22	**20,13**	1,05
P2	18,18	18,18	22,22	**19,53**	2,02
DP2	16,66	20,0	18,18	**18,28**	1,68

A Figura 4.10 apresenta os gráficos do tamanho de Grão vs Ponto de Análise (região da ZGG) nos dois níveis de energia de soldagem para cada modo.

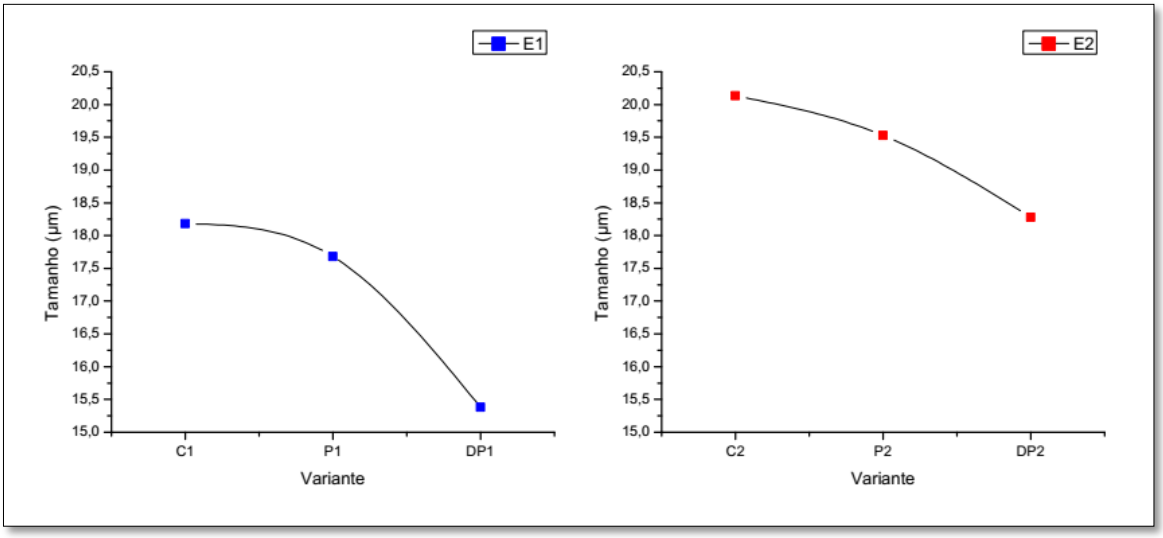


Figura 4. 10 – Representação esquemática do tamanho de Grão vs Ponto de Análise nos dois níveis de energia de soldagem para cada modo: (1) E1 e (2) E2.

Através da figura 4.11, é possível comparar o tamanho de grãos entre as variantes e cada modo:

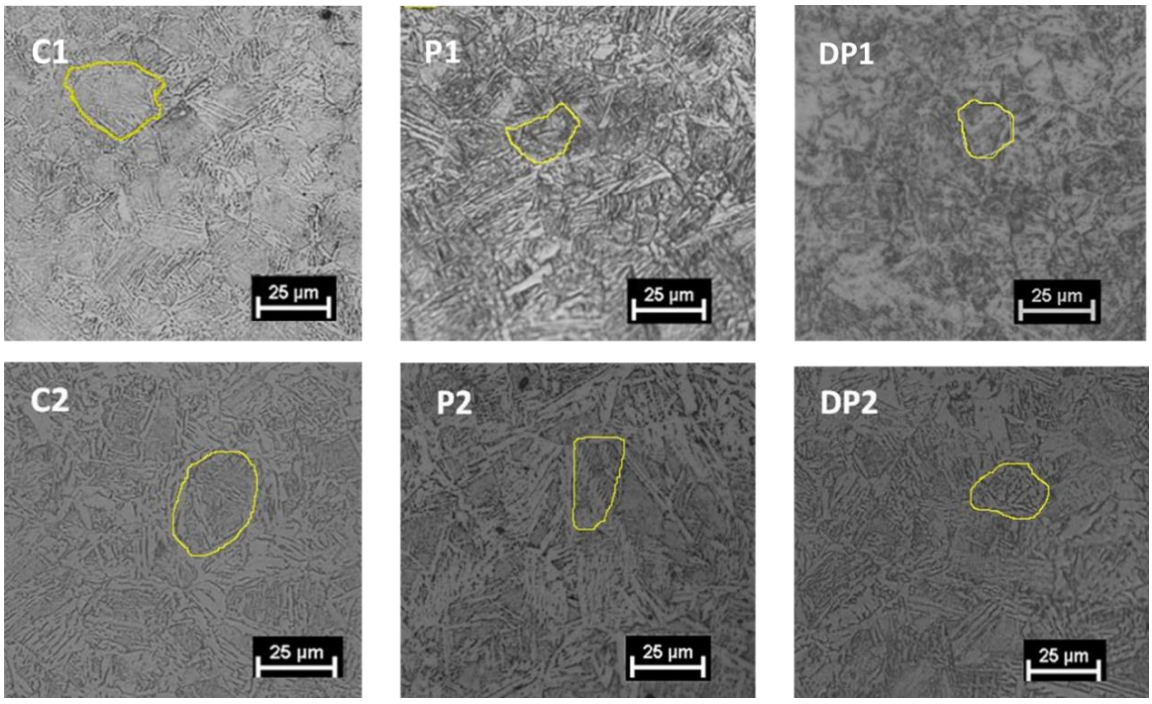


Figura 4. 11 – Comparação dos tamanhos de grão na ZGG para cada variante nos níveis E1 e E2.

Se tomado como referência o metal de base e a partir deste, comparando com os tamanhos de grãos obtidos para cada variante na ZGG (convencional, pulsado e duplo pulsado), observa-se que o grão sofre um processo de crescimento, variando o seu tamanho em cada modo analisado. Em seus estudos os autores (AKSELSEN, GRONG e SOLBERG, 1987) e (HARRISON e FARRAR, 1989) entre outros, afirmam que na zona de grãos grosseiros, o crescimento do grão é o maior problema. Além do tamanho do grão, as fases presentes nesta região, ajudam a identificar possíveis degradações das propriedades mecânicas e justificam os valores de dureza encontrados. Nas figuras 4.12. 4.13 e 4.14, é possível visualizar algumas fases de acordo com a nomenclatura do I.W.W:

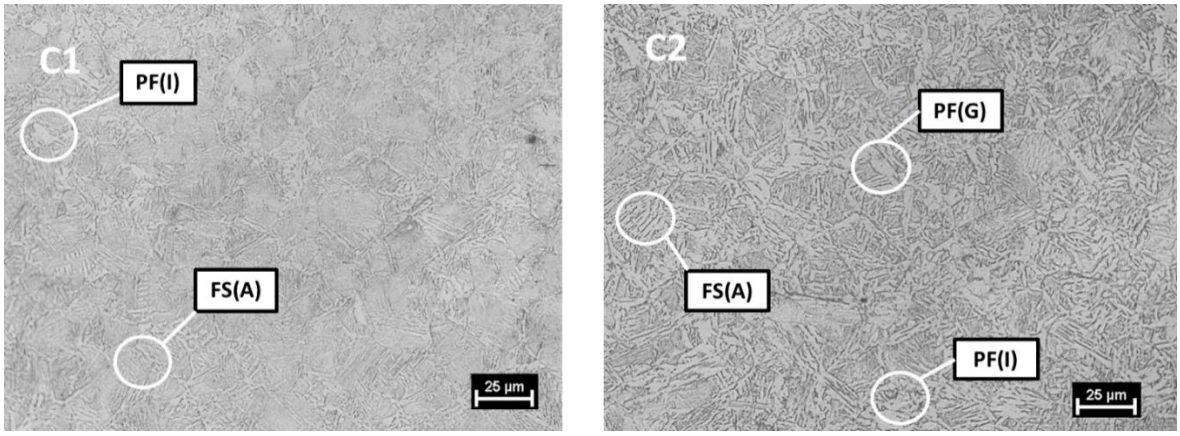


Figura 4. 12 – Constituintes encontrados no modo Convencional (C1 e C2): ferrita primaria intragranular PF(I), ferrita secundaria de fase alinhada FS(A) e ferrita primaria de contorno de grão PF(G).

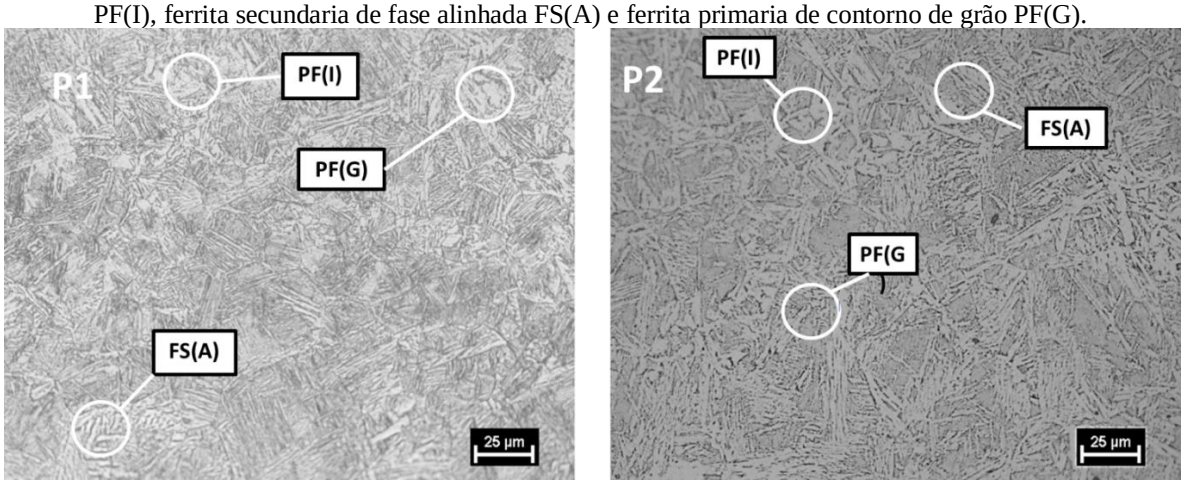


Figura 4. 13 - Constituintes encontrados no modo Pulsado (P1 e P2): ferrita primaria intragranular PF(I), ferrita secundaria de fase alinhada FS(A) e ferrita primaria de contorno de grão PF(G).

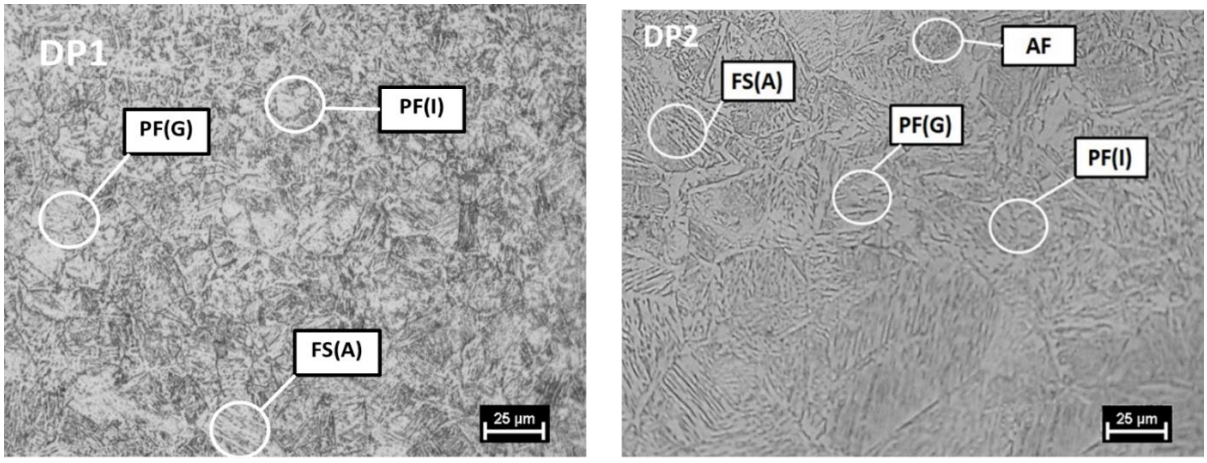


Figura 4. 14 - Constituintes encontrados no modo Duplo Pulsado (DP1 e DP2): ferrita primaria intragranular PF(I), ferrita secundaria de fase alinhada FS(A), ferrita primaria de contorno de grão PF(G) e ferrita acicular.

Com o objetivo de realizar uma análise qualitativa dos constituintes encontrados para cada modo, principalmente no nível de alto aporte de energia (E2), micrografias através da técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foram coletadas dos pontos de

análise desta região para analisar com mais detalhes as prováveis fases presentes. As figuras 4.15 apresentam estas micrografias.

Pode-se observar que as variantes do processo MIG (Convencional, Pulsado e Duplo Pulsado) foram afetadas na microestrutura devido ao tipo de variante e o nível de energia, em comparação ao metal de base (estrutura ferrítica e perlítica) e também quando comparado cada variante.

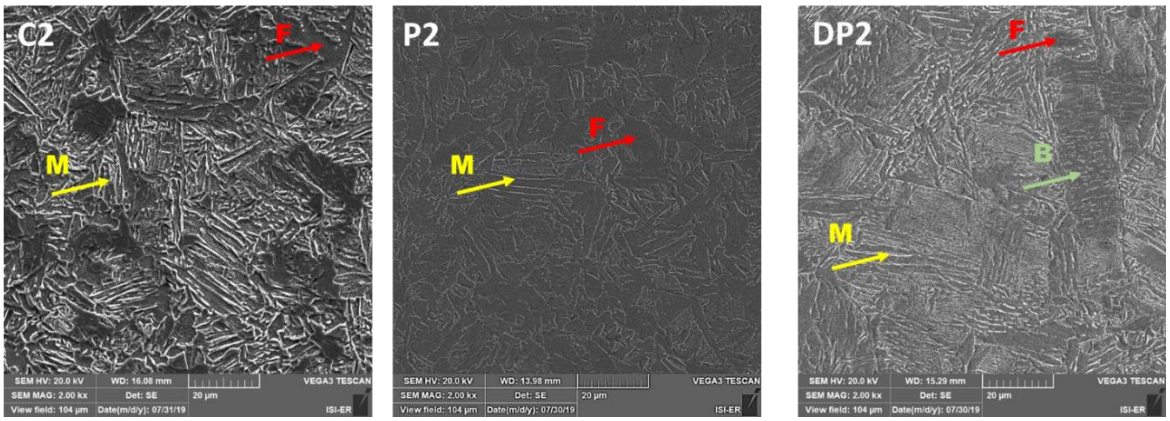


Figura 4. 15 - Micrografias obtidas na região dos grãos grosseiros da ZTA para cada modo no nível E2: (M) Martensita, (F) Ferrita e Bainita (B).

A variante Convencional possui o maior tamanho de grão nos dois níveis de energia e menor dureza. De fato, segundo Harrison e Farrar (1989) um maior crescimento do grão austenítico produz um decrescimento na tenacidade.

No modo Pulsado, houve um menor tamanho de grão em relação ao modo convencional, estes grãos apresentaram maiores valores de dureza, isso deve-se as micrografias possuírem uma matriz puramente ferritica menor que o modo convencional, apresentando microconstituintes na região dos grãos grosseiros tais como: ferrita, martensita, possível bainita e agregados eutetóide.

No Duplo Pulsado (Térmico), os grãos apresentaram o menor tamanho (melhor refinamento) em comparação aos dois outros modos, porém também a maior dureza, em resumo: o grão obtido seja ferrítico ou perlítico é mais grosseiro no modo Convencional, é cada vez menor no modo Pulsado e no modo Duplo Pulsado (Térmico) obtém-se o grão mais refinado (HINCAPIÉ, 2015). Percebe-se um indicativo de menor matriz puramente ferrítica da região de grãos grosseiros na variante Duplo Pulsado, o que explica os maiores valores de dureza.

Nesta região as micrografias obtidas através do MEV sugerem que estão presentes principalmente nas micrografias do modo DP2 microconstituintes como: ferrita, martensita (em frações menores) e possível bainita.

Segundo Alburqueque, Maciel, *et al.* (2011) microestruturas formadas por ferrita, bainita e martensita, devem apresentar melhores valores de resistência e tenacidade quando comparada com a microestrutura com predominância de ferrita, sendo necessário a medição da tenacidade nesta região a fim de comprovar esta análise qualitativa.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

5.1. Conclusões

Após analisar os resultados obtidos nesta pesquisa para cada variante e os dois níveis de energia de soldagem empregados, pode-se concluir que:

- Os parâmetros utilizados para cada modo de soldagem e os níveis de energia geraram cordões de solda com bom acabamento superficial e ótima estabilidade durante o processo.

- O modo de soldagem Duplo Pulsado (Térmico) apresentou em seu aspecto visual no cordão a aparência "serrilhada" devido a influência das variações conjuntas na energia de soldagem e na transferência de massa e na sua condição de alto energia de soldagem apresentou a maior largura do cordão.

- Os cordões confeccionados no modo pulsado no nível E1 foram mais largos. No processo convencional, a alta velocidade de soldagem na condição de baixo energia de soldagem provocou imperfeições na largura do cordão.

- O índice de penetração obtido no processo de soldagem MIG Duplo Pulsado no nível E1(fase de pulso térmico) foi inferior ao modo Pulsado, apesar de possuir um valor de corrente média total maior, isso deve-se ao fato de que no modo Duplo Pulsado, a soldagem foi realizada com uma velocidade de soldagem 16% maior que no modo Pulsado, devido a isto houve uma maior interação efetiva entre energia de soldagem x unidade de comprimento e este fato foi determinante para o resultado na penetração de solda, uma vez que, ao decorrer da execução da solda, o modo pulsado permaneceu mais tempo em contato com metal de base.

- Os valores de microdureza obtidos nas análises dos corpos de prova, para cada modo, permitem inferir que há variação na dureza com o aumento de energia de soldagem e em cada mudança de modo de soldagem (C, P e DP), consequência da mudança da taxa de

resfriamento para cada variante. O processo convencional possui uma menor dureza e esta aumenta à medida que compara-se com o Pulsado e o Duplo Pulsado.

- O processo MIG Convencional apresentou um maior tamanho de grão grosseiro na ZGG nos dois modos em comparação com os modos pulsados. As micrografias sugerem que uma taxa de resfriamento menor nesta condição. O grão grosseiro maior aliado a fase encontrada (ferrita PF(G)) pode ser um indicativo de fragilidade na tenacidade à fratura dos aços.

- No processo MIG Pulsado, observou-se um menor tamanho de grão em relação ao modo convencional, onde o material produzido apresentou maiores valores de dureza. Isso, pode estar correlacionado com o menor percentual de matriz puramente ferrítica da estrutura, quando comparado ao material obtido pelo modo convencional, apresentando microconstituintes na região dos grãos grosseiros, tais como: ferrita, martensita e possivelmente bainita.

- O Processo Duplo Pulsado, mostrou-se eficiente no refinamento do grão com um menor tamanho de grão nos dois níveis de energia de soldagem utilizados em relação aos demais modos analisados. Além disso, as microestruturas obtidas através da MEV indicam que estão presentes principalmente nas microestruturas dos materiais obtidos pelo modo DP2 microconstituintes como: ferrita, martensita (em frações menores), ferrita acicular e possivelmente bainita.

- A variante MIG Duplo Pulsado (Térmico) foi o processo de soldagem que apresentou um melhor desempenho no refinamento de grãos da ZTA entre os modos de soldagem testados nesta pesquisa, visto a obtenção de menores tamanhos de grão na região de grãos grosseiros (ZGG), bem como aliada a microestrutura encontrada nesta região, podem indicar menor impacto nos valores de resistência e tenacidade do material.

5.2. Sugestões para Trabalhos Futuros

- Refazer a pesquisa nos níveis de energia de soldagem empregados com os mesmos modos de soldagem, porém realizar o ensaio de Charpy afim de verificar a tenacidade da solda obtida na ZTA;
- Avaliar e comparar os modos de soldagem em diferentes níveis de energia de soldagem garantindo a transferência metálica através da utilização do recurso de Shadowgrafia (filmagem da transferência metálica);
- Avaliar e comparar os processos de soldagem convencionais com o modo Duplo Pulsado em diferentes misturas de proteção gasosa.

REFERÊNCIAS

AKSELSEN, O. M.; GRONG, O.; SOLBERG, J. K. **Structure-property relationships in intercritical heat affected zone of low-carbon microalloyed steels**. [S.l.]: [s.n.], v. 3, 1987. 649-655 p.

ALBUQUERQUE, S. F. et al. Avaliação da Microestrutura e Propriedades Mecânicas de Metais de Solda Obtidos por Processos de Soldagem. **Soldagem e Inspeção**, São Paulo, v. 16, n. 4, p. 322-332, Out/Dez 2011.

ALÉCIO, R. D. A. **Estudo da Relação Microestrutura/Propriedades Mecânicas de Sub-Regiões de Zonas Termicamente Afetadas - ZTAs do Aço API 5L X80**. Recife - PE, p. 88. 2015.

ALMEIDA, J. G. D. **Análise da Influência do Hidrogênio na Influência do Hidrogênio na Tenacidade Quase Estática de Juntas Soldadas de Aços ARBL**. UFPB. João Pessoa - PB, p. 230. 2014.

AMARAL, E. C.; MARIA, C. R.; BRANDÃO, L. P. M. Influência dos parâmetros de Pulso na Microestrutura e Perfil de Dureza na Soldagem de Ligas de Aluminio pelo Processo MIG Superpulso. **Revista Militar de Ciência e Tecnologia**, p. p42-56., 2012.

ASTM. **E3**. West Conshohocken - USA: [s.n.], 2011.

ASTM, I. **E112-12**. West Conshohocken - USA: [s.n.], 2012.

BARBEDO, N. D. D. **Avaliação Comparativa dos Processos de Soldagem GMAW e FCAW utilizando aço ASTM A-36 para Verificar a Soldabilidade, propriedades metalurgicas e geométricas.** Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, p. 82p. 2011.

BARRA, S. R. **Influência do Processo MIG/MAG Térmico sobre a Microestrutura e a Geometria da Zona Fundida**. Tese de Doutorado. Florianópolis, p. 248p. 2003.

BARRA, S. R. Os Efeitos da Pulsação Térmica na Soldagem MIG/MAG. **Corte & Conformação de Metais**, p. p98-125., 2008.

BARRA, S. R.; DUTRA, J. C.; RIBAS, F. A. C. **Avaliação dos Efeitos da Variação dos Parâmetros/Procedimentos de Soldagem e Automação sobre Planicidade e Aspecto Superficial dos Revestimentos Empregados em Turbinas Hidráulicas**. Fortaleza, p. 9p. 1998.

BATISTA, L. A.; MODENESI, P. J. Aplicação de CaCO3 e SiO2 como fluxo na soldagem MIG e seu Efeito na Transferência por Queda Livre. **Soldagem & Inspeção**, p. 448-459p, 2018.

BATISTA, V. R. et al. Efeito dos parâmetros de soldagem sobre a geometria e diluição revestimentos de liga de níquel aplicados em aço API 5L Gr B. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, Campina Grande - PB, n. v.6.3, p. 182-187, out. 2011.

BRACARENSE, A. Q. Gas Metal Arc Welding. **Infosolda**, 2003. Disponivel em: <https://infosolda.com.br/wp-content/uploads/Downloads/Artigos/processos_solda/gas-metal-arc-welding.pdf>. Acesso em: jul. 2019.

BRITO, U. H. D. O. D. et al. **Equacionamento do Processo MIG/MAG Pulsado para o Arame-Eletrodo ER70s6 de Aço Carbono como Material de Adição**. UFSC. Florianópolis, p. 9p. 2018.

BRITO, V. L. O. D.; NUNES, C. A.; BARBOSA, C. H. **Evolução dos aços para tubos API utilizados no transporte de óleo e gás**. Congresso Brasileiro de Engenharias e Ciência dos Materiais. São Pedro - SP, p. 14. 2000.

CARDINS, A. S. C. et al. **Relação entre a Energia de Soldagem, Tenacidade e Dureza na Zona Termicamente Afetada pelo Calor do aço Estrutural**. UFERSA. Mossoró - RN, p. 6053-6063. 2018.

CHILQUE, D. S. A. R. A. et al. **Determinação da resistência ao impacto da região de grão grosseiro da ZTA do aço API 5L X80 soldado em condições de alta energia**. UEMG; CONSOLDA 2014. São Paulo, p. 9p. 2014.

DEARDO, A. J. Multiphase microstructures and their properties in high strength low. **ISIJ International**, v. 5, n. 8, p. 946-954, 1995.

DUTRA, W. T.; MACHADO, I. G.; GONZALEZ, A. R. Influência da Velocidade de Soldagem e Potência do Pré-Aquecimento Indutivo Localizado Sobre a Geometria de Juntas Soldadas. **Revista Militar de Ciência e Tecnologia**, p. p10-14, 2018.

DUTRA, W. T.; MACHADO, I. G.; GONZALEZ, A. R. Influência da Velocidade de Soldagem e Potência do Pré-Aquecimento Indutivo Localizado Sobre a Geometria de Juntas Soldadas. **Revista Militar de Ciência e Tecnologia**, Porto Alegre - RS, v. 35, n. 1, p. 10-14, 2018.

FISCHER, A. **Estudo da Influência dos Parâmetros no Processo de Soldagem GMAW - Arco Pulsado**. UFMG. Belo Horizonte, p. 170p. 2011.

FORTES, C. **Apostila de Arames Tubulares**. [S.l.]: [s.n.], 2004. 103p p.

HARRISON, P. L.; FARRAR, R. A. Application of continuous cooling transformation diagrams for welding of steels. **International Materials Reviews**, v. 34, n. 1, p. 35-51, 1989.

HINCAPIÉ, C. A. A. **Análise Microestrutural dos Processos de Soldagem Mag Convencional, Pulsado e Pulsado Térmico e sua Relação com os Níveis de Energia**. Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica. Itajubá, p. 101. 2015.

HÖHN, R. P. **Estudo da sensibilidade dos processos MIG/MAG e arame tubular auto-protegido para a soldagem em operação de dutos.** UFSC. Florianópolis, p. 57p. 2010.

HULKA, K. High strength large diameter pipe plate from standard production to X80 to X100. **www.us.cbmm.com.br**, 1997. Acesso em: 05 agosto 2003.

KOU, S. **Welding Metallurgy**. New Jersey: Wiley-Interscience Publication, 2003.

LI, Y. et al. **The effect of vanadium and niobium on the proprierties and microstructure of the intercritically reheated coarse grained heat affected zone in low carbon microalloyed steels**. [S.l.]: ISIJ International, v. 1, 2001. 46-55 p.

MACHADO, I. G. **Soldagem & Técnicas Conexas**. Porto Alegre: Editado pelo autor, 1996. 477p p.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem Fundamentos e Tecnologia**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2011.

MATSUDA, F. . I. K. et al. Review of Machanical and Metallurgical Investigations of M-A Constituient in Welded Joint in Japan. **Trans. JWRI**, v. 24, n. 1, 1995.

MODENESI, P. J. . M. P. V. **Introdução aos Processos de Soldagem**. Belo Horizonte: UFMG, 2006. pp. 18-19 p.

MODENESI, P. J. **Introdução à Física do Arco Elétrico e sua aplicação na Soldagem dos Metais**. Belo Horizonte: UFMG, 2007. 146p p.

MORALES, R. F.; RESENDE, A. A. D.; SCOTTI, A. **Influência do aporte térmico sobre a morfologia da austenita e na quantidade das fases em chapas soldadas de aço inoxidável duplex SAF2205**. Uberlândia: UFU, 2007. pp. 175-181 p.

NETO, B. D. B.; SCARMINIO, I. S. **Como fazer Experimentos**. Campinas: [s.n.], 2001. 412 p.

OGATA, P. H. et al. **Caracterização Microestrutural de Aços API 5L X65, Austenitizado e Resfriado a diferentes taxas de Resfriamento**. Escola Politécnica da USP. São Paulo, p. 11. 2008.

OLIVEIRA, R. V. D. **Tratamento Térmico de um Tubo de aço API 5L X65 utilizado em Curvamento por Indução**. INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA. Rio de Janeiro - RJ, p. 156. 2014.

PAULA, M. P. M. D.; MODENESI, P. J.; TRINDADE, V. B. Análise da Influência de Parâmetros de Soldagem em Características Microestruturais e Mecânicas de Juntas Soldadas de um Tubo de Aço API X70Q para Aplicação Sour Service. **Soldagem & Inspeção**, Belo Horizonte, p. 180-190, 2018.

QUITES, M. A. Introdução à Soldagem a arco voltaíco. **Soldasoft**, p. 352p, 2002.

ROCHA, K. B. et al. **Caracterização Metalúrgica do Metal de Solda obtido na Soldagem de amostras da Liga AL-MG 5083 Soldadas com Arame Eletrodo ER5356 Utilizando o Processo MIG Duplo Pulso**. UFPA. Foz do Iguaçu, p. 12p. 2018.

S.T, F. B. D. **Apsotila de Soldagem**. Belo Horizonte - MG: UFMG, 2007.

SANT'ANNA, P. C. **Influência de Tratamentos Térmicos Intercríticos na Microestrutura e Propriedades Mecânicas do aço API 5L X65**. Universidade Estadual de Campinas. Campinas - SP, p. 168. 2006.

SCOTTI, A.; PONOMAREV, V. **Soldagem MIG/MAG:** melhor entendimento, melhor desempenho. 1ª. ed. São Paulo: M. A. M. Eckersdorff, 2008.

SILVA, E. F. D. et al. **Análise do processo de soldagem MIG/MAG sob o enfoque da qualidade da energia elétrica**. [S.l.]: [s.n.], 2011.

SILVA, R. D. S. **A Influência do Teor de Hidrogênio no Gás de Proteção sobre as Propriedades Mecânicas de Juntas Soldadas do Aço ASTM - A - 36**. João Pessoa - PB, p. 75. 2013.

TVERGAARD, V.; NEEDLEMAN, A. **Analysis of the Charpy V-notch test for welds.Engineering Fracture Mechanics**. [S.l.]: [s.n.], v. 65, 2000. 627-643 p.

WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELLO, F. D. H. D. **Soldagem Processos e Metalurgia**. São Paulo - SP: Editora Edgard Blucher, 1992.

ZIBEROV, M. **Avaliação da Pulsação Térmica para controle da Poça de Fusão em Soldagem de Raiz com MIG/MAG Automatizado**. Dissertação em Engenharia Mecânica - UFU. Urbelândia - MG. 2013.